

16

Российская ассоциация
искусственного интеллекта

Федеральный
исследовательский
центр «Информатика
и управление» РАН

Институт проблем
управления
им. В.А. Трапезникова
РАН

Национальный
исследовательский
университет
«Высшая школа
экономики»

The Institute
of Information
and Communication
Technologies
at the Bulgarian
Academy of Sciences

НАЦИОНАЛЬНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ИСКУССТВЕННОМУ
ИНТЕЛЛЕКТУ

КИИ-2018

ТРУДЫ
КОНФЕРЕНЦИИ
ТОМ 2

Москва
2018

Организаторы конференции:

Российская ассоциация искусственного интеллекта

ФГБУ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН

ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики»

The Institute of Information and Communication Technologies

at the Bulgarian Academy of Sciences

Конференция проводится при финансовой поддержке

Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-20067)

Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2018 (24–27 сентября 2018 г., г. Москва, Россия). Труды конференции. В 2-х томах. Т 2. – М.: РКП, 2018. – 287 с.

Во втором томе трудов публикуются доклады участников конференции, представленные на следующих секциях:

Секция 6. «Классификация, распознавание и диагностика»,

Секция 7. «Когнитивные исследования и психологические аспекты искусственного интеллекта»,

Секция 8. «Моделирование рассуждений и неклассические логики»,

Секция 9. «Нечеткие модели и мягкие вычисления»,

Секция 10. «Нейросетевые методы и нейроинформатика»,

Секция 11. «Прикладные интеллектуальные системы».

ПРЕДИСЛОВИЕ

Перед Вами труды 16-й Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием.

Организаторами конференции являются ФИЦ ИУ РАН совместно с ИПУ РАН, Высшей школой экономики и Общероссийской общественной организацией Российской ассоциацией искусственного интеллекта. Конференция имеет 30-летнюю историю – первая такая конференция прошла в 1988 году в Переславле-Залесском и с тех пор проходит регулярно один раз в два года.

Начиная с 2006 года организатором этой конференции являлся ИСА РАН.

Тематика конференции включает такие актуальные научные проблемы как интеллектуальный анализ данных, логические теории пространства-времени, моделирование рассуждений, моделирование поведения, интеллектуальные системы управления роботами и их коалиций, машинное обучение и другие.

На конференцию принято 127 докладов из 232, полученных организаторами, главным образом, сотрудников академических институтов и высших учебных заведений, а также некоторых отраслевых институтов из Москвы, Санкт-Петербурга, Калининграда, Апатитов, Твери, Смоленска, Нижнего Новгорода, Белгорода, Таганрога, Ростова-на-Дону, Воронежа, Самары, Саратова, Казани, Ульяновска, Калуги, Уфы, Екатеринбургa, Томска, Красноярска, Новосибирска, Иркутска, Хабаровска, Владивостока.

На конференцию, кроме того, были поданы доклады участников из Беларуси, Украины, Азербайджана, Армении, Вьетнама, Таиланда, Эквадора.

Всего предполагается более 200 участников.

В Национальный и Международный программный комитеты конференции входят известные российские и зарубежные специалисты в области искусственного интеллекта.

На конференции будут прочитаны пленарные доклады видных специалистов в области искусственного интеллекта.

Все присланные доклады прошли рецензирование либо членами программных комитетов конференции, либо приглашёнными специалистами в области искусственного интеллекта (не менее двух), которым организаторы конференции выражают свою благодарность. Окончательное решение о приёме докладов было принято на специальном заседании Национального программного комитета конференции. Мы надеемся, что проведение этой конференции даст новый стимул развитию исследований в области искусственного интеллекта.

Организаторы конференции выражают особую благодарность В.В. Борисову и К.П. Коршуновой за активное участие в формировании и подготовке настоящих трудов к печати.

*О.П. Кузнецов,
Г.С. Осипов*

Со-председатели конференции

Соколов И.А., академик РАН, ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Васильев С.Н., академик РАН, ИПУ РАН, г. Москва
Осипов Г.С., д.ф.-м.н., проф., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва

Национальный программный комитет КИИ-2018

Кузнецов О.П., д.т.н., проф., ИПУ РАН, г. Москва (председатель)
Аверкин А.Н., к.ф.-м.н., доцент, ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Вагин В.Н., д.т.н., проф., НИУ МЭИ, г. Москва
Гаврилова Т.А., д.т.н., проф., СПбГУ, г. Санкт-Петербург
Голенков В.В., д.т.н., проф., БГУИР, г. Минск
Еремеев А.П., д.т.н., проф., НИУ МЭИ, г. Москва
Карпов В.Э., к.т.н., доцент, НИЦ Курчатовский институт, г. Москва
Кобринский Б.А., д.м.н., проф., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Кузнецов С.О., д.ф.-м.н., проф., НИУ ВШЭ, г. Москва
Михеенкова М.А., д.т.н., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Палюх Б.В., д.т.н., проф., ТвГТУ, г. Тверь
Панов А.И., к.ф.-м.н., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Петровский А.Б., д.т.н., проф., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Поспелов Д.А., д.т.н., проф., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Ройзензон Г.В., к.т.н., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Рыбина Г.В., д.т.н., проф., НИЯУ МИФИ, г. Москва
Стефанюк В.Л., д.т.н., проф., ИППИ РАН, г. Москва
Тарасов В.Б., к.т.н., доцент, МГТУ, г. Москва
Сулейманов Д.Ш., академик АН РТ, ИПС АН РТ, г. Казань
Тельнов Ю.Ф., д.э.н., проф., МЭСИ, г. Москва
Федунов Б.Е., д.т.н., проф., РосНИИ АС, г. Москва
Финн В.К., д.т.н., проф., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Фоминых И.Б., д.т.н., проф., НИУ МЭИ, г. Москва
Хорошевский В.Ф., д.т.н., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Яковлев К.С., к.ф.-м.н., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва

Международный программный комитет КИИ-2018

Vadim Stefanuk, Institute for Information Transmission Problems, Russia (chair)
Alexey Averkin, FRC «Computer Science and Control» RAS, Russia
Franz Baader, Dresden University of Technology, Germany
Ildar Batyrshin, Instituto Politecnico Nacional, Mexico
Gerhard Brewka, University of Leipzig, Germany
Yves Demazeau, Laboratoire d'Informatique de Grenoble, France
Tatyana Gavrilova, St. Petersburg University, Russia
Vladimir Golenkov, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Belarus
Georg Gottlob, University of Oxford, England
Valeriya Gribova, Institute for Automation and Control Processes, Russia
Vladimir Khoroshevsky, FRC «Computer Science and Control» RAS, Russia
Alexander Kolesnikov, Kaliningrad branch of FRC CSC RAS, Russia
Sergey Kovalev, Rostov State Railway University, Russia
Alla Kravets, Volgograd State University, Russia
Sergei Kuznetsov, National Research University Higher School of Economics, Russia
Vladimir Pavlovsky, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russia
Leonid Perlovsky, Harvard University, USA
Alexey Petrovsky, FRC «Computer Science and Control» RAS, Russia
Yuri Popkov, FRC «Computer Science and Control» RAS, Russia
Vasil Sgurev, Inst. of Information and Communication Technologies, Bulgaria
Shahnaz Shahbazova, Azerbaijan Technical University, Azerbaijan

Оргкомитет КИИ-2018:

Кузнецов С.О., д.ф.-м.н., проф., НИУ ВШЭ, г. Москва (председатель)
Антропова Л.И., НИУ ВШЭ
Панов А.И., к.ф.-м.н., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Суворова М.И., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва
Чурашова С.С., НИУ ВШЭ, г. Москва
Яковлев К.С., к.ф.-м.н., ФИЦ ИУ РАН, г. Москва

СЕКЦИЯ 6 | КЛАССИФИКАЦИЯ, РАСПОЗНАВАНИЕ И
ДИАГНОСТИКА

УДК 004.9

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ
РЯДОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ¹**

И.Ф. Дьяков (*i.dyakov@ulstu.ru*)

И.А. Мошкина (*i.timina@ulstu.ru*)

А.А. Романов (*romanov73@gmail.com*)

Е.Н. Эгов (*kotcheshir73@gmail.com*)

Ульяновский государственный
технический университет, Ульяновск

В статье сформулированы основные принципы построения автоматизированной системы для балансировки производственных мощностей крупных промышленных предприятий. Представлен подход прогнозирования временных рядов в задаче балансировки мощности.

Ключевые слова: балансировка мощностей, временной ряд, прогнозирование

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 2.1182.2017/4.6 и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-47-732070).

Введение

Технологическая подготовка комплексного производства на крупном предприятии требует анализа производственных мощностей. Цель заключается в повышении эффективности использования материальных, технических и людских ресурсов [Ярушкина, 2017]. Достижение цели требует решения следующих задач:

- определение входных данных;
- создание моделей, отражающих состояние производственных процессов;
- прогнозирование состояний производственных процессов;
- разработка алгоритмов балансировки производственных мощностей.

Решение поставленных задач подразумевает возможность формирования единой информационной среды для технологической поддержки производства.

1. Временные ряды предприятия

Выполняется анализ производственных процессов авиационного завода. Задача состоит в том, чтобы сбалансировать его производственные мощности. Известный подход управления основан на использовании общей методологии, обусловленной применяемыми алгоритмами и показателями, накопленные по статистике производства. Основным недостатком этого подхода является существенное несоответствие между реальными показателями производства и собранными статистическими данными [Ярушкина и др., 2017], обусловленное следующими ограничениями:

- длительный временной интервал извлечения статистических коэффициентов из производственных показателей;
- невозможность динамической адаптации расчетов в отдельные периоды, которые меньше по длительности, чем горизонта прогнозирования;
- методология не предусматривает адаптацию к конкретному производству.

Резюмируя, можно отметить значительное усреднение в расчетах, что снижает точность. Анализируя эти методы, можно отметить, что показатели отражают агрегированную и усредненную информацию из исходя из специфики производственных процессов.

Такие процессы представимы дискретными временными рядами (ВР). При анализе производственных процессов установлено, что интервал дискретизации является месяцем – минимальным горизонтом прогноза и временем, в течение которого индикаторы остаются неизменными.

Могут быть выделены следующие типы временных рядов:

- фонд рабочего времени сотрудников;
- время работы инструмента;
- коэффициент производительности;
- использование площадей;
- износ инструмента.

Для всех типов процессов можно определить месячные значения показателей, для которых можно идентифицировать модели процессов с использованием временных рядов [Perfileva, 2013]. При это важно найти следующие характеристики временных рядов: сезонность, локальные и глобальные тенденции [Pedrycz, 2013].

2. F-преобразование

F-преобразование предполагает задание нечеткого разбиения универсального множества [Perfileva, 2006], в качестве которого выбирается конечный интервал $[a, b]$. Зафиксируем n ($n > 2$) узлов x_1, \dots, x_n на $[a, b]$ и предположим, что $x_1 < \dots < x_n$, причем $a = x_1, b = x_n$.

Под нечетким разбиением $[a, b]$ будем понимать совокупность n функций $A_1, \dots, A_n: [a, b] \rightarrow [0, 1]$, удовлетворяющих следующим свойствам:

- 1) $A_k: [a, b] \rightarrow [0, 1], A_k(x_k) = 1$;
- 2) $A_k(x) = 0$, если $x \notin (x_{k-1}, x_{k+1})$, где для единообразия обозначения мы положим $x_0 = a, x_{n+1} = b$;
- 3) $A_k(x)$ непрерывна;
- 4) $A_k(x), k = 2, \dots, n$ строго возрастает на $[x_{k-1}, x_k]$ и строго убывает на $[x_k, x_{k+1}]$;
- 5) $\sum A_k(x) = 1$ для всех $x \in w$.

Функции A_1, \dots, A_n называются базисными функциями. Базисные функции A_1, \dots, A_n могут служить также функциями принадлежности нечетких подмножеств A_1, \dots, A_n (обозначения функций и множеств унифицированы). Отметим, что форма базисных функций может быть уточнена дополнительно и согласована с такими требованиями к модели, как, например, гладкость.

Следующие формулы представляют нечеткое разбиение отрезка $[x_1, x_n]$, полученное совокупностью функций:

$$A_1(x) = \begin{cases} 1 - \frac{(x - x_1)}{h_1}, & x \in [x_1, x_2], \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$A_k(x) = \begin{cases} \frac{(x-x_k)}{h_{k-1}}, & x \in [x_{k-1}, x_k], \\ 1 - \frac{(x-x_k)}{h_k}, & x \in [x_k, x_{k+1}], \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$A_1(x) = \begin{cases} 1 - \frac{(x-x_{n-1})}{h_{n-1}}, & x \in [x_{n-1}, x_n], \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $k = 1, \dots, n-1$ и $h_k = x_{k+1} - x_k$.

Предположим, что функция f имеет своей областью определения множество $P = \{p_1, \dots, p_l\} \subset [a, b]$, где $l > n$. Множество P считается плотным относительно нечеткого разбиения A_1, \dots, A_n , если выполнено условие: $(\forall k)(\forall j)A_k(p_j) > 0$.

Пусть $A_k(p_j) = a_{kj}, k = 1, \dots, n; j = 1, \dots, l$, тогда матрица $A_{n \times l} = a_{kj}$ называется матрицей нечеткого разбиения для P , для которой справедливы свойства:

- $(\forall k)(\forall j)a_{kj} \in [0, 1];$
- $(\forall j)\sum_{k=1}^n a_{kj} = 1.$

F-преобразованием вектора f , определяемым матрицей нечеткого разбиения A , назовем вектор $F_n[f]$, где $F_n[f] = (F_1 \dots F_n)$ и $F_i = \frac{\sum_{j=1}^l a_{ij} f_j}{\sum_{i=1}^l a_{ij}}$.

Координаты вектора $F_n[f]$ назовем компонентами F-преобразования. Обозначим $a_i = \sum_{j=1}^l a_{ij}, i = 1, \dots, n$; тогда $(a_1 F_1, \dots, a_n F_n)^T = A^* f$. Компоненты F-преобразования являются точками минимума функции, задающей критерий взвешенного среднеквадратичного отклонения.

Пусть $F_n[f]$ есть F-преобразование функции f , определяемое $A_{n \times l} = a_{kj}$. Обратным F-преобразованием $F_n[f]$ назовем вектор $f_{F,n}$, вычисляемый по формуле $f_{F,n}^T = F_n[f]^* A$. Можно доказать, что если n возрастает, тогда $f_{F,n}(p_j)$ сходится $f(p_j), j = 1, \dots, N$.

3. Прогнозирование ВР на основе нечетких тенденций

Для прогнозирования числовых значений и нечетких тенденций состояния проекта организации в данном продукте используется метод моделирования НЭТ [Kasprzyk, 2009], который использует проверку нескольких гипотез [Ярушкина, 2016].

Гипотеза сохранения/смены тенденции. Тенденция рассматривается за предыдущий период. Прогнозируемое значение вычисляется по формуле: $\tau_{t+1} = \tau_t + \tau_p$, где τ_{t+1} – прогноз на следующий период времени; τ_t – реальное значение в момент времени t ; τ_p – значение тенденции за предыдущий период времени.

Гипотеза устойчивости/неустойчивости тенденции. Для прогнозирования используется скользящее среднее: $\tau_{t+1} = \tau_t + G\tau_p$, где $G\tau_p$ – значение доминирующей нечеткой тенденции. В результате рассмотрения тенденции за предыдущий выбранный период выбирается преобладающий кластер тенденции и делается прогноз по приведённой выше формуле, определяется тенденция. При одинаковых количествах вхождений тенденций используется оптимистичный прогноз, то есть выбирается наибольшее среднее значение тенденций.

Прогнозирование на заданный период на основе НЭТ. Алгоритм прогнозирования на период на основе тенденций работает следующим образом. Эксперт задает количество рассматриваемых тенденций за предыдущий период, например, за полгода – набор тенденций **A**. Либо он задает шаблон набора тенденций, зная предположительную тенденцию, следующую за этим набором $\{\tau_{t_{n-m}}, \dots, \tau_{t_{n-1}}, \tau_{t_n}\}$. Далее идет поиск набора **A** тенденции во всех остальных предыдущих периодах. $\{\tau'_{t_{n-k}}, \dots, \tau'_{t_{n-(k-1)}}, \tau'_{t_{n-1}}\}$. В результате нахождения такого набора **B** учитывается, какая тенденция **C** стоит после этого найденного набора **B**. Строится прогноз, обусловленный тенденцией **C** $\tau_{t+1} = \tau_t + \tau'_{t_{n+1}}$.

Если отсутствует такой набора **B**, который совпадал бы с набором **A**, то поиск набора повторяется, но уже ищется не полное его совпадение, а с учетом отклонения в одну тенденцию. Так повторяется до тех пор, пока не будет найден подходящий набор тенденций **B**.

Для выбора наилучшей гипотезы дополнительно вводится энтропийный ВР [Ярушкина и др., 2017].

4. Прогнозирование ВР с использованием энтропии

Для прогнозирования новых значений используется метод фазовой плоскости нечеткой тенденции. Метод использует изменение нечеткой тенденции на фазовой плоскости. Для этого каждой нечеткой тенденции задается вес. Для построения фазовой плоскости по нечеткой тенденции, каждой тенденции задается определенное значение, вес. Скорость приращения тенденции определяется как разность между весом тенденции в предыдущей точке и весом тенденции в текущей точке.

Необходимо унифицировать информацию о связи между весом тенденции и ее скоростью. Вводится кодировка возможных расположениях точек на координатной плоскости (табл. 1).

Табл. 1.

Код	Вес тенденции	Динамика тенденции	Точка на плоскости	Интерпретация
0	=0	=0	начало координат	Точка в начале координат, значит система в стабильном состоянии
1	>0	>0	первая четверть	В системе наблюдается рост или стабилизация после падения
2	<0	>0	вторая четверть	Меньшее падение после большого падения
3	<0	<0	третья четверть	В системе наблюдается падение или стабилизация после роста
4	>0	<0	четвертая четверть	Меньший рост после большого роста
5	=0	>0	на оси X справа от 0	Стабилизация после падения (появляется только после 3 состояния)
6	=0	<0	на оси X слева от 0	Стабилизация после роста (появляется только после 1 состояния)
7	>0	=0	на оси Y сверху от 0	Рост после роста
8	<0	=0	на оси Y снизу от 0	Падение после падения

Следующий шаг для получения прогнозного значения – определение соответствия между смещением точек на фазовой плоскости и тенденций.

Запоминаются значения тенденций для каждого кода. Получаются правила из табл. 2.

Табл. 2.

Стабильность	Рост	Падение
0 или 5 или 6 -> 0	0 или 2 или 3 или 4 или 5 или 6 или 8 -> 4	0 или 1 или 2 или 3 или 4 или 5 или 6 или 7 -> 2
1 или 4 или 7 -> 5	1 или 4 или 7 -> 7	2 или 8 -> 8
2 или 3 или 8 -> 6	4 -> 1	2 -> 3

Из этих правил делается ряд выводов.

Во-первых, если точка фазовой плоскости для прогнозируемой точки будет лежать в центре координат (код 0), либо на оси X (кода 5 и 6), то значение нечеткой тенденции будет соответствовать Стабильности.

Во-вторых, если точка будет располагаться в первой или четвертой четверти, или лежать на оси Y выше 0, то значение нечеткой тенденции будет соответствовать Росту. Возможен учет интенсивности. В таком случае тенденция Рост разбивается на 3 тенденции Роста с учетом интенсивности: Слабый, Средний или Сильный.

В-третьих, если точка будет располагаться во второй или третий четвертях, или на оси Y ниже 0, то значение нечеткой тенденции будет соответствовать Падению. Возможен учет интенсивности. В таком случае тенденция Падение разбивается на 3 тенденции Падения с учетом интенсивности: Слабое, Среднее или Сильное.

При анализе ВР определяются схемы перемещения точки на фазовой плоскости. Определяется частота перехода точки из одной области (помеченной кодом) в другую. На основе частоты определяется часто встречаемая схема перемещения. В этой схеме код начальной точки равен коду расположения точки на фазовой плоскости для последней известной точки ВР. По значению кода для конечной точки в схеме определяются возможные тенденции (их может быть более одной). Далее вычисляются прогнозируемые значения на основе этих тенденций. К недостаткам метода можно отнести получение нескольких равновероятных прогнозных значения из которых требуется выбрать одно.

5. Система балансировки производственных мощностей

Разработанная информационная система реализует следующие функциональные возможности:

- осуществляет расчет производственных мощностей;
- выявляет дефицит и формирует рекомендации по балансировке, определяя возможности перераспределения объемов работ того же типа;

- определяет необходимость ввода дополнительных производственных площадей и оборудования;
- определяет необходимость набора и перемещения работников.

Основными входными данными является содержание производственной программы. Она устанавливает список продуктов и объем работ для их создания, распределенных по периодам. Основываясь на текущих показателях производственных процессов, их динамике, предприятие может перераспределять объем работы между временными периодами.

Как указано выше, используются три типа ресурсов: человеческие, материальные и производственные. Для проведения балансировки требуется совершить следующие шаги.

- определить подразделения, для которых выполняется балансировка мощности.
- для каждого подразделения вычислить текущую мощность для каждого из трех типов ресурсов;
- для каждого подразделения определить свободные мощности для каждого из трех типов ресурсов.

Следующие шаги зависят от типа ресурса. Для человеческих ресурсов нам необходимо установить следующие возможности для балансировки: перевод между подразделениями и найм новых работников. Ограничивающие факторы при этом – навыки конкретных сотрудников при переводе и отсроченный старт работы сотрудника при найме.

Алгоритм балансировки требуется дополнить следующими шагами:

- если есть свободные человеческие ресурсы и возможен перевод рабочих, то мы это выполняем;
- в противном случае нанимаем работников.

Эти шаги показывают приоритет выбора, который определяется предприятием.

Материальные ресурсы, такие как оборудование и станки, трудно передавать между отделами. Поэтому при балансировке в системе отображаются возможности для перераспределения запланированных работ. Если свободных ресурсов нет, то единственным вариантом является приобретение нового оборудования.

Также стоит отметить особенность при расчете производственных площадей. Их перераспределение также невозможно. Предприятие может начать использовать новые производственные площади. Отметим, что использование производственных площадей напрямую зависит от оборудования, занимающего эти площади. Поэтому на этапе планирования также можно выбрать оптимальный вариант загрузки работами.

Текущая реализация информационной системы основана на средних значениях показателей в течение года. Предлагается анализировать временные ряды индикаторов с более частыми интервалами. В этом важную роль будет определять накопленная информация в корпоративных информационных системах предприятия.

Заключение

Анализ существующих алгоритмов, данных и информационных систем показал сильное накопление ошибок в расчетах. Продемонстрировано большое положительное влияние оперативного мониторинга показателей.

Рассмотренные подходы позволяют улучшить качество технологической подготовки сложных производств. Предлагаемые методы прогнозирования временных рядов позволяют повысить качество управленческих решений.

Список литературы

- [Ярушкина и др. 2017] Интеграция проектных диаграмм и онтологий в задаче балансировки мощностей авиастроительного предприятия / Н.Г. Ярушкина, Т.В. Афанасьева, В.Н. Негода, М.К. Самохвалов, А.М. Наместников, Г.Ю. Гуськов, А.А. Романов // Автоматизация процессов управления, 2017, № 4.
- [Ярушкина и др., 2017] Мера энтропии в оценке качества программного обеспечения / Н.Г. Ярушкина, И.А. Тимина, Е.Н. Эгов // В сб.: Нечеткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии (НСМВИТ-2017) труды VII Всероссийской научной-практической конференции, 2017.
- [Ярушкина, 2016] Автоматизированное проектирование на основе модели прогнозирования нечетких тенденций метрик / Н.Г. Ярушкина, И.А. Тимина // В сб. тр. XV Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием, 2016.
- [Ярушкина, 2017] Моделирование процесса технологической подготовки производства на основе онтологического инжиниринга / Н.Г. Ярушкина, В.Н. Негода, Ю.П. Егоров, В.С. Мошкин, В.В. Шишкин, А.А. Романов, Е.Н. Эгов // Автоматизация процессов управления, 2017, № 4.
- [Kacprzyk, 2009] Kacprzyk J. Using Fuzzy Linguistic summaries for the comparison of time series / J. Kacprzyk, A. Wilbik // 2009 International Fuzzy Systems Association World Congress and 2009 European Society for Fuzzy Logic. 2009.
- [Pedrycz, 2013] Pedrycz W. Time Series Analysis, Modeling and Applications: A Computational Intelligence Perspective (e-book Google) / W. Pedrycz, S.M. Chen // Intelligent Systems Reference Library. 2013. Vol. 47.
- [Perfileva, 2006] Perfileva, I.: Fuzzy transforms Theory and applications. Fuzzy Sets and Systems. 2006. Vol. 157.
- [Perfileva, 2013] Perfileva I., Yarushkina N., Afanasieva T., Romanov A. Time series analysis using soft computing methods // International Journal of General Systems. 2013. 42:6.

УДК 004.931

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ¹

Р.Ю. Замараев (*zamaraev@ict.sbras.ru*)

С.Е. Попов (*popov@ict.sbras.ru*)

Институт вычислительных технологий СО РАН,
Новосибирск

Описывается технология автоматического обнаружения и классификации сейсмических событий, таких как региональные землетрясения и промышленные взрывы. Технология включает подготовку шаблонов событий, алгоритмы классификации выборочных сигналов, принципы организации и визуализации потоковых классификаций. Основу алгоритмов составляют преобразования данных к виду энтропийной модели, позволяющей обобщать информацию по трем направлениям измерений, усреднять и сравнивать с другими аналогичными моделями. В работе это позволило получить характеристические функции сейсмического поля и на их основе построить алгоритм обнаружения и классификации сейсмических событий.

Ключевые слова: сейсмические события, автоматическая классификация, энтропийные модели, характеристические функции, шаблоны событий, меры подобия

Введение

Актуальной задачей региональных систем сейсмического мониторинга является обнаружение и классификации в автоматическом режиме событий природного и искусственного происхождения, которые накладываются по магнитуде и локализации.

В научном разделе классификации сейсмических событий известно множество работоспособных подходов, которые опираются на различные комбинации процедур фильтрации, спектрального и вейвлет-анализа сигналов, интегрируемых с байесовским подходом, аппаратом искусственных нейронных сетей и кластерным анализом.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00013).

Достаточно подробный обзор в работе [Замараев, 2016] охватил работы до 2011 года включительно. По его итогам были выделены две конкурирующие идеологии: разработка оригинальных признаков пространств для популярных алгоритмов классификации, и усиление существующих алгоритмов классификации для известных признаков пространств.

Доказанный негативный эффект на качество реализации любых теоретических подходов накладывает существующие организационные проблемы, связанные с доступом к данным, поэтому целесообразным может оказаться применение подходов с малыми требованиями к объему и качеству исходной информации.

Кроме того, без должного внимания, по мнению авторов, оказались вопросы быстрой реакции, возможности потокового исполнения и трудоемкости развертывания классификаторов.

В разрабатываемом авторами подходе используется непосредственный признак генезиса сейсмического события – форма сигнала, но приведенная к удобному для манипуляций и сравнения виду энтропийной модели. Это обеспечивает быструю разработку шаблонов сейсмических событий на имеющейся сети с минимальными затратами на адаптацию от станции к станции.

Использование модифицированной формы сигнала, тем не менее, оставляет признаковое пространство в удобной интерпретируемой временной области, и позволяет использовать в качестве мер близости выборочного события с идентифицированными шаблонами простые оценки типа расстояний между одномерными векторами.

Совокупность представленных идей по мнению авторов должна обеспечить полную автоматизацию процесса классификации сейсмических событий с низкой стоимостью развертывания и возможностью пакетного и/или потокового исполнения.

1. Характеристическая функция сейсмического поля

Рассмотрим конечный дискретный сигнал $\{x_i\}$, $i = 0 \dots N$, где N – расчетное окно или число отсчетов. Для построения характеристической функции его исходные значения заменяются квадратами размахов, что обеспечивает неотрицательность величин для дальнейших вычислений:

$$d_i = x_i - x_{i-1}; \quad i = 1 \dots N.$$

Вычисляется вектор весов q_i , затем, вектор энтропий:

$$q_i = d_i / \sum_i d_i,$$

$$Ent_i = -q_i \ln q_i.$$

Энтропийная модель дискретного сигнала Ent обладает всеми формальными свойствами шенноновской энтропии выборки [MacKay, 2003], если принять q_i как вероятность выбора отчета i по значению d_i .

Эта модель обеспечивает аддитивность элементов, относящихся к одному сигналу и, главное, аддитивность элементов из различных сигналов в синхронных отчетах.

По изложенному выше алгоритму для трех ортогональных компонент сейсмического поля x_E, x_N, x_Z со стандартными обозначениями направлений измерения E, N, Z вычисляются энтропийные модели Ent_E, Ent_N, Ent_Z .

Вычисляется модель обобщенной информации по трем каналам измерений:

$$H = Ent_E + Ent_N + Ent_Z.$$

На последнем этапе вычисляется характеристическая функция сейсмического поля в расчетном окне:

$$C_i = \sum_{j=1}^i H_j.$$

За счет аккумулярования в этой модели трио сигналов с высокой долей стохастики приводится к одномерной стационарной S -образной форме с очевидным пределом насыщения (из свойств энтропии) $\max(C) = 3 \ln N$.

Характерным отличием взрывов от событий природного происхождения является наличие опережающего пакета P -волн с увеличенными размахами. Вследствие этого получаем модель H с двумя экстремума огибающей и двух ступенчатую характеристическую функцию C .

Стационарность модели C обеспечивает хорошую аппроксимацию по осредненным (сглаженным) данным. Следовательно, подход может быть усилен разработкой шаблонов с заданными свойствами путем моделирования огибающих модели обобщенной информации H .

2. Шаблоны событий

Для построения шаблонов событий на выбранной станции сейсмических наблюдений необходимо определиться с расстояниями до зон интереса, оценить время эффективного затухания сейсмических возмущений от региональных событий на станции и выбрать подходящее расчетное окно N в секундах или отчетах.

Затем необходимо отобрать качественно записанные и достоверные события по классам в виде фрагментов длиной N из суточных записей. Для каждого класса по приведенному выше алгоритму построить характеристические функции. Из них нужно вычислить по три шаблона: средний и его границы в долях среднеквадратического отклонения.

В итоге можно получить шаблоны реальных событий для взрывов (“Blust...”) и для землетрясений (“EarthQuake...”), примеры которых представлены на рис. 1.

Для реализации потоковых автоматических классификации необходимо учесть фрагментарное попадание события в расчетное окно. Для этого с помощью функции

$$f(t) = A(t / Tn^2)^n \exp(n - t / Tn) + noise$$

с подбором параметров A , T , n строится набор одномодальных огибающих и характеристических функций из них; функция $noise$ изображает белый шум.

Требуемые абстрактные шаблоны должны имитировать последовательное прохождение сейсмического возмущения через расчетное окно:

- на входе “WaveFront-I”, “WaveFront-II” и “WaveFront-III”;
- на выходе “WaveRear-I”, “WaveRear-II” и “WaveRear-III”;
- в середине окна со смещениями влево и вправо “WaveMiddle”, “WaveLeft” и “WaveRight” соответственно.

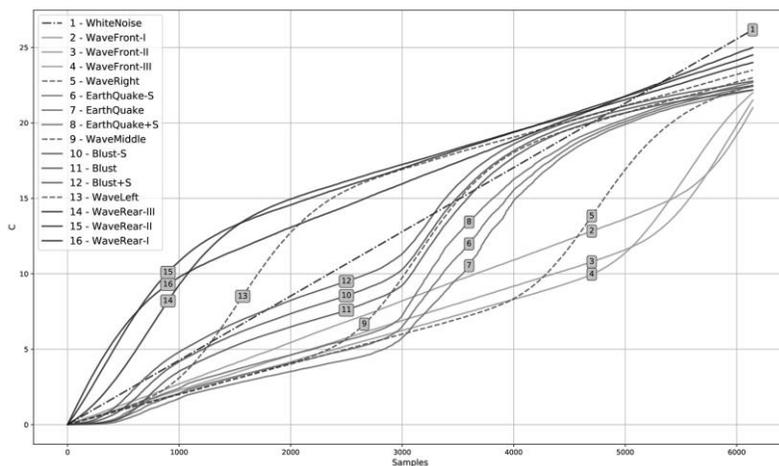


Рис. 1. Набор именных шаблонов (характеристических функций)

Шаблон “WaveMiddle” вместе с шаблонами взрывов “Blust...” и землетрясений “EarthQuake...” формирует подсистему, хорошо отличимую от шаблонов неполных и смещенных от центра окна огибающих. Еще необходим абстрактный шаблон равномерного распределения или белого шума “WhiteNoise”, который изображает сейсмический фон.

Такая система шаблонов порывает весь набор характеристических функций, которые могут быть получены в расчетном окне.

3. Диагностическая матрица и алгоритм принятия решения

Согласно алгоритму вычисления характеристической функции, все шаблоны находятся в одном метрическом пространстве и имеют общий предел насыщения. Тогда, полагая шаблоны признаками, а отсчеты объектами (независимыми наблюдениями), можем дополнить их набор выборочной характеристической функцией и вычислить аналог диагностической матрицы по Байесу путем стандартизации в объектах:

$$D_{i,k} = (C_{i,k} - \mu_i) / \sigma_i,$$

где $i = 1, \dots, N$; $k = 1, \dots, K + 1$; k – номера шаблонов; K – число шаблонов; μ_i и σ_i – среднее и среднееквадратическое значения векторов.

В матрице D можно оценить подобие выборочной характеристической функции каждому шаблону из набора как расстояние между двумя признаками. Априорных суждений о преимуществах тех или иных дистанций не существует, поэтому в текущей версии технологии используются все пригодные для номинальных признаков [Gan et al., 2007] с различными вариациями – итого выбрано $L = 12$ дистанций.

Теперь можно реализовать простейшую систему голосования, в которой каждая дистанция имеет один голос, который отдается шаблону с минимальной дистанцией до выборочной характеристической функции. Простое суммирование голосов у каждого шаблона определяет его рейтинг R_k , $k = 1, \dots, K$. Тогда сделать вывод о ближайшем шаблоне и оценить надежность этого вывода можно по следующей схеме.

1. Заполняется таблица дистанций $K \times L$.

2. Определяется рейтинг каждого шаблона R_k – число случаев, когда выбранная дистанция до выборочной характеристической функции минимальна.

3. Определяется номер шаблона с максимальным рейтингом – $k_{\max} = \arg \max(R)$.

4. Если k_{\max} не единственный (еще один шаблон получил то же количество голосов), то выборочная характеристическая функция остается без класса.

5. Если k_{\max} единственный, то классом выборочной характеристической функции признается шаблон с номером (именем) k_{\max} , и далее устанавливается надежность вывода:

5.1. Если $k_{\max} \geq 3/4L$ (абсолютное большинство), то вывод достоверный.

5.2. Если $k_{\max} \geq 2/3L$ (квалифицированное большинство), то вывод недостоверный.

5.3. Если $k_{\max} \geq 1/2L + 1$ (простое большинство), то вывод допустимый.

5.4. Если $k_{\max} < 1/2L + 1$, то выборочная характеристическая функция оастается без класса.

Таким образом, сканируя сигналы расчетным окном с заданным шагом по времени (числу отсчетов) и применяя предложенный алгоритм, можно зафиксировать появление обособленного события и классифицировать его.

4. Тестирование и обсуждение результатов

На рис. 2 представлены результаты классификации фрагмента сейсмограммы длительность 3 часа 45 минут одного из рабочих дней. Наглядность результата такова, что особых комментариев не требуется, кроме одного: промышленный взрыв, попадая в расчетное окно пакетом опережающих P -волн до прихода основного пакета S -волн порождает ложные классификации землетрясения “Earthquake...”. Однако, когда возмущение заходит в расчетное окно полностью, оно классифицируется правильно, как промышленный взрыв ”Blust...”. Понимание этой особенности необходимо на стадии синтаксического разбора протокола классификации, с тем, чтобы сформулировать верное итоговое заключение.

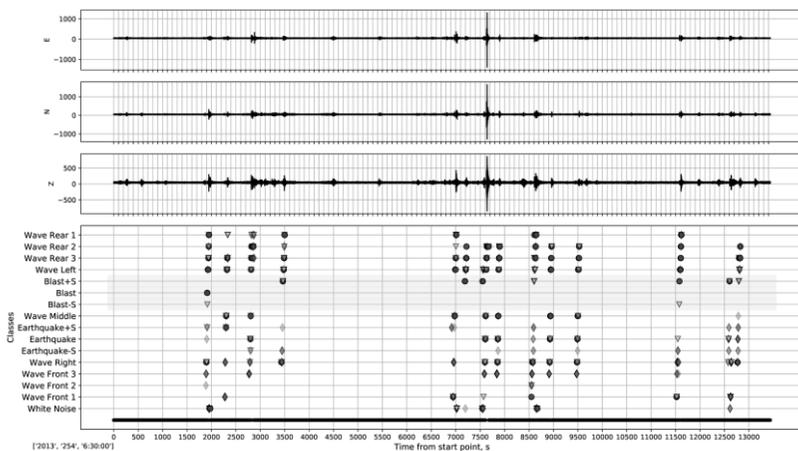


Рис. 2. Развертка классификации фрагмента сейсмограммы (станция BRСR, сеть ASGSR; время GMT, шаг 1 сек). Маркерами обозначена надежность вывода: ● – достоверно; ▼ – недостоверно; ◆ – допустимо; ■ – без классификации

В этом примере классифицированы 8 взрывов, 1 крупное и 5 мелких региональных землетрясений. Несколько заметных на низком шумовом фоне событий с низкой энергией остались без классификации. Отметим, что система справилась с классификацией взрыва и землетрясения, перекрывшихся в диапазоне 7500–7700 сек задним и передним фронтами.

Важно, что настройка системы классификации для новой станции потребует только перерасчета абстрактных шаблонов для другой ширины расчетного окна при существенном изменении расстояния. Также потребуется некоторое количество представительных сигналов от взрывов и землетрясений для построения шаблонов реальных событий.

В остальной части алгоритм классификации полностью автоматический, и не требует вмешательства оператора ни на стадии обнаружения сейсмического события, ни на стадии получения вывода.

К достоинствам алгоритма авторы относят: использование простых функций и однопроходных итераций (суммирований) без промежуточных настроек; отсутствие ветвлений и рекурсий в вычислениях. Это обеспечивает высокое быстродействие алгоритма. Так на рабочей станции Intel Core i7 3,2 ГГц с 32 Гб ОЗУ приложение JAVA с минимальной многопоточковой оптимизацией выполняется менее 800 сек. Для примера в суточной сейсмозаписи содержится 864 сек. Тем самым гарантирована потоковая обработка сейсмических сигналов в режиме близком к реальному времени при использовании более мощных рабочих станций и/или массово параллельных вычислений.

Заключение

Разработан оригинальный алгоритм классификации сейсмических событий, в котором новизну подхода составляют предварительные преобразования сигналов к энтропийной модели, позволяющей обобщать информацию об особенностях волновых форм по трем направлениям измерений и сравнивать с другими аналогичными моделями.

Технология классификации на основе этого алгоритма проста с точки зрения программной реализации и организации потоковых и пакетных вычислений. Она обеспечивает полностью автоматизированный процесс классификации сейсмических событий и быстро адаптируется на новые сейсмические станции.

Список литературы

- [Замараев и др., 2016] Замараев Р.Ю., Попов С.Е., Логов А.Б. Алгоритм классификации сейсмических событий на основе энтропийного отображения сигналов // Физика Земли, 2016, № 3.
- [Gan et al., 2007] Gan G., Ma C., Wu J. Data clustering: theory, algorithms, and applications (ASA-SIAM series on statistics and applied probability) // Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, PA, USA. 2007.
- [МакКей, 2003] МакКей D. Information Theory, Inference, and Learning Algorithms // Cambridge: Cambridge University Press. 2003.

УДК 519.716.5

КАК УЛУЧШИТЬ ОЦЕНКУ МНОЖЕСТВ ПРИЗНАКОВ С ПОМОЩЬЮ ПРИНЦИПА МИНИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ОПИСАНИЯ?

С.О. Кузнецов (*skuznetsov@hse.ru*)

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва

Т.П. Махалова (*tpmakhalova@hse.ru*)

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва
LORIA (CNRS – Inria – Университет Лотарингии),
Вандевр-ле-Нанси, Франция

А. Наполи (*amedeo.nqpoli@loria.fr*)

LORIA (CNRS – Inria – Университет Лотарингии),
Вандевр-ле-Нанси, Франция

Подходы к извлечению знаний, основанные на анализе формальных понятий, позволяют всесторонне исследовать имеющуюся информацию посредством обхода создаваемой решетки формальных понятий. Решетки могут содержать экспоненциальное число элементов. Одним из наиболее распространенных подходов к уменьшению их числа является отбор на основе индексов. В данной работе мы предлагаем использовать принцип минимальной длины описания и демонстрируем, как его применение может улучшить результаты отбора, основанного на индексах. Предлагаемый подход может использоваться не только для замкнутых, но и для произвольных множеств признаков.

Ключевые слова: формальные понятия, минимальная длина описания, отбор множеств признаков

Введение

Анализ формальных понятий (АФП) играет важную роль в интеллектуальном анализе данных и машинном обучении. На практике при применении АФП сталкиваются с проблемой экспоненциального роста числа формальных понятий.

В настоящее время данная проблема решается посредством пред- или постобработки, вычислением приближенных понятий (см. обзор [Kuznetsov et al., 2018]). Целью перечисленных методов является получение небольшого набора интересных, значимых понятий. Данное множество должно также обладать минимальной избыточностью [Vuzmakov et al., 2015]. В данной статье мы исследуем такие множества понятий.

Наряду с индексами оценки понятий мы применяем принцип минимальной длины описания (МДО) [Grünwald, 2007], который позволяет отобрать небольшой набор разнообразных и хорошо интерпретируемых понятий. Обеспечивая сжатие данных, принцип МДО позволяет сохранить баланс между качеством «подстройки» под данные и сложностью модели и не требует предопределения дополнительных параметров [Aggarwal et al., 2014].

Как и методы, основанные на снижении размерности [Айвазян и др., 1989; Терехина, 1986; Глотов, 1984; Подиновский, 2007], предлагаемый подход позволяет получить описание объектов в пространстве меньшей размерности, однако обладает принципиальным отличием. Известный метод снижения размерности позволяет представить все объекты в одном, отличном от исходного, признаковом пространстве, тогда как предлагаемый подход можно рассматривать как метод отбора признаков в отдельных группах объектов, когда каждая из них представляется в разных подпространствах исходного признакового пространства.

Мы также изучаем вопрос о том, как представления об интересности отбираемых понятий могут быть использованы в рамках МДО. Предлагаем использовать индексы как априорные представления об интересности и применять МДО для улучшения «качества» отбираемых в соответствии с индексами понятий. Предлагаемый подход может быть рассмотрен как отбор множеств признаков (паттернов) на основе выбранных индексов оценки интересности с дальнейшей постобработкой, так, как и метод минимизации длины описания с дополнительными ограничениями, где ограничениями являются индексы оценки интересности понятий. Стоит отметить, что предлагаемый подход может быть применен не только к понятиям и их содержанию, т.е. замкнутым множествам признаков, но и к произвольным множествам признаков.

1. Анализ формальных понятий. Основные понятия

Здесь мы приводим основные понятия теории анализа формальных понятий [Ganter et al., 1999]. Пусть заданы множество объектов G , множество признаков M и бинарное отношение между ними $I \subseteq G \times M$, тогда формальным контекстом называется тройка (G, M, I) . На множестве объектов и множестве признаков задана операция $(\cdot)'$. Для произвольных подмножеств $A \subseteq G$ и $B \subseteq M$ она принимает следующий вид:

$$A' = \{m \in M \mid \forall g \in A : gIm\}, B' = \{g \in G \mid \forall m \in B : gIm\}.$$

A' представляет собой множество признаков, общих для всех объектов множества A , B' – множество объектов, обладающих всеми признаками из B . B также называют паттерном. Оператором замыкания $(\cdot)''$ на множестве G называется отображение $\varphi: X \rightarrow X$, где $X \subseteq G$. Данное отображение обладает следующими свойствами: идемпотентность ($\varphi\varphi X = \varphi X$), экстенсивность ($X \subseteq \varphi X$) и монотонность (из $X \subseteq Y$ следует $\varphi X \subseteq \varphi Y$).

Формальным понятием называется пара (A, B) , где $A \subseteq G$, $B \subseteq M$ и $A' = B$, $B' = A$. A и B называют объемом и содержанием формального понятия, соответственно.

Пример. Рассмотрим формальный контекст, представленный в табл. 1. Множество формальных понятий составляют 8 элементов. Например, понятие $(\{g_1, g_2, g_3\}, \{m_1, m_3\})$ соответствует животным. Здесь m_1 – 4 ноги (лапы), m_2 – шерсть, m_3 – меняют размер, m_4 – устойчивы к холоду, m_5 – черно-белый, m_6 – не выделяют CO_2 , m_7 – желто-коричневый, m_8 – зеленый, m_9 – серый.

Табл. 1.

Объекты		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9
g_1	собака	×	×	×			×			
g_2	кошка	×	×	×				×		
g_3	лягушка	×		×					×	
g_4	машина			×	×					×

2. Принцип минимальной длины описания в задаче отбора множеств признаков (паттернов)

Принцип минимальной длины описания в контексте отбора паттернов формулируется следующим образом: лучшими паттернами являются такие, которые обеспечивают максимальное сжатие данных [Лус, 2008].

Основу данного подхода составляет кодовая таблица, в которую записаны некоторые паттерны и длины их кодов в битах. Лучшая кодовая таблица обеспечивает максимальное сжатие минимальным набором паттернов, т.е. минимизирует длину $L(CT, D) = L(D / CT) + L(CT)$, где $L(D / CT)$ – длина набора данных D закодированных с помощью кодовой таблицы CT , $L(CT / D)$ – длина кодовой таблицы CT , вычисленной на основе набора данных D . Для кодирования объекта нужно выбрать набор непересекающихся паттернов, которые полностью покрывают множество признаков этого объ-

екта. Мы обозначим как $u(B) = |\{t \in D \mid B \in \text{cover}(t)\}|$ количество использований паттерна B для покрытия объектов в D , $U = \sum_{B \in CT} u(B)$ – общее количество использований всех паттернов кодовой таблицы CT для покрытия набора данных D . Принципы построения таблицы будут рассмотрены ниже.

Для определения длины кодирования паттернов используется оптимальное префиксное кодирование Шеннона, т.е. $l(B) = -\log \Pr(B)$, где вероятность вычисляется следующим образом: $\Pr(B) = u(B)/U$. Таким образом, паттерны с высокой частотой использования имеют меньшую длину. Мы оставляем детали реализации схем кодирования за пределами данной статьи. Поскольку в данной работе мы не преследуем цель точного кодирования, далее будет рассматриваться упрощенная версия $L(CT, D)$, в которой учитываются исключительно слагаемые, характеризующие «специфичность» паттернов:

$$L(D \mid CT) = \sum_{g \in D} \sum_{B \in \text{cover}(g)} l(B) = - \sum_{B \in CT} u(B) \log \frac{u(B)}{U},$$

$$L(CT \mid D) = \sum_{B \in CT} \text{code}(B) + l(B),$$

где $\text{code}(B)$ – число бит для хранения множества признаков B .

На начальном этапе кодовая таблица состоит из одноэлементных паттернов, т.е. $\{\{m\} \mid m \in M\}$. Также имеется набор кандидатов – упорядоченное в соответствии выбранным критерием множество паттернов, которые могут быть добавлены в кодовую таблицу. Минимизация общей длины заключается в последовательном добавлении лучшего (по выбранному критерию) паттерна, перевычислении покрытия с обновленным набором признаков и вычислении новой длины. Если эта длина оказывается меньше предыдущей, то данный паттерн добавляется в кодовую таблицу. Процесс продолжается до тех пор, пока все паттерны из набора кандидатов не будут просмотрены.

Набор кандидатов может быть составлен из самых разнообразных паттернов (множеств признаков): произвольных, замкнутых, δ -множеств и др. В качестве критерия, в соответствии с которым упорядочиваются множества признаков, может быть выбран любой индекс, в частности, в алгоритме Krimp [Vreeken et al., 2011] паттерны упорядочиваются по размеру, а затем по частоте их встречаемости в наборе данных.

Поскольку проблема выбора оптимального набора паттернов подразумевает полный перебор всех возможных комбинаций, на практике применяются различные эвристики [Гладун, 1977; Ройзензон, 2005].

Пример. Рассмотрим, как вычисляется кодовая таблица, используя формальный контекст, представленный в табл. 1. В качестве кандидатов выберем все формальные понятия (A, B) , упорядоченные по площади, т.е. $|A| \times |B|$. В табл. 2 представлен пошаговый процесс заполнения кодовой таблицы. Здесь ЧИ – частота использования паттерна из кодовой таблицы. На начальном этапе таблица состоит из одноэлементных паттернов m_i . На первом шаге добавляется первый кандидат, перевычисляется покрытие. Поскольку длина $L(D, CT)$ для новой таблицы меньше предыдущей, кандидат $m_1m_2m_3$ включается в кодовую таблицу. Покрытие этим множеством фиксируется и больше не изменяется (см. колонку «Данные с покрытием»). Процесс завершается, когда все кандидаты будут просмотрены.

Табл. 2.

	Кодовая таблица (КТ)		Данные и их покрытие элементами КТ	Набор кандидатов, площадь
	МП	ЧИ		
Шаг 0	m_3	4	$(m_1)(m_2)(m_3)(m_6)$	$m_1m_2m_3$, 6
	m_1	3	$(m_1)(m_2)(m_3)(m_7)$	m_1 ш ₃ , 6
	m_2	2	$(m_1)(m_3)(m_8)$	$m_1m_2m_3m_6$, 4
	m_4	1	$(m_3)(m_4)(m_9)$	$m_1m_2m_3m_7$, 4
	m_6-m_9	1		$m_1m_3m_8$, 3
	m_5	0		$m_3m_4m_9$, 3
Шаг 1	$m_1m_2m_3$	2	$(m_1m_2m_3)(m_6)$	$m_1m_3m_8$, 3
	m_3	2	$(m_1m_2m_3)(m_7)$	$m_3m_4m_9$, 3
	m_1, m_4, m_6-m_9	1	$(m_1)(m_3)(m_8)$	m_1m_3 , 2
	m_2, m_5	0	$(m_3)(m_4)(m_9)$	
Шаг 2	$m_1m_2m_3$	2	$(m_1m_2m_3)(m_6)$	$m_3m_4m_9$, 3
	$m_1m_3m_8$	1	$(m_1m_2m_3)(m_7)$	
	m_3, m_4, m_6, m_7, m_9	1	$(m_1m_3m_8)$	
	m_1, m_2, m_5, m_8	0	$(m_3)(m_4)(m_9)$	
Шаг 3	$m_1m_2m_3$	2	$(m_1m_2m_3)(m_6)$	
	$m_1m_3m_8$	1	$(m_1m_2m_3)(m_7)$	
	$m_3m_4m_9$	1	$(m_1m_3m_8)$	
	m_6, m_7	1	$(m_3m_4m_9)$	
	m_1-m_5, m_8-m_9	0		

3. Принцип минимального описания в задаче отбора формальных понятий (замкнутых множеств признаков)

Применение принципа МДО позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с отбором лучших n понятий по выбранным индексам. К основным преимуществам относятся следующие: не требуется явно фиксировать,

сколько элементов должно быть выбрано; отобранное множество содержит разнообразные (непохожие попарно) понятия; множество отобранных понятий небольшое по размеру, при этом число элементов не растет линейно с ростом числа понятий в исходном множестве.

Для демонстрации указанных преимуществ была проведена серия экспериментов. Мы использовали данные репозитория LUCS-KDD [Coenen, 2003]. В качестве мер интересности понятия (A, B) рассматривались следующие индексы: мощность содержания $\text{len}(B) = |B|$, мощность объема $\text{fr}(B) = |A|$, лифт $\text{lift}(B) = \text{Pr}(B) / \prod_{b \in B} \text{Pr}(b)$, где $\text{Pr}(\cdot)$ – относительная частота множе-

ства признаков в наборе данных, отделимость

$$\text{sep}(A, B) = (|A \setminus B|) / \left(\sum_{g \in A} |g'| + \sum_{m \in B} |m'| - |A \setminus B| \right).$$

Отметим, что отбор понятий в нашем случае основан на оценке их содержаний и рассматриваемая задача может быть отнесена к более широкому классу: отбор произвольных множеств признаков.

Для вычисления покрытия мы использовали жадную стратегию (см. алгоритм Krimp [Vreeken et al., 2011]). При этом наборы кандидатов упорядочивались в соответствии с индексами: $\text{area_lf}(B) = \text{len}(B) \times \text{fr}(B)$, $\text{area_ll}(B) = \text{len}(B) \times \text{lift}(B)$, $\text{area_ls}(B) = \text{len}(B) \times \text{sep}(B)$, и последовательным упорядочиванием по парам индексов: $\text{len}(B)$ и $\text{fr}(B)$, $\text{len}(B)$ и $\text{lift}(B)$, $\text{len}(B)$ и $\text{sep}(B)$.

Кроме того, мы отобрали лучшие n понятий (исключая те из них, содержание которых состоит из одного признака) по каждому из индексов, число n определялось размером соответствующего множества МДО-оптимальных понятий. Данный подход позволяет проанализировать преимущества принципа МДО в отборе по заданным индексам интересности.

В табл. 3 показаны среднее количество понятий, отобранных по выбранным индексам с применением МДО-подхода для пяти наборам данных. Подход на основе МДО позволяет отобрать 1,3%–19,1% понятий (в среднем 6,4%).

Существенным преимуществом данного подхода является отбор понятий с разнообразными и «типичными» (характеризующими набор данных в целом, а не отдельные его объекты) содержаниями. Для демонстрации данного факта для каждого множества МДО-оптимальных понятий мощности n (обозначаемого далее S_{MDL}) мы рассмотрели множество первых n упорядоченных понятий (обозначаемого далее S_{top}) по выбранным индексам и сравнили их содержания.

Табл. 3.

	$ G $	$ M $	Число замкнутых понятий	area len fr	area len lift	area len	len fr	len lift	len sep
breast	699	16	702	32	20	26	37	37	37
ecoli	336	29	690	56	16	25	64	66	64
iris	150	19	183	29	13	14	35	34	35
led7	3 200	24	3808	118	64	98	109	109	108
prima	768	38	2769	106	36	65	121	112	121

Приведем результаты по характеристикам: среднее число понятий, имеющих в этом же множестве более общее понятие (т.е. содержание которых покрывает какое-либо другое содержание) и доля признаков в наборе данных, покрываемых множествами содержаний отобранных понятий. Чем меньше 1-й показатель, тем более разнообразны содержания отобранных понятий, чем больше 2-й показатель, тем более содержательными они являются. Представленные на рис. 1 результаты показывают, что S_{MDL} в среднем позволяет получить на 20% больше разнообразных содержаний (не имеющих более общих в том же множестве), при этом наиболее разнообразными оказываются содержания, отобранные по $area_ls$ (они в среднем на 32% более разнообразнее, чем в S_{top}).

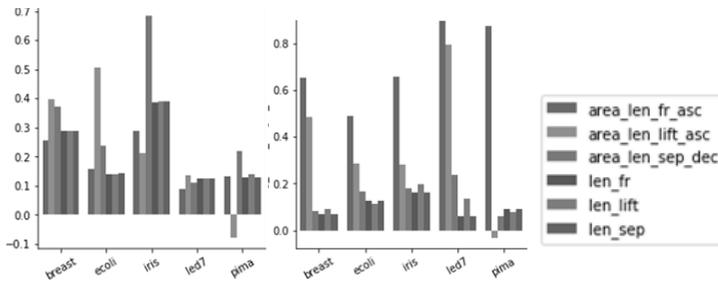


Рис. 1. Средняя разница в числе более общих содержаний понятий между S_{top} и S_{MDL} (слева) и средняя разница в доле покрытых признаков в наборе данных между S_{MDL} и S_{top} (справа). Положительные значения указывают на то, что S_{MDL} демонстрирует лучшие результаты, чем S_{top} . Чем больше значения, тем больше преимущества S_{MDL} .

S_{MDL} покрывают в среднем на 21,5% больше признаков в исходном множестве, при этом наибольшая разница с S_{top} в среднем составляет 71,4% для $area_lf$, что означает следующее: для индекса $area_lf$ с использованием МДО-подхода удастся получить n понятий, содержания которых покрывают в среднем на 71,4% больше признаков в наборе данных, чем содержания лучших n понятий, выбранных по этой же метрике.

Заключение

Предложен метод отбора множеств признаков (содержаний формальных понятий), основанный на принципе минимальной длины описания, позволяющий использовать дополнительные экспертные знания об интересности отбираемых элементов (выраженные посредством индексов оценки множеств признаков). Эксперименты показывают, что подход на основе МДО, не требуя введения дополнительных параметров, позволяет получить небольшой набор множеств признаков, которые являются разнообразными и обладают хорошей описательной способностью.

Список литературы

- [Айвазян и др., 1989] Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / Под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989.
- [Гладун, 1977] Гладун В.П. Эвристический поиск в сложных средах. – Киев: Наукова думка, 1977.
- [Глотов и др., 1984] Глотов В.А., Павельев В.В. Векторная стратификация. – М.: Наука, 1984.
- [Подиновский, 2007] Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. – М.: Физматлит, 2007.
- [Ройзензон, 2005] Ройзензон Г.В. Способы снижения размерности признакового пространства для описания сложных систем в задачах принятия решений // Новости искусственного интеллекта, 2005, № 1.
- [Терехина, 1986] Терехина А.Ю. Анализ данных методами многомерного шкалирования. – М.: Наука, 1986.
- [Aggarwal, et al., 84] Aggarwal C.C., Han J. Frequent pattern mining // Springer. 2014.
- [Baldi et al., 2000] Baldi P., Brunak S., Chauvin Y., Andersen C.A., Nielsen H. Assessing the accuracy of prediction algorithms for classification // Bioinformatics. 2000. No.16 (5).
- [Buzmakov et al., 2015] Buzmakov A., Kuznetsov S.O., Napoli A. Fast generation of best interval patterns for nonmonotonic constraints // Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. 2015.
- [Coenen, 2003] Coenen F. The lucs-kdd discretised/normalised arm and carm data library. – http://www.csc.liv.ac.uk/~frans/KDD/Software/LUCS_KDD_DN.
- [Ganter et al., 1999] Ganter B., Wille R. Formal concept analysis: Logical foundations. 1999.
- [Ganter et al., 2000] Ganter B., Kuznetsov S.O. Formalizing hypotheses with concepts // International Conference on Conceptual Structures. – Springer. 2000.
- [Grünwald, 2007] The minimum description length principle // MIT press. 2007
- [Kuznetsov et al., 2018] Kuznetsov S.O., Makhalova T. On interestingness measures of formal concepts // Information Sciences. 2018. No. 443.
- [Kuznetsov, 2004] Kuznetsov S.O. Machine learning and formal concept analysis // Concept Lattices. – Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 2004.
- [Vreeken et al., 2011] Vreeken J., Van Leeuwen M., Siebes A. Krimp: mining itemsets that compress // Data Mining and Knowledge Discovery. 2011. No. 23 (1).

УДК 004.896:621.865

МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ СЦЕН НА ОСНОВЕ НЕДООПРЕДЕЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ¹

А.Д. Московский (*moscowskyad@gmail.com*)

Национальный исследовательский центр

«Курчатовский институт»

В работе описывается метод распознавания сцен на изображениях, работающий в два этапа. Первый этап при помощи недоопределённых моделей позволяет получить быстро решение о факте присутствия сцены. Второй этап позволяет устранить неопределённость и получить максимально точный и однозначный ответ. Такой подход может быть применим в системах, требующих быстрого распознавания сцен и реагирования на изменение ситуации, в том числе робототехнических.

Ключевые слова: распознавание сцен, недоопределенные модели

Введение

В работе рассматривается задача распознавания сцен, основанная на применении метода недоопределенных моделей. Задачей распознавания стали интересоваться, начиная с середины 60-х годов [Huffman, 1971; Roberts, 1965]. Изначально эта задача понималась как разбиение наблюдаемого кадра на области, разные по содержанию: выделение фона и отдельных объектов. Также в данной задаче можно выделить отдельное направление – распознавание изображения в целом и отнесение его к какому-либо классу, например, по типу наблюдаемой местности (город, лес, сельская местность) или времени года (зимний, весенний пейзаж). Для этого используются методы выделения признаков, а также нейросетевого распознавания [Parizi et al., 2012; Zhou et al., 2014]. Отдельным подходом является идентификация составляющих сцены и выделение отношений между ними. Первым этапом в данном подходе является выделение объектов-составляющих сцены и регистрация отношений между объектами. Далее при помощи разных алгоритмов происходит сравнение наблюдаемой сцены с эталонной. Существует множество подходов к решению задачи сравнения. В качестве

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-11-00018).

примера можно привести «классический» подход исчисления предикатов [Тимофеев, 1988], методы использующие анализ на графах [Johnson et al., 2015; Дуда и др., 1976], методы на основе семантических дескрипторов [Cheng et al., 2018; Kwitt et al., 2012], а также логические подходы [Кучуганов, 2018]. Отдельные аспекты данной задачи появляются, когда речь идет о системах видеонаблюдения установленных на мобильных роботах. Во-первых, мобильные агенты обычно обладают относительно ограниченными вычислительными мощностями. Во-вторых, так как мобильный робот является системой, которая должна быстро адаптировать свои действия под изменения окружающей среды, то требуются методы, позволяющие быстро получить ответ в любой момент времени (так называемое решение «на всякий случай»). Достигнуть этого можно, получив ответ, который не обязан быть максимально точным, но впоследствии может быть уточнен. Одним из механизмов, позволяющим построить систему распознавания таким образом, являются неопределённые модели (далее Н-модели) [Нариньяни и др., 1998].

1. Предлагаемый метод

Входными данными для предлагаемого метода являются набор распознанных объектов O , между которыми всегда можно проверить то или иное отношение R_i , а также описание эталонной сцены. Описание сцены в данном случае задается перечислением объектов и отношений, их связывающих [Карпов, 2011]. От метода требуется выделить из данного набора те объекты, что образуют требуемую эталонную цену. Обобщенная вычислительная Н-модель задается множествами [Нариньяни, 2007]:

$$M = (V, R, W, C), \quad (1)$$

где V – множество параметров из заданной области, W – множество функций присваивания, C – множество функций проверки корректности, R – множество ограничений.

В решаемой задаче множество V образуется уникальными элементами сцены. Каждый элемент сцены представлен N -значением. Каждое N -значение представляет собой набор распознанных объектов данного типа. Соответственно начальное значение каждой такой переменной является набор всех распознанных объектов данного типа.

$$v_a = \{o_1^a, o_2^a, \dots, o_N^a\}, v_a \in V, o_i^a \in O_a. \quad (2)$$

Множество W представляет собой функции проверки отношений между объектами:

$$W_{ab}(v_a^1, v_b) = v_a^2.$$

Функция из W_{ab} соответствует конкурентному отношению между объектами O_a и O_b , W_{ab} изменяет значение N -переменной v_a , удаляя из нее те объекты, у которых не выполняется отношение ни с одним объектом из O_b . Функции из C проверяют, была ли устранена неопределенность в данных переменных, иными словами, уточнилось ли значение до конкретного одного или до нуля объектов. Множество ограничений в данном случае состоит из ограничения, что один и тот же экземпляр объекта не может принадлежать более чем одному N -значению (такое может быть в случае, когда в эталонной сцене есть одинаковые по типу объекты).

Таким образом, на первом шаге вычислений применяется первая функция из W к соответствующим переменным из V . Данная функция изменяет эти переменные, так что применение следующей функции из W затронет изменённые переменные. Применение всех функций из W образует один цикл вычислений. Когда поочередно применены все функции из W , происходит проверка на завершение процедуры, процедура завершается в следующих случаях:

- во-первых, каждая N -переменная представлена одним объектом;
- во-вторых, одна из N -переменных приняла нулевое значение (не осталось ни одного объекта);
- в-третьих, количество изменений в N -переменных за прошедший цикл равно нулю.

Если ни один из этих критериев не выполнен, то иницируется второй цикл и к переменным аналогично применяются все функции из W , до тех пор, пока один из критериев не работает.

В случае если алгоритм завершается по первому критерию, то никаких дальнейших действий не требуется, и сцена распознана полностью. Это положительный результат алгоритма.

Второй случай говорит о том, что текущая сцена отсутствует среди входных данных. Отрицательный результат алгоритма.

Третий же случай соответствует тому, когда неопределённости не удалось избежать предложенным методом, обычно это говорит о случаях, когда во входных данных представлено сразу несколько искомым сцен. Для того чтобы устранить данную неопределённость, первая переменная, представленная более чем одним объектом сокращается до одного объекта (поочередно оставляется один объект из всех). Далее для получившейся конфигурации запускается цикл применения функций W с такими же критериями остановки. Если удалось достигнуть положительного или отрицательного результата, то он выписывается, если же нет, то описанная процедура рекурсивно повторяется для остальных неуточненных переменных, пока не достигнет положительного или отрицательного результата. Данная обработка требуется только в том случае, когда в решаемой задаче требуется

выделить каждую из сцен. В противном случае подтвердить факт наличия/отсутствия данной сцены на текущем кадре можно на предыдущем шаге алгоритма.

Изложенный выше метод проиллюстрирован на рис 1.



Рис. 1. Укрупненная схема метода распознавания

2. Пример работы системы распознавания

Рассмотрим простой пример сцены, которую требуется распознать. Пусть интересующая сцена содержит три объекта R , B и G , каждый из которых должен быть соединен с другими отношением r . Входными данными будет являться картина, представленная на схеме рис. 2.

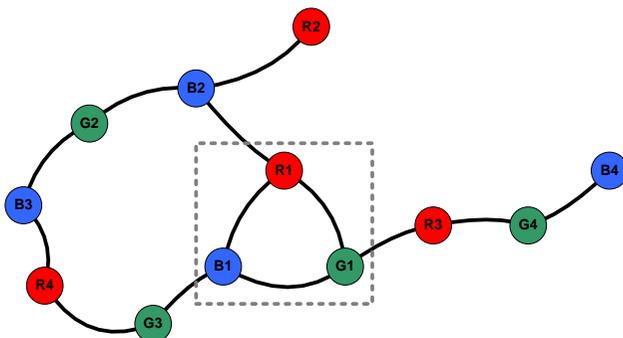


Рис. 2. Объекты и зарегистрированные отношения между ними, пунктиром выделена область, которую требуется распознать

Согласно описанному выше методу создаются три N -переменные по количеству объектов в сцене – R , B и G соответственно, и строится табл. 1 с их значениями, по связующим отношениям.

Табл. 1

Отношение	N -переменная	Значения переменной
r	B	B_1, B_2, B_3, B_4
	R	R_1, R_2, R_3, R_4
r	R	R_1, R_2, R_3, R_4
	G	G_1, G_2, G_3, G_4
r	G	G_1, G_2, G_3, G_4
	B	B_1, B_2, B_3, B_4

Далее запускается предложенная вычислительная модель, применяются функции проверки отношений. В первой строчке таблицы каждый элемент B проверяется на состояние в отношении r с объектами R , если было подтверждено хотя бы одно наличие для объекта B_i , то он сохраняется, в противном случае удаляется из H -переменной. Таким образом, при первом применении из B будет удалено значение B_4 , так как не состоит в отношении ни с одним значением H -переменной R . Далее аналогичным образом проверяются элементы R , где будут удалены значения R_3 (см. табл. 2). Аналогичным образом будут удалены другие значения (жирным указаны удаленные объекты на данном шаге).

Табл. 2

Отношение	H -переменная	Значения переменной, цикл 1	Значения переменной, цикл 2
r	B	$B_1, B_2, B_3, \mathbf{B_4}$	B_1
	R	$R_1, R_2, \mathbf{R_3}, R_4$	$R_1, \mathbf{R_2}$
r	R	$R_1, \mathbf{R_2}, R_4$	R_1
	G	$G_1, \mathbf{G_2}, G_3, \mathbf{G_4}$	$G_1, \mathbf{G_2}$
r	G	G_1, G_3	G_1
	B	$B_1, \mathbf{B_2}, \mathbf{B_3}$	B_1

Как видно из табл. 2, в течение 1-го цикла вычисления не было достигнуто ни одного критерия остановки, и поэтому был инициирован 2-й цикл вычислений, который был остановлен по 1-му критерию на 4-м шаге проверки отношений. В результате определено, что данную сцену образуют только объекты R_1, B_1 и G_1 .

3. Результаты экспериментов

Предложенный метод обеспечивает возможность распознавания сцен на предложенных входных данных. Результаты совпадали с аналитическим решением. Была проведена оценка времени работы метода, включающая: непосредственное решение задачи и устранение неопределённости. Оценка выполнялась для сцен с разным числом объектов и для разных входных данных. Эксперименты показали, что удаление лишних экземпляров из H -значений, незначительно влияет на время в отличие от устранения неопределённости (рис. 3).

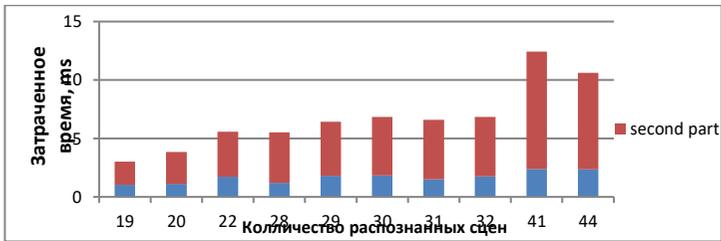


Рис. 3. Зависимость времени на распознавание от количества распознанных сцен для сцены из 3 объектов

Предложенный метод сравнивался по быстродействию с методом распознавания сцен на основе анализа на графах [Московский, 2017]. Эксперименты показали, что у метода на графах преимущество в скорости при распознавании сцен, состоящих из малого количества объектов (до 4-х объектов). На сценах в большом числе объектов N-модели опережают метод на графах (рис. 4 и 5).

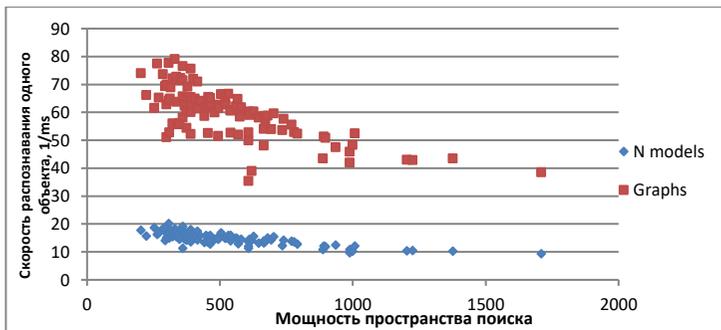


Рис. 4. Сравнительная оценка скорости распознавания сцен для 2 объектов

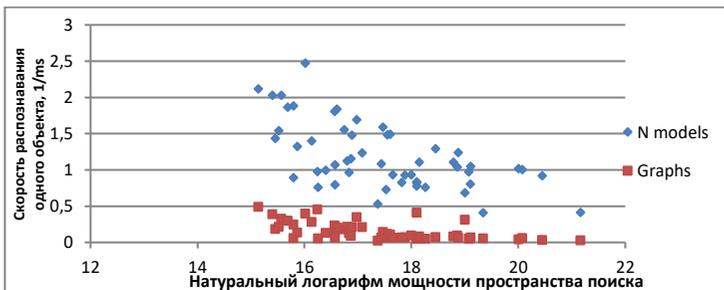


Рис. 5. Сравнительная оценка скорости распознавания сцен для 6 объектов

Для реализации предложенного метода не требуется больших вычислительных мощностей, так, например, он может быть эффективно реализован на основе миникомпьютера Raspberry Pi в составе автономного датчика технического зрения (см. рис. 6).



Рис. 6. Автономный датчик технического зрения, установленный на роботе DrYARP и использующий предложенный метод

Заключение

Разработан и реализован метод распознавания, состоящий из двух этапов. Первый этап на основе N-моделей позволяет быстро получить информацию о наличии сцены на кадре. Второй этап позволяет определить объекты сцены в случае, когда на изображении присутствует более чем одна сцена. Разбиение на два этапа («быстрый» и «медленный») подходит для систем, в которых требуется получить быстрее, но не обязательно абсолютно точное решение. Метод продемонстрировал свою работоспособность и показал более высокую производительность на сценах, состоящих из большего количества объектов, чем известный графовый метод.

Список литературы

- [Дуда и др., 1976] Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976.
- [Карпов, 2011] Карпов В.Э. Об одном механизме реконструкции сцен // VI Международная научно-практическая конференция «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». Сб. науч. трудов. В 2-т., Т.1, – М.: Физматлит, 2011.
- [Кучуганов, 2018] Кучуганов А.В. Интеллектуальная технология поиска объектов на изображениях // Сборник докладов конференции «Искусственный интеллект. Проблемы и пути решения». 2018.
- [Нариньяни и др., 1998] Нариньяни А.С. и др. Программирование в ограничениях и недоопределенные модели // Информационные технологии, 1998, Т. 7.

- [**Нариньяни, 2007**] Нариньяни А.С. Введение в недоопределенность // Информационные технологии, 2007, № 4.
- [**Московский, 2018**] Московский А.Д. Графы как инструмент для решения задачи распознавания сцен // Сборник трудов семинара «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта». 2017.
- [**Тимофеев, 1988**] Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические комплексы. – СПб.: Машиностроение, 1988.
- [**Cheng et al., 2018**] Cheng X. et al. Scene recognition with objectness // Pattern Recognit. 2018. Vol. 74.
- [**Huffman, 1971**] Huffman D. Impossible Objects as Nonsense Sentences // Mach. Intell. 1971. Vol. 6.
- [**Parizi et al., 2012**] Parizi S.N., Oberlin J.G., Felzenszwalb P.F. Reconfigurable models for scene recognition // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. , 2012. С. 2775–2782.
- [**Johnson et al., 2015**] Johnson J. et al. Image retrieval using scene graphs // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015.
- [**Kwitt et al., 2012**] Kwitt R., Vasconcelos N., Rasiwasia N. Scene recognition on the semantic manifold // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2012.
- [**Roberts, 1965**] Roberts L. Machine Perception of Three Dimensional Solids. Cambridge: The MIT Pr., 1965.
- [**Zhou et al., 2014**] Zhou B. et al. Learning Deep Features for Scene Recognition using Places Database // Adv. Neural Inf. Process. Syst. 2014. Vol. 27.

УДК 004.93

ПОСТРОЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ 3D-МОДЕЛЯМИ ЛИЦ ЧЕЛОВЕКА

Нгуен Зуй Тхань (*nguyenduythanh1410@gmail.com*)
Российский университет дружбы народов, Москва

Е.Ф. Морозова (*mef.morozova@yandex.ru*)
Московский технологический университет, Москва

В работе рассматривается задача трехмерной реконструкции лица с помощью стереопары. Модель служит для управления лица человека. Для управления моделью применяются преобразования поворота, масштабирования, проецирования и смещения. Представлены экспериментальные исследования наведения 3D-модели лица на 2D-изображение для распознавания. Оптимальное совмещение изображений выполняется методами градиентного спуска. Эксперименты выполнены с применением 3D/2D моделей лиц человека.

Ключевые слова: распознавание лиц, моделей лиц, изображение, метод, реконструкция, наведение

ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты показывают, что 2D-модели имеют ограниченное применение, поскольку их затруднительно использовать для распознавания лиц при различных ракурсах головы, естественной мимики, наличии гримас и других помех. Поэтому все большее внимание уделяется 3D-моделям, полученным с использованием камер высокого разрешения, позволяющим увеличить точность и полноту распознавания. За последние годы было предложено много новых методов и алгоритмов распознавания лиц. Практически все подходы характеризуются недостаточной точностью при наличии яркостных шумов и цветовых искажений на изображениях и движении объектов на видеопоследовательностях.

Основной подход к решению проблемы состоит из следующих этапов: предварительное преобразование исходного изображения, выделение ключевых характеристик и классификация. Классификация зависит от удачно выбранной системы признаков. Можно указать на наиболее общий подход, основанный на применении 2D-и 3D-инвариантных моментов в сочетании

с эффективными классификаторами. Инвариант – это величина, остающаяся неизменной при тех или иных преобразованиях, например, аффинных или яркостных [Ну, 1962].

Под 3D-изображением понимается кусочно-непрерывная функция $f(x, y, z)$, определенная на компактном носителе $D \subset R \times R \times R$ и имеющая конечный ненулевой интеграл. Примером подобной функции служит функция яркости, известная также как полутоновое изображение. В случае цифрового изображения $f(x, y, z)$ имеет только целочисленные значения при целых (x, y, z) . Цифровое изображение обычно является результатом дискретизации непрерывной функции $f(x, y, z)$ яркости и хранится в компьютере в виде трехмерного массива $I(i, j, k)$, где $i = 0, 1, \dots, N_x - 1$, $j = 0, 1, \dots, N_y - 1$ и $k = 0, 1, \dots, N_z - 1$. Каждый элемент этого массива представляет собой пиксель с интенсивностью, находящейся в диапазоне от 0 до $L - 1$. Величина L обычно является степенью двойки (например, 64, 256) и называется глубиной изображения.

1. Построение 3D-модели лица

Трехмерная реконструкция с применением стереопары сводится к решению следующей задачи:

$$Ax = b, \quad (1.1)$$

$$A = \begin{bmatrix} T_{11}^1 - T_{14}^1 x^{1*} & T_{21}^1 - T_{24}^1 x^{1*} & T_{31}^1 - T_{34}^1 x^{1*} \\ T_{12}^1 - T_{14}^1 y^{1*} & T_{22}^1 - T_{24}^1 y^{1*} & T_{32}^1 - T_{34}^1 y^{1*} \\ T_{11}^2 - T_{14}^2 x^{2*} & T_{21}^2 - T_{24}^2 x^{2*} & T_{31}^2 - T_{34}^2 x^{2*} \\ T_{12}^2 - T_{14}^2 y^{2*} & T_{22}^2 - T_{24}^2 y^{2*} & T_{32}^2 - T_{34}^2 y^{2*} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} T_{44}^1 x^{1*} - T_{41}^1 \\ T_{44}^1 y^{1*} - T_{42}^1 \\ T_{44}^2 x^{2*} - T_{41}^2 \\ T_{44}^2 y^{2*} - T_{42}^2 \end{bmatrix}.$$

Здесь T_{ij}^k – коэффициент математической модели k -й камеры, представленной матрицей 4×4 . Назовем эту матрицу фундаментальной. Для оценки обусловленности матрицы вычисляют число обусловленности. Максимальное и минимальное изменение произведения Ax при изменении можно задать следующими числами:

$$Q = \max_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|}{\|x\|}, \quad q = \min_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|}{\|x\|},$$

где $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$. Число обусловленности матрицы определяется как: $cond(A) = Q/q$. Чем больше $cond(A)$, тем ближе матрица A к вырожден-

ности. Исследование обусловленности является важным звеном при определении устойчивости решения задачи восстановления 3D-информации. В дальнейшем считаем, что матрица A является хорошо обусловленной.

Утверждение 1. Если коэффициенты матрицы A и столбец свободных членов b в уравнении (1.1) изменить на малые величины εA_1 и εb_1 , то и решение задачи реконструкции, полученное с помощью метода наименьших квадратов, изменится на малое значение $\Delta = O(\varepsilon) = \left\| (A_0 + \varepsilon A_1)^T (A_0 + \varepsilon A_1) \right\| - \left\| A_0^T A_0 \right\|$.

Покажем, что если коэффициенты матрицы A и столбец свободных членов b изменить на малые величины, то и решение, полученное с помощью метода наименьших квадратов, изменится незначительно [Нгуен, 2016а]. Для этого введем возмущающую матрицу A_1 , возмущающий вектор b_1 и потребуем, чтобы сингулярные числа (то есть квадратные корни из собственных чисел) матрицы A_1 были ограничены сверху некоторой константой. Помимо системы (1.1) рассмотрим также систему

$$(A_0 + \varepsilon A_1)x_\varepsilon = b_0 + \varepsilon b_1, \quad (1.2)$$

где ε – малый параметр. Ее решение имеет вид:

$$x_\varepsilon = ((A_0^T + \varepsilon A_1^T)(A_0 + \varepsilon A_1))^{-1} (A_0^T + \varepsilon A_1^T)(b_0 + \varepsilon b_1).$$

Рассмотрим выражение:

$$J = (A_0^T + \varepsilon A_1^T)(A_0 + \varepsilon A_1)\Delta,$$

где $\Delta = |x_\varepsilon - x_0|$ – отклонение. Величину J можно привести к виду

$$J = \varepsilon A_1^T (E - A_0 (A_0^T A_0)^{-1} A_0^T) b_0 + \varepsilon A_0^T (b_1 - A_1 (A_0^T A_0)^{-1} A_0^T b_0) + O(\varepsilon^2).$$

где E – единичная матрица.

Матрица $A_0^T A_0$ положительно определена. Значит, при малых значениях ε это свойство сохраняется и для матрицы $(A_0^T + \varepsilon A_1^T)(A_0 + \varepsilon A_1)$, вследствие чего имеем:

$$\Delta = O(\varepsilon) = \left\| (A_0 + \varepsilon A_1)^T (A_0 + \varepsilon A_1) \right\| - \left\| A_0^T A_0 \right\|. \quad (1.3)$$

Таким образом, малые изменения параметров стереокамеры (при условии хорошей обусловленности фундаментальной матрицы) приводят к малым изменениям решения задачи восстановления трехмерных координат изображенного объекта.

Рассмотрим варианты оптимизации задачи трехмерной реконструкции, как это показано в табл. 1.

Табл. 1.

Тип задачи	Решение
Минимизация среднеквадратичного отклонения N от решения уравнений системы (1.1)	$x = (A^T A)^{-1} A^T b$
Минимизация самого большого отклонения	$\begin{cases} a_{x1}x + a_{y1}y + a_{z1}z + b_1 = 0 \\ a_{x2}x + a_{y2}y + a_{z2}z + b_2 = 0 \\ a_{x3}x + a_{y3}y + a_{z3}z + b_3 = 0 \\ a_{x4}x + a_{y4}y + a_{z4}z + b_4 = 0 \end{cases}$
Минимизация среднеквадратичного отклонения N от граней тетраэдра	$\begin{cases} a_{x1}x + a_{y1}y + a_{z1}z + b_1 = \xi \\ a_{x2}x + a_{y2}y + a_{z2}z + b_2 = \xi \\ a_{x3}x + a_{y3}y + a_{z3}z + b_3 = \xi \\ a_{x4}x + a_{y4}y + a_{z4}z + b_4 = \xi \end{cases}$
Минимизация максимального отклонения N от грани тетраэдра	$\delta^2 = \sum_i \frac{(a_{xi}x + a_{yi}y + a_{zi}z + b_i)^2}{a_{xi}^2 + a_{yi}^2 + a_{zi}^2} \rightarrow \min_{x,y,z}$ $\begin{cases} x \sum_i \frac{a_{xi}^2}{\Delta_i^2} + y \sum_i \frac{a_{xi}a_{yi}}{\Delta_i^2} + z \sum_i \frac{a_{xi}a_{zi}}{\Delta_i^2} + \sum_i \frac{a_{xi}b_i}{\Delta_i^2} = 0 \\ x \sum_i \frac{a_{xi}a_{yi}}{\Delta_i^2} + y \sum_i \frac{a_{yi}^2}{\Delta_i^2} + z \sum_i \frac{a_{yi}a_{zi}}{\Delta_i^2} + \sum_i \frac{a_{yi}b_i}{\Delta_i^2} = 0, \\ x \sum_i \frac{a_{xi}a_{zi}}{\Delta_i^2} + y \sum_i \frac{a_{yi}a_{zi}}{\Delta_i^2} + z \sum_i \frac{a_{zi}^2}{\Delta_i^2} + \sum_i \frac{a_{zi}b_i}{\Delta_i^2} = 0 \end{cases}$ <p style="text-align: right;">где</p> $\Delta_i^2 = \Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2 + \Delta_{zi}^2, \quad i \in \{1, 2, 3, 4\}.$
Минимизация среднеквадратичного отклонения одной из координат точки N	$\begin{cases} x \sum_i \frac{a_{xi}^2}{a_{zi}^2} + y \sum_i \frac{a_{xi}a_{yi}}{a_{zi}^2} + z \sum_i \frac{a_{xi}}{a_{zi}} + \sum_i \frac{a_{xi}b_i}{a_{zi}^2} = 0 \\ x \sum_i \frac{a_{xi}a_{yi}}{a_{zi}^2} + y \sum_i \frac{a_{yi}^2}{a_{zi}^2} + z \sum_i \frac{a_{yi}}{a_{zi}} + \sum_i \frac{a_{yi}b_i}{a_{zi}^2} = 0 \\ x \sum_i \frac{a_{xi}}{a_{zi}} + y \sum_i \frac{a_{yi}}{a_{zi}} + 4z + \sum_i \frac{b_i}{a_{zi}} = 0 \end{cases}$

2. Эксперименты с управлением 3D-моделями лиц

Для управления моделью применяются преобразования поворота, масштабирования, проецирования и смещения в однородных координатах:

$$[x_{R_1}, y_{R_1}, 0, 1] = [x, y, z, 1]R_1R_2.$$

Здесь R_1 – обобщенная преобразующая матрица поворотов модели на углы (α, β, γ) , смещения на величины (x_i, y_i, z_i) и масштабирования (S_x, S_y, S_z) . R_2 – матрица проецирования на плоскость $z=0$,

$$R_1 = \begin{bmatrix} AS_x & BS_y & CS_z & 0 \\ DS_x & ES_y & FS_z & 0 \\ GS_x & HS_y & IS_z & 0 \\ x_i & y_i & z_i & 1 \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где:

$$A = \cos(\alpha)\cos(\beta); \quad B = \sin(\alpha)\cos(\beta); \quad C = -\sin(\beta);$$

$$E = \cos(\alpha)\cos(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma);$$

$$D = -\sin(\alpha)\cos(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma);$$

$$F = \cos(\beta)\sin(\gamma); \quad G = \sin(\alpha)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma);$$

$$H = -\cos(\alpha)\sin(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma); \quad I = \cos(\beta)\cos(\gamma).$$

С учетом того, что $S_x = S_y = S_z = S$, после умножения точки $[x, y, z, 1]$ на обобщенную преобразующую матрицу R_1 получим вектор

$$\begin{bmatrix} x_{R_1} & y_{R_1} & z_{R_1} & 1 \end{bmatrix},$$

где:

$$x_{R_1} = (\cos(\alpha)(x \cos(\beta) + \sin(\beta)(y \sin(\gamma) + z \cos(\gamma)) - \sin(\alpha) \times \\ \times (y \cos(\gamma) - z \sin(\gamma)))S + x_i,$$

$$y_{R_1} = (\sin(\alpha)(x \cos(\beta) + \sin(\beta)(y \sin(\gamma) + z \cos(\gamma)) - \cos(\alpha) \times \\ \times (y \cos(\gamma) - z \sin(\gamma)))S + y_i,$$

$$z_{R_1} = (-\sin(\beta)x + \cos(\beta)y \sin(\gamma) + z \cos(\beta) \cos(\gamma))S + z_i.$$

Пусть трехмерное тело задано набором N точек с координатами (x_k, y_k, z_k) , $k=1, \dots, N$, которым приписаны веса f_k , соответствующие, например, яркости. Веса точек влияют на центр масс тела, поэтому их изменение может привести к неординарной форме траектории движения центра масс и изменению ориентации самого тела. В этом смысле очень важно

в самом начале задачи обеспечить правильное задание реперных точек объекта (твердого тела) на его поверхности.

В табл. 2 представлен пример 3D-модели лица человека.

Табл. 2.

Варианты расположения 3D-изображения лица		
		

3. Построение линий положения для 3D-моделей лиц

Пусть линия положения проходит через «центр тяжести» системы точек объекта:

$$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^N f_i x_i}{\sum_{i=1}^N f_i}, \frac{\sum_{i=1}^N f_i y_i}{\sum_{i=1}^N f_i}, \frac{\sum_{i=1}^N f_i z_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \right),$$

где $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ – координаты центра тяжести объекта. Линия положения образует углы α, β, γ с осями координат OX, OY, OZ и ее уравнение можно записать в виде $\frac{x - \bar{x}}{l} = \frac{y - \bar{y}}{m} = \frac{z - \bar{z}}{n}$, где: l, m, n – угловые коэффициенты

прямой в пространстве, которые должны быть определены в результате решения задачи; x, y, z – координаты произвольной точки объекта.

Расстояние от k -й точки объекта до искомой линии вычисляется по формуле

$$d_k^2 = \frac{[(x_k - \bar{x})m - (y_k - \bar{y})l]^2 + [(y_k - \bar{y})n - (z_k - \bar{z})m]^2 + [(z_k - \bar{z})l - (x_k - \bar{x})n]^2}{l^2 + m^2 + n^2}$$

Для удобства записи введем обозначения:

$$A = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 f_i, \quad B = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 f_i, \quad C = \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2 f_i,$$

$$D = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})f_i, \quad E = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z})f_i, \quad F = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z})f_i.$$

Величины A, \dots, F назовем моментами инерции и в дальнейшем будем использовать как постоянные коэффициенты.

Для решения задачи следует найти частные производные функции S по переменным l, m, n и приравнять их нулю. После необходимых преобразований приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} g_1 = (l^2 + m^2 + n^2)((B + C)l - Dm - Cn) - l((B + C)l^2 + (C + A)m^2 + \\ + (A + B)n^2 - 2Dlm - 2Elm - 2Fmn) = 0 \\ g_2 = (l^2 + m^2 + n^2)((C + A)m - Dl - Fn) - m((B + C)l^2 + (C + A)m^2 + \\ + (A + B)n^2 - 2Dlm - 2Elm - 2Fmn) = 0 \\ g_3 = (l^2 + m^2 + n^2)((A + B)n - El - Fm) - n((B + C)l^2 + (C + A)m^2 + \\ + (A + B)n^2 - 2Dlm - 2Elm - 2Fmn) = 0 \end{cases}$$

Примеры построения линий положения показаны на рис. 1.

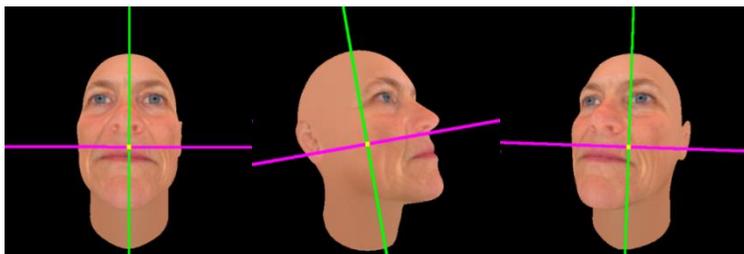


Рис. 1. Примеры построения линий положения

Метод «линий положения» позволяет достаточно точно вычислять относительный разворот двух тел, что может быть важным для решения задачи наведения и выполнения операции сравнения с эталоном в задачах распознавания лиц [Нгуен, 2016b].

4. Применение управления 3D-моделью лица человека в распознавании

В задачах распознавания образов возникает необходимость управления 3D-моделями лиц для получения проекции, наиболее близкой, в смысле некоторого критерия, к заданному изображению. Для корректного сравнения графических образов применены инвариантные моменты. Задача оптимального наведения решается в настоящей работе методом градиентного спуска. Для этого полагаем известными начальные значения углов положе-

ния $(p_1^{[0]}, p_2^{[0]}, p_3^{[0]})$. Значения параметров приближения вычисляются по формуле $p_i^{[k+1]} = p_i^{[k]} + \lambda \Delta p_i^{[k]}$, $\Delta p_i^{[k]} = -W'_{[k]}(P)$, где $W'_{[k]}(P) = \frac{dW^{[k]}(P)}{dp_i}$, k ($k = 0, 1, \dots$) – номер итерации; $\Delta p_i^{[k]}$ – шаг k -й итерации; λ – нормирующий коэффициент [Гендрина, 2008]. Для экспериментов с применением указанного метода были использованы программные среды C++.

Пример сравниваемых моделей лиц человека и результат наведения представлены на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Пример сравнения 3D модели лица и заданного изображения



Рис. 3. Результат совпадения проекции 3D-объекта с 2D-изображением

Проведенные экспериментальные исследования показывают работоспособность рассмотренного метода наведения при произвольных ракурсах съемки лиц. Предполагается, что метод ляжет в дальнейшем в основу программы поиска человека по его фотографическому изображению при условии наличия базы 3D-лиц.

Заключение

В настоящей работе получены оценки устойчивости к флуктуациям 3D-модели объекта, построенной с помощью стереопары при условии хорошей начальной обусловленности фундаментальной матрицы. Даны примеры возможных постановок оптимизационных задач трехмерной реконструкции, отличающихся критерием качества. Приведена технология построения линий положения, которые могут быть использованы для корректного сопоставления графических объектов. В работе задача наведения решается методом градиентного спуска. Разработанные алгоритмы предназначены для распознавания лиц человека.

Список литературы

- [Гендрина, 2008] Гендрина И.Ю., Катаева С.С., Рыжаков А.П. Учебно-методическое пособие. Градиентные и овражные методы безусловной минимизации. – Томск, 2008.
- [Нгуен, 2016a] Нгуен Зуй Тхань, Фомин М.Б., Хачумов В.М. Оценка точности восстановления координат при моделировании трехмерных объектов с использованием стереоизображений // Материалы 19-й Международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016)», 2016, Т. 2.
- [Нгуен, 2016b] Нгуен Зуй Тхань, Хачумов В.М. Модели и методы сопоставления изображений в задаче распознавания лиц // Искусственный интеллект и принятие решений, 2016, № 4.
- [Hu, 1962] Hu M.K. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants // IRE Transactions on Information Theory. 1962. Vol. 8.

УДК 004.855.5:004.853

АЛГОРИТМ УКРУПНЕНИЯ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ДВУМЕРНЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ БИМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ¹

К.В. Сидоров (*bmsidorov@mail.ru*)

Н.Н. Филатова (*nfilatova99@mail.ru*)

Тверской государственный технический университет,
Тверь

В статье рассмотрен подход для решения задачи классификации двумерных графических зависимостей биомедицинских сигналов, иллюстрирующих варьирование эмоционального состояния человека. Описан алгоритм локализации интервальных последовательно укрупненных признаков. Интервалы укрупненных признаков определяются с помощью анализа правил, которые генерируются при обучении классификатора по первичным данным. Программная реализация алгоритма протестирована на речевых сигналах и ЭЭГ.

Ключевые слова: алгоритм, графическая зависимость, обучающая выборка, тестовая выборка, эмоции человека, речевой сигнал, ЭЭГ, СПМ, нечеткие признаки

Введение

В последние два десятилетия большое внимание уделяется вопросам изучения особенностей эмоционального интеллекта и способам использования этих сведений для повышения качества управления техническими системами [Gratch et al., 2005; Marsella et al., 2010; Ильин, 2011; Филатова, 2017]. В рамках данного направления весьма актуален вопрос разработки средств классификации объектов, представленных наборами дискретных признаков. Для успешности решения подобной задачи приходится во многом соблюдать компромисс между количеством признаков и точностью описаний свойств объектов. В ситуациях, когда повышается показатель точности по отображаемым свойствам объектов, также наблюдается и

¹ Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ (проект МК-1898.2018.9).

увеличение числа признаков. Подобное внимание к субъективным особенностям объектов и чрезмерная детализация могут привести к повышению сложности алгоритмов классификации и увеличению ошибки. Эти замечания особенно часто проявляются в случаях, когда разрабатываются нейросетевые классификаторы. Анализ описания объектов можно реализовать с помощью последовательных расширений признаков, но подобные процедуры будут связаны с уточнениями деталей в описаниях объектов. Основной вопрос, возникающий при таком подходе, будет состоять в том, множество каких признаков необходимо будет добавлять. С нашей точки зрения, создание классификации с помощью идеи последовательных формирований по вторичным понятиям, позволяющим реализовывать процедуры укрупнения признаков, будет наиболее простым и действенным решением. В итоге, при подобном подходе, будут генерироваться информативные описания по классам объектов с наиболее общими признаками [Гладун, 2004].

При решении ряда прикладных задач часто оказываются полезными классификаторы, которые работают с выборками двумерных графических зависимостей. Задачи анализа и интерпретации графических зависимостей подробно рассматриваются в работах [Ifeachor et al., 2002; Лоскутов, 2006; Rangayyan, 2015]. Новый подход к решению этой задачи был предложен в работах [Ханеев и др., 2013; Филатова и др., 2014] с помощью разработки нейроподобных иерархических структур (НИС), которые представляют собой дальнейшее развитие идей растущих пирамидальных сетей, адаптированных для работ по нечетким описаниям объектов и дополненных системой нечеткого логического вывода. Исследования особенностей работ данных алгоритмов показали, что созданные правила для классификации с помощью НИС дают возможность локализовать на двумерных графиках интервалы с одинаковым характером изменений. Данные результаты представляют возможность по-новому подойти к решению задачи классификации двумерных графических зависимостей.

1. Объекты классификации

Двумерные графические зависимости, рассматриваемые в качестве объектов классификации, обычно представляются весьма большим количеством точек. При использовании каждой точки графика в качестве признака, размерность вектора описания по объекту может возрасти от нескольких сотен до тысяч признаков. Визуальный анализ эксперта по этим же графикам чаще всего сводится к созданию описания, состоящего из не более 10 качественных признаков, которые будут характеризовать их топологические особенности [Гладун, 2004; Liu et al., 2010]. Подобные факты в

совокупности с существующими индивидуальными особенностями источников биомедицинских сигналов дают возможность выдвижения гипотезы о целесообразности перехода к аппарату нечеткой логики при интерпретации данных графиков.

Принято допущение, что координаты точек графической зависимости по оси абсцисс – список анализируемых признаков. По каждому признаку его значение определяется нечетким множеством $Supp$ (все оценки ординат точек двумерной графической зависимости являются нечеткими). Для фаззификации признаков создаются индивидуальные лингвистические шкалы. Вследствие того, что признаки характеризуют точки одной графической зависимости, то для генерации нечеткой шкалы используется однотипное терм-множество, которое включает 3 термина: “LOW”, “MID”, “HI”. Описанию графика $R = \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_m\}$, где r_i – координаты i -й точки и шаг по оси абсцисс, соответствует множество:

$$RF = \bigcup_{i=1}^m \{(T_1 \setminus \mu_1), (T_2 \setminus \mu_2), (T_3 \setminus \mu_3)\}_i, \quad (1.1)$$

где $\mu_{1, 2, 3}$ – соответствующие значения признаков для термов $T_{1, 2, 3}$.

Вышеприведенная процедура фаззификации (1.1) используется в алгоритме, предназначенном для классификации графиков с помощью НИС [Филатова и др., 2014]. В итоге для n классов обучающей выборки (ОВ) генерируются n классификационных правил, отражающих параметры объектов ОВ по соответствующим разделительным меткам.

Интеграция разработанной НИС и алгоритма нечеткого логического вывода дает возможность находить каждому новому объекту соответствующий класс (с максимальной степенью принадлежности объекта). В результате локализуются участки, у которых будут одинаковые значения нечетких признаков. Это фактически ведет к задаче сегментации двумерных графиков на участки, у которых будут наблюдаться близкие оценки по их структурным свойствам. В работе выдвинута гипотеза о возможности применения процедуры сегментации двумерных графиков для создания нового пространства, базирующегося на укрупненных признаках. Для проверки выдвинутой гипотезы разработан новый алгоритм, который расширяет возможности НИС.

2. Алгоритм укрупнения интервальных признаков

Проанализируем решение задачи по классификации 2-х классов двумерных графиков. Каждому классу дается по набору информативных признаков M_k (K – количество классов, $k = 1, 2, \dots, K$). Для каждого множества M_k определены участки, по которым лингвистические переменные для признаков принимают одинаковые значения. Подобные участки множества M_k – «интервалы постоянства»:

$$\text{для } \forall M_k \left\{ \begin{array}{l} P_i = P_{i+1}, \quad i = \overline{m, z} \\ \text{при } i = z, \quad P_{z+1} \neq P_z \\ \text{интервал } In_{k,m}(\tilde{P}_m, \tilde{P}_{m+1}, \tilde{P}_z) \end{array} \right\}, \quad (2.1)$$

где i – номер признака, \tilde{P}_i – нечеткое значение признака P_i .

На рис. 1 проиллюстрировано описание фрагмента для графика, которое представляет собой конъюнкцию признаков $(107 \wedge 118 \wedge \dots \wedge 258)$.

$P, In_{1,0}$															
$In_{1,0}$													$In_{1,13}$		
Number	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Name	107	118	129	139	150	161	172	183	193	204	215	226	236	247	258
M_1	hi:17	mid:7	hi:16	hi:17											
M_2		mid:7		mid:7	low:8	low:8	low:8								
$In_{2,4}$															
$P, In_{2,4}$															

Рис. 1. Распределение значимых признаков для 2-х классов

Для объектов Class 1 из описания взято множество M_1 (все признаки в конъюнкции принимают значение «HI»). Особенности фаззификации по признакам подробно рассмотрены в работе [Ханеев и др., 2013]. В Class 2 аналогично выделено множество M_2 (все признаки в конъюнкции принимают значение «LOW»). Множества M_1 и M_2 пересекаются: $P = M_1 \cap M_2 = 150, 161, 172, 183, 193, 204, 215, 226$ (т.е. объекты Class 1 имеют высокие значение выделенных признаков, а для объектов Class 2 – характерны малые значения признаков). Отсюда следует, весь выделенный интервал P (2.1) по первичным признакам характеризуется одинаковыми значениями по лингвистическим шкалам. Изменение значений наблюдается только при переходах из одного класса в другой класс. Выделенная закономерность дает возможность анализировать весь указанный интервал признаков P в качестве нового признака P_{4-11} , характеризующего целый фрагмент двумерной графической зависимости.

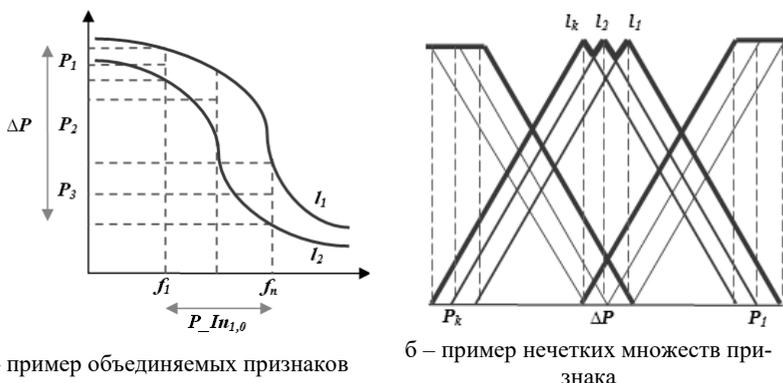
Процедуры по добавлению новых признаков имеют следующую последовательность операций. На выделенных интервалах признаков ($\forall k$) $In_{k,m}$ находятся пересечения анализируемых классов: (1) фрагмент описания для Class 1: $In_{1,0} = \bigcup_{i=0}^1 P_i$; $C_1 = \bigcup_i^M P_i$; (2) фрагмент для Class 2: $In_{2,4} = \bigcup_{k=4}^1 P_k$; $C_2 = \bigcup_k^T P_k$, где M, T – число признаков, определяющих Class 1 и Class 2, соответственно ($(\forall i) \{P_i \in In_{1,0} \mid P_i = \text{HI}\}, (\forall k) \{P_k \in In_{2,4} \mid P_k = \text{LOW}\}$).

Вводится новый признак (P_{4-11}) общий для $In_{1,0}$ и $In_{2,4}$. Для всего интервала генерируются соответствующие подинтервалы по каждому из классов

$P_In_{1,0} \subseteq In_{1,0}$, $P_In_{2,4} \subseteq In_{2,4}$, $P_In_{1,0}$ и $P_In_{2,4}$, которые включают одни и те же признаки, но не одинаковые значения. Для использования подинтервала $P_In_{1,0}$ как самостоятельный признак нужно применить объединение по нечетким множествам.

Продemonстрируем подобное объединение на подинтервале $P_In_{1,0}(f_1, f_n)$, который описан по одноименным термам и может быть использован в качестве значения для нового признака P_{4-11} (рис. 2, а). Значением P_{4-11} для объекта l_1 будет множество точек на интервале $(P_3 \leq P_2 \leq P_1) :: \Delta P$. Интервал ΔP будет рассматриваться как $Supp(P)$, т.е. в качестве носителя для нечеткого множества P . Середина интервала ΔP соответствует вершине \bar{P} .

Рассмотрение участка (f_1, f_n) для всех объектов ОВ предоставляет конечное количество нечетких множеств $l_1, l_2, l_k = L$ (рис. 2, б). Объединив все нечеткие множества, на выходе получается новое множество, которое будет определять значение нового признака: $P_{4-11} = l_1 \cup l_2 \cup \dots \cup l_k$.



а – пример объединяемых признаков

б – пример нечетких множеств признака

Рис. 2. Характеристики признакового пространства

Основанием P_{4-11} является интервал $[\min(P), \max(P)]$. Использование этой процедуры позволяет создать по новому признаку всю лингвистическую шкалу: $NI\{P_{4-11}\} = NI(l_1) \cup NI(l_2) \cup \dots \cup NI(l_k)$. В итоге, можно изменить описания классов ($m = M \setminus P_{4-11}$, $m = T \setminus P_{4-11}$):

- 1) $C_1 = \bigcup_{i=0}^m \tilde{P}_i \cup (\tilde{P}_{4-11})$, $\tilde{P}_{4-11} = P_Im_{1,0}$;
- 2) $C_2 = \bigcup_{k=0}^l \tilde{P}_k \cup (\tilde{P}_{4-11})$, $\tilde{P}_{4-11} = P_In_{2,4}$.

Из устаревших признаковых пространств убираются подинтервалы $P_In_{1,0}$, $P_In_{2,4}$ и добавляется новый признак P_{4-11} (рис. 3).

Number	0	1	2	3	4 (P_{4-11})	5	6
Name	107	118	129	139	150-226	236	247-258
Class 1	hi:17	hi:17	hi:17	hi:17	hi:17	mid:17	hi:17
Class 2	mid:7		mid:7		low:8		

Рис. 3. Пример распределения признаков после процедуры обучения на НИС

При описании Class 1 (C_1) и Class 2 (C_2) участвуют значения признаков: (а) $\tilde{C}_1 = (C_1 \setminus P_{-Im_{1,0}}) \cup \tilde{P}_{4-11}$, $\tilde{C}_2 = (C_2 \setminus P_{-Im_{2,4}}) \cup \tilde{P}_{4-11}$; (б) значение удаляемого признака равно значению новых признаков. При не выполнении условия (б), т.е. $\cup \tilde{P}_i \neq \tilde{P}_{4-11}$, корректируется граница подинтервала (изменяется число признаков, вошедших в P_{4-11}).

3. Тестирование алгоритма

Тестирование алгоритма осуществлено на примере задачи классификации речевых сигналов и ЭЭГ, отображающих варьирование валентности эмоций человека. Экспериментальная выборка сигналов включает объекты (образцы речи и ЭЭГ), иллюстрирующие изменение валентности эмоций у испытуемых при аудиовизуальной стимуляции. Методика проведения подобных экспериментов подробно описана в работах [Filatova et al., 2015; Filatova et al., 2016; Филатова, 2017]. В формировании выборки приняли участие 11 мужчин и 5 женщин в возрасте от 18 до 60 лет. Образцы речи (240 контрольных русских фраз «А голос мой звучит примерно так»), продолжительностью до 7 секунд, сохранены в файлах формата *.wav с частотой дискретизации 22050 Гц и разрешением 16 бит. Образцы ЭЭГ (240 19-канальных безартефактных паттернов), продолжительностью по 12 секунд, сохранены в файлах формата *.ASCII с частотой дискретизации 250 Гц.

В табл. 1 приведены составы обучающих выборок (ОВ) и тестовых выборок (ТВ) (Class 1 – отрицательные эмоции; Class 2 – нейтральное состояние; Class 3 – положительные эмоции).

Табл. 1.

Выборки		Классы объектов		
		Class 1	Class 2	Class 3
Речевые сигналы	ОВ (110)	50	29	31
	ТВ (130)	47	34	49
ЭЭГ	ОВ (90)	30	30	30
	ТВ (150)	50	50	50

В качестве разделяющих признаков применены отсчеты спектральной плотности мощности (СПМ), рассчитанные по методу Уэлча с использова-

нием оконного быстрого преобразования Фурье (БПФ) [Хансеев и др., 2013]. Каждый объект описывается вектором вида $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_i\}$, где x_i – ордината спектра мощности на частоте $f_i = \Delta f \cdot i$; x_i – значение i -го признака; Δf – шаг по частоте; $\Delta f = f_x / Fw$; f_x – частота дискретизации; Fw – ширина окна БПФ. Использовано окно преобразования Хемминга (ширина 1024 для образцов речи, ширина 128 – для ЭЭГ). Границы частотного диапазона для речи составляют 0-11 кГц, для ЭЭГ – 0-125 Гц.

Описание для объекта из выборки (см. табл. 1) представляется в виде:

$$X(z)_{PC} = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}, \quad (3.1)$$

$$X(s)_{ЭЭГ} = \langle \{x_1, x_2, \dots, x_r\}_1, \{x_1, x_2, \dots, x_r\}_2, \dots, \{x_1, x_2, \dots, x_r\}_l \rangle, \quad (3.2)$$

где $X(z)_{PC}$, $X(s)_{ЭЭГ}$ – векторы признаков СПМ; z – номер объекта речевого сигнала; s – номер объекта ЭЭГ; $z, s = 1, 2, \dots, 240$; l – номер отведения ЭЭГ; $l = 1, 2, \dots, 19$; k – номер признака СПМ для речевого сигнала; $k = 1, 2, \dots, 1000$ (шаг расчета СПМ равен 11 Гц); r – номер признака СПМ для ЭЭГ; $r = 1, 2, \dots, 40$ (шаг расчета СПМ равен 3 Гц).

Исследование СПМ сигналов с помощью НИС показало возможности локализации интервалов с наиболее информативными признаками, позволяющими обеспечивать хорошие уровни обобщения и уточнения описаний объектов в приведенных классах. Для речевых сигналов наиболее информативными признаками СПМ являются характеристики диапазона 1100-5500 Гц [Филатова, 2017]. Для образцов ЭЭГ подобные признаки получаются из 9 отведений правого полушария (О2-А2, Р4-А2, С4-А2, F4-А2, Fp2-А2, Т6-А2, Т4-А2, F8-А2, Cz-А2) [Филатова, 2017]. Таким образом, каждый объект речевого сигнала вида $X(z)_{PC}$ (3.1) описывается 400 признаками, а объект вида $X(s)_{ЭЭГ}$ (3.2) – 360 признаками.

На рис. 4 показаны фрагменты признакового пространства СПМ (3.1) и (3.2) для объектов экспериментальной выборки (рис. 4, а – частотный диапазон 2200-3850 Гц, рис. 4, б – частотный диапазон 0-120 Гц).

С помощью НИС созданы правила, описывающие объекты речи и ЭЭГ (см. табл. 1), их применение к ОБ и ТВ иллюстрирует табл. 2.

Проанализированы результаты по классификациям образцов речевых сигналов и паттернов ЭЭГ при применении 2-х режимов обучения НИС (режим 1 – без укрупнения признаков; режим 2 – с укрупненными признаками (табл. 2)). Переход от режима 1 к режиму 2 иллюстрирует 2 тенденции: (1) уменьшение общего числа признаков (минимум на 30–35 %), которые обеспечивают хорошие уровни обобщения и уточнения описаний объектов в рассматриваемых классах; (2) увеличение точности классификации.

- [Филатова и др., 2017] Филатова Н.Н., Сидоров К.В. Компьютерные модели эмоций: построение и методы исследования. – Тверь: ТвГТУ, 2017.
- [Хансеев и др., 2013] Хансеев Д.М., Филатова Н.Н. Применение нейрореподобных сетевых структур для генерации гипотез правил классификации // Нечеткие системы и мягкие вычисления, 2013, Т. 8, № 1.
- [Filatova et al., 2015] Filatova N.N., Sidorov K.V., and Iliasov L.V. Automated System for Analyzing and Interpreting Nonverbal Information // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. No. 24.
- [Filatova et al., 2016] Filatova N.N., Sidorov K.V., Terekhin S.A., and Vinogradov G. The System for the Study of the Dynamics of Human Emotional Response Using Fuzzy Trends // Proc. 1st International Scientific Conference on Intelligent Information Technologies for Industry, Rostov-on-Don. – Sochi, Russia. 2016.
- [Gratch et al., 2005] Gratch J. and Marsella S. Evaluating a Computational Model of Emotion // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2005. Vol. 11. No. 1.
- [Ifeachor et al., 2002] Ifeachor E.C., Jervis B.W. Digital Signal Processing: A Practical Approach: 2nd edition. NJ, USA: Pearson Education. 2002.
- [Liu et al., 2010] Liu Y., Sourina O., and Nguyen M.K. Real-time EEG-based Human Emotion Recognition and Visualization // Proc. 2010 International Conference on Cyberworlds, Singapore. 2010.
- [Marsella et al., 2010] Marsella S., Gratch J., and Petta P. Computational Models of Emotion. In: K.R. Scherer, T. Banziger, E. Roesch (Eds.). A Blueprint for Affective Computing: A sourcebook and manual (Series in Affective Science). Oxford, UK: Oxford University Press. 2010.
- [Rangayyan, 2015] Rangayyan R.M. Biomedical Signal Analysis: 2nd edition. NY, USA: Wiley-IEEE Press. 2015.

СЕКЦИЯ 7 | **КОГНИТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И
ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

УДК 004.855.5:004.853

**СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ
МЫСЛИТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТЬЮ ПУТЕМ
ЭМОЦИОГЕННОЙ СТИМУЛЯЦИИ¹**

Н.И. Бодрина (*vavilovani@mail.ru*)
Е.В. Куксина (*kuksina-1994@mail.ru*)
К.В. Сидоров (*bmisidorov@mail.ru*)
Н.Н. Филатова (*nfilatova99@mail.ru*)
П.Д. Шемаев (*pshemaev@rambler.ru*)

Тверской государственный технический университет,
Тверь

Стратегия эмоциогенной стимуляции познавательной активности пользователя компьютерных систем (проектирования, диагностики, обучения) основывается на двух допущениях: во-первых, слабые эмоциогенные стимулы способствуют усилению когнитивных процессов (повышению результативности при выполнении задач оценки и выбора альтернатив); во-вторых, когнитивный процесс, связанный с восприятием эмоционально значимой информации, предшествует формированию эмоциональной реакции.

Ключевые слова: распознавание эмоций, когнитивная активность, эмоциогенная стимуляция, речевой сигнал, ЭЭГ, ЭМГ, аттрактор

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-01-00742).

Введение

Необходимость создания средств, формализующих взаимосвязь между эмоциогенными факторами (внешними или внутренними), эмоциональным состоянием испытуемого и прогрессией его когнитивной активности, связана с потребностями общества как в новых эффективных средствах обучения, так и в средствах поддержки психофизиологического состояния людей преклонного возраста. В связи с быстрым увеличением доли пожилых в обществе все большую актуальность приобретает проблема когнитивных нарушений и повышение риска развития деменции. В настоящее время активно высказывается идея, что если возраст является неконтролируемым фактором снижения когнитивного резерва [Stern, 2002; Слободин и др., 2012], то образование и регулярная физическая и интеллектуальная активности являются управляемыми факторами его повышения. Учитывая, что интеллектуальная активность выступает важным показателем функционального состояния головного мозга и является одним из условий торможения нарастания негативных возрастных изменений [Sole-Padullés et al., 2009], обществу необходимы средства, как объективной оценки когнитивной активности, так и средства управления ею без использования медикаментозных воздействий.

1. Существующие предпосылки решения задачи мониторинга и управления мыслительной активностью

Обширные исследования электрической активности мозга испытуемого при выполнении им вычислительных или инсайтных заданий пока не позволяют создание модели, формализующей (отображающей) когнитивную деятельность, связанную с использованием абстрактных понятий. Разнообразие индивидуальных реакций, отображающих последовательность повышения активности в различных участках мозга, снижает оценки воспроизводимости при установлении общих закономерностей обработки даже одинаковых видов когнитивных заданий. Однако ряд фактов получил подтверждение на достаточно длительном интервале исследований. В частности, установлено:

- усиление мощности дельта- и тета-ритмов в сигналах ЭЭГ при выполнении когнитивных заданий или восприятии эмоциогенных стимулов. Усиление дельта-ритма связывают с процессами категоризации и принятия решения, а тета-синхронизацию – с процессами внимания и обнаружения сигнала [Başar et al., 2000], т.е. с процессами, сопровождающими практически любую познавательную (когнитивную) деятельность;

- имеются публикации (требующие дополнительной проверки) о том, что позитивные эмоции вызывают усиление высокочастотного гамма-ритма, который связан с концентрацией внимания [Başar et al., 2013];
- в исследованиях когнитивных процессов выделяют понятие когнитивной активности, которую связывают с возникновением чувства удовлетворения от получения информации, как явление «инсайта» [Poppel, 1997] при решении проблемы, сопровождающегося положительными эмоциями, чувством удовлетворенности от самого процесса и его результата.

Практически в настоящее время сформировался вывод, что так как синхронизация в различных областях мозга является показателем процессов обработки информации, то для повышения мыслительной активности следует осуществлять направленную стимуляцию мозга (или отдельных его участков). В зависимости от видов стимуляции можно выделить несколько направлений исследования:

- использование медикаментозного воздействия на организм человека разрабатывается для людей с патологиями;
- использование прямой стимуляции слабыми электрическими сигналами отдельных участков поверхности скальпа;
- использование косвенной стимуляции мозга различными видами внешних стимулов, для восприятия которых используются сенсорные системы испытуемого. Этот вариант, представляющийся наиболее безопасным, положен в основу наших исследований.

Одним из возможных путей достижения этой цели является создание нового класса биотехнических систем (БТС), решающих два типа взаимосвязанных задач: мониторинга когнитивной активности пользователя автоматизированных систем (проектирования, диагностики, обучения) и управления его когнитивной активностью путем эмоциогенной стимуляции. В работе описаны результаты проверки возможности реализации этой схемы.

2. Биотехническая система для исследования мыслительной активности

Определенный вид когнитивных процессов должен присутствовать в любой эмоциональной реакции (ЭР), процесс формирования которой связан с постепенным накоплением информации (формированием опыта), т.е. фактически порожден механизмом «маркировки» событий по итогам простейшей классификации (хорошо/плохо).

Когнитивные процессы мы можем объективно регистрировать в динамике только с помощью ЭЭГ-сигналов. Но если параллельно с когнитивными наблюдается ЭР или эти процессы протекают последовательно, локализовать

эти эффекты в ЭЭГ будет весьма затруднительно. Для дифференциации динамики ЭР от когнитивной активности необходима многоканальная схема мониторинга биоэлектрических сигналов. Причем для каждого процесса целесообразно иметь, по меньшей мере, один канал для наблюдения.

При чисто эмоциогенной стимуляции, когда надо регистрировать слабые изменения эмоционального состояния испытуемого на стимулы разной модальности, для регистрации ЭР стараются выбирать наименее инерционные каналы (ЭЭГ-сигналы, речь).

Поэтому в разработанной ранее БТС «EEG/Speech» [Filatova et al., 2016] для регистрации ЭР (рабочий канал) использовалась речь испытуемого, а ЭЭГ-сигналы рассматривались в качестве контрольной информации для объективного подтверждения изменения состояния испытуемого. В силу методики эксперимента когнитивные процессы в этих записях проявляются слабо. При стимуляции когнитивными стимулами (поток заданий) в паттернах ЭЭГ основным компонентом влияния становится когнитивные процессы, хотя у испытуемого могут возникать эмоции, но в силу особенностей разработанной нами методики влияние ЭР сведено к минимуму. Тогда энцефалограф-анализатор можно рассматривать в качестве рабочего канала для регистрации и мониторинга когнитивной активности человека.

Сформулированные выше допущения реализованы в автоматизированной системе БТС «EEG/Speech/EMG», осуществляющей мониторинг когнитивной активности путем регистрации электрической активности мозга испытуемого в процессе восприятия видео информации, а также мониторинг эмоционального состояния испытуемого путем регистрации мышечных потенциалов от лицевых мышц.

Техническое обеспечение системы «EEG/Speech/EMG» включает электроэнцефалограф ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03» и компьютерный нейромиограф «Нейро-МВП-4». Датчики для регистрации ЭЭГ-сигналов закреплялись на голове испытуемого в соответствии с международной системой отведений «10–20». Частота дискретизации ЭЭГ-сигналов – 250 Гц. Регистрация электромиограмм (ЭМГ-сигналов) производилась с левой стороны лица испытуемого, для которой характерна более ярко выраженная мимическая реакция [Dimberg et al., 2000]. Положение электродов было выбрано исходя из целей эксперимента и связано с работой двух мышечных групп: “*corrugator supercilii*” и “*zygomaticus major*”. Движение вниз мышцы, сморщивающей бровь (“*corrugator supercilii*”), обычно ассоциируют с проявлением злости, грусти, отвращения, страха (негативные эмоции). Большая скуловая мышца (“*zygomaticus major*”) оттягивает угол рта при улыбке, сопровождающей позитивные эмоции. Частота дискретизации ЭМГ-сигналов составила 1000 Гц. Для фильтрации ЭМГ-сигнала применялся полотно-пропускающий фильтр с параметрами $f_n = 20$ Гц и $f_v = 500$ Гц.

Выбор нижней границы (f_n) обусловлен низкочастотными помехами (движение глаз, дыхание и т.д.).

3. Характеристики сигналов для мониторинга когнитивной и эмоциональной активностей

Задачи принятия решений могут существенно различаться в зависимости от используемой информации и, соответственно, при их решении будут активизироваться различные области головного мозга. При формировании блоков заданий мы использовали задания из теста КОТ (краткий ориентировочный тест В.Н. Бузина, Э.Ф. Вандерлика) [Бендюков и др., 2006], а также вычислительные тесты и так называемые инсайтные задачи.

Продолжительность эксперимента не превышала 100 мин. Испытуемым предлагалось решить задания, сгруппированные в отдельные блоки. На протяжении эксперимента регистрировались все ответы (в том числе и неверные). В последнем случае испытуемому предоставлялось n попыток исправить решение; если испытуемый отказывался от последующих попыток, система осуществляла переход к следующему заданию.

Основными параметрами экспериментов являются интервалы времени:

$$T = \{\tau_1 + \tau_3 + \tau_2\}, \quad (3.1)$$

где τ_1 , τ_2 – продолжительность предъявления когнитивных тестов и эмоциональных (τ_3) стимулов.

В процессе мониторинга фиксировалась длительность выполнения отдельных заданий (t_j , t_s):

$$\tau_1 = \bigcup_{j=1}^n t_j, \quad \tau_3 = \bigcup_{r=1}^m t_r, \quad \tau_2 = \bigcup_{s=1}^k t_s, \quad \tau_3 < \tau_1, \tau_2, n \leq k. \quad (3.2)$$

Как следует из (3.1) и (3.2), после выполнения n заданий завершается первый этап работы с тестами (τ_1) и оператор переводит систему в режим предъявления эмоциональных стимулов (обычно $\tau_3 < 20$ минут), затем выполняется второй этап работы с тестами (τ_2).

Результаты экспериментов с однородными по сложности заданиями вычислительного типа и при $n = k$ иллюстрирует график на рис. 1.

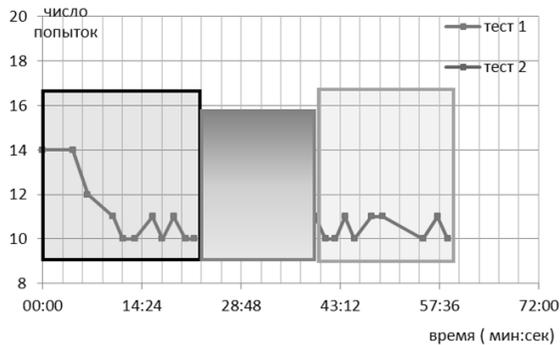


Рис. 1. Влияние эмоциогенной стимуляции на время выполнения вычислительных тестов (тест 1 – до стимуляции, тест 2 – после стимуляции)

Из приведенной диаграммы видно, что после эмоциогенной стимуляции (средний участок) интервал времени на выполнении тестовых заданий, а также число попыток в решении отдельных заданий сократилось. Эти результаты свидетельствуют о повышении когнитивной активности испытуемого на втором этапе работы с тестами (τ_2).

Для выбора коррелятов когнитивной активности испытуемого с характеристиками ЭЭГ-сигналов проведены исследования фрагментов ЭЭГ, выделенных на участках перед маркерами «ответ». Использовались методы нелинейной динамики и спектрального анализа. В первом случае реализованы процедуры реконструкции аттрактора по каждому фрагменту ЭЭГ и последующей их оценке. Для описания свойств аттракторов использованы дискретные признаки, отражающие изменение характера траекторий аттрактора [Филатова и др., 2015; Филатова и др., 2017]. Выполнены расчеты спектров мощности и определены оценки индексов мощности.

Значимых изменений этих характеристик при рассмотрении последовательности фрагментов ЭЭГ на интервалах τ_1 и τ_2 не выявлено.

Для выбранных фрагментов было проведено вейвлет-разложение в системе MATLAB с использованием пакета вейвлет-анализа «MATLAB Wavelet Toolbox». Функции этого пакета вейвлет-анализа позволяют проводить корректную обработку граничных значений при действии фильтров путем симметричного продолжения сигнала. Нами использован ортогональный вейвлет Мейера “dmey”, который имеет самый широкий частотный спектр среди ортогональных вейвлетов с компактным носителем. Он дает хорошее разложение сигнала на слагаемые, соответствующие определенным полосам частот.

При первом уровне разложения вейвлет Мейера будет выделять частоты приблизительно равные 165,85 Гц, при 2-м уровне разложения – 82,93 Гц,

при 3-м уровня разложения – 41,46 Гц. В коэффициентах детализации 4-го уровня разложения – 20,73 Гц, для 5-го уровня разложения – 10,37 Гц, для 6-го – 5,18 Гц и для 7-го уровня – 2,59 Гц.

Проведенные расчеты показали, что частотные спектры компонент сигналов достаточно хорошо локализованы и полученные компоненты представляют основные диапазоны ЭЭГ: дельта-ритм (0-4 Гц), тета-ритм (4-8 Гц), альфа-ритм (8-16 Гц), бета-ритм (16-31 Гц). Часть сигнала, спектр которого содержит частоты выше 30 Гц, обычно называется гамма-диапазоном. В полученном разложении гамма-диапазон полностью представлен в следующих пределах: от 28 до 50 Гц, от 57 до 75 Гц и от 75 до 250 Гц.

Вейвлет-разложения проведены для 12 фрагментов сигнала ЭЭГ (по три фрагмента длительностью 4 секунды для каждой группы заданий), (рис. 2). Амплитуда гамма-ритма в группе заданий на вычисление и при переходе от вычислительных заданий к инсайтным задачам выше, чем в других группах заданий.

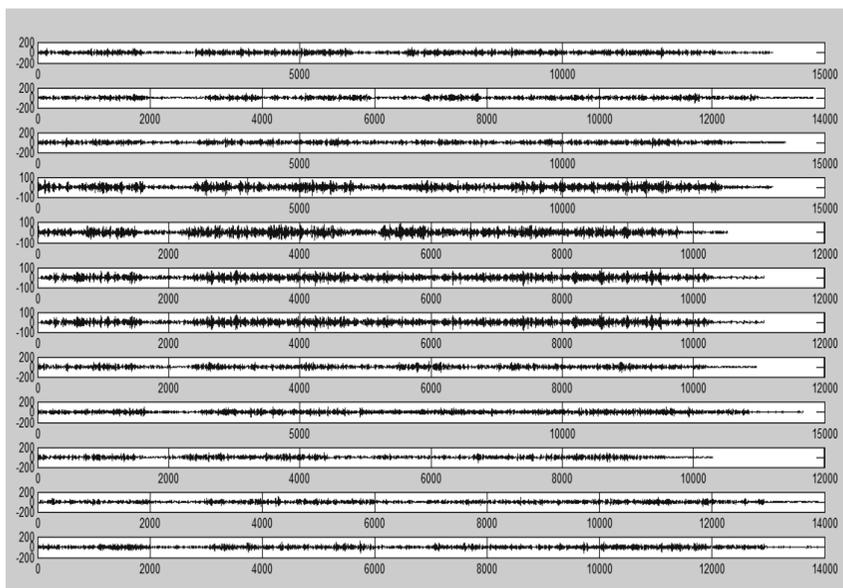


Рис. 2. Графики компонент исходного сигнала (абсцисса – t , мсек; ордината – U , мкВ)

Для мониторинга ЭР испытуемого использовался анализ амплитудного спектра сигналов ЭМГ (fEMG).

Основной всплеск интенсивности fEMG сигнала наблюдается на промежутке от 20 до 200 Гц. Исследования показали, что в точке, расположенной над бровью, интенсивность fEMG, соответствующего отрицательному стимулу, существенно выше, разница достигает 90 % на промежутке от 20 до 100 Гц.

Обратная ситуация наблюдается в области большой скуловой мышцы. Здесь преобладает положительный стимул, при этом разница в 90 % сохраняется практически на всём рассматриваемом интервале от 20 до 200 Гц. Анализ динамики ЭР иллюстрирует графики на рис. 3. После стимуляции положительными видео стимулами эмоциональное состояние не сохраняется, и усредненная амплитуда fEMG через 5 сек после включения фона возвращается к «нейтральному состоянию».

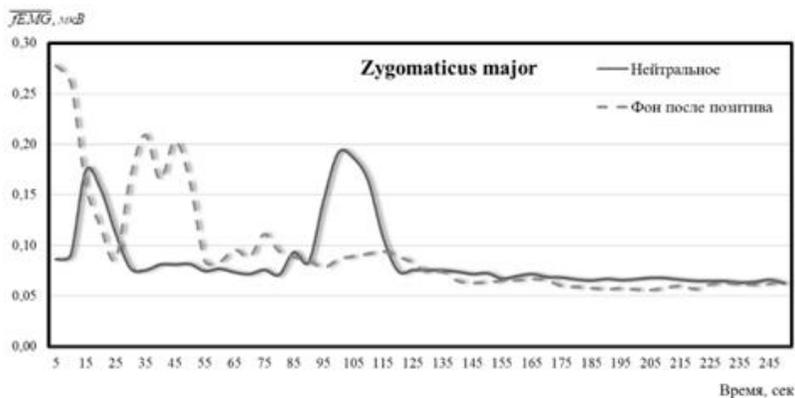


Рис. 3. Динамика изменения эмоционального состояния испытуемого после завершения позитивного стимула

Заключение

Полученные результаты можно рассматривать как экспериментальные доказательства возможности реализации схемы эмоциогенной стимуляции познавательной активности пользователя компьютерных систем. Последующие эксперименты позволят сформировать алгоритмы автоматической коррекции испытуемых.

Список литературы

- [Бендюков и др., 2006] Бендюков М.А., Соломин И.Л. Ступени карьеры: азбука профориентации. – СПб.: Речь, 2006.
- [Слободин и др., 2012] Слободин Т.Н., Горева А.В. Когнитивный резерв: причины снижения и защитные механизмы // Международный неврологический журнал, 2012, № 3.
- [Филатова и др., 2015] Филатова Н.Н., Сидоров К.В. Модель оценки некоторых характеристик эмоций на основе анализа образцов речи или ЭЭГ-сигналов // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции. М.: Физматлит, 2015, Т. 2.
- [Филатова и др., 2017] Филатова Н.Н., Сидоров К.В. Компьютерные модели эмоций: построение и методы исследования. – Тверь: ТвГТУ, 2017.
- [Başar et al., 2000] Başar E, Başar-Eroğlu C, Karakaş S, Schürmann M. Brain oscillations in perception and memory // International Journal of Psychophysiology. 2000. Vol. 35. No. 2–3.
- [Başar et al., 2013] Başar E, Güntekin B. Review of delta, theta, alpha, beta, and gamma response oscillations in neuropsychiatric disorders // Supplements to Clinical Neurophysiology. 2013. Vol. 62.
- [Dimberg et al., 2000] Dimberg U, Petterson M. Facial reactions to happy and angry facial expressions: Evidence for right hemisphere dominance // Psychophysiology. 2000. Vol. 37. No. 5.
- [Filatova et al., 2016] Filatova N.N., Sidorov K.V., Terekhin S.A., and Vinogradov G. The system for the study of the dynamics of human emotional response using fuzzy trends // Proc. 1st International Scientific Conference on Intelligent Information Technologies for Industry, Rostov-on-Don – Sochi, Russia. 2016.
- [Pappel, 1997] Pappel E. The brain's way to create «Nowness» // Time, Temporality, Now: Experiencing Time and Concepts of Time in an Interdisciplinary Perspective. H. Atmanspacher, E. Ruhnau, eds. Berlin, etc.: Springer. 1997.
- [Sole-Padulles et al., 2009] Sole-Padulles C., Bartres-Faz D., Junque C., Vendrell P., Rami L., Clemente I.C., Bosch B., Villar A., Bargallo N., Jurado M.A., Barrios M., Molinuevo J.L. Brain structure and function related to cognitive reserve variables in normal aging, mild cognitive impairment and Alzheimer's disease // Neurobiology of Aging. 2009. Vol. 30. No. 7.
- [Stern, 2002] Stern Y. What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept // Journal of the International Neuropsychological Society. 2002. Vol. 8. No. 3.

УДК 159.91

МЕХАНИЗМ ВНУТРЕННЕЙ ДЕТЕРМИНАЦИИ ПОВЕДЕНИЯ В СИСТЕМНОЙ ПСИХОФИЗИОЛОГИИ¹

А.К. Крылов (*neuru@mail.ru*)
Институт психологии РАН, Москва

Проведена формализация парадигмы реактивности, в которой детерминантами поведения считаются внешние события. Парадигма активности рассмотрена на уровне нейронной активности как способа получения метаболитов нейроном. Рассматриваются и моделируются возможные механизмы внутренней детерминации поведения на основе парадигмы активности и принципов системной психофизиологии.

Ключевые слова: активность, психофизиология, детерминация

Введение

Представление об организме как целенаправленном, движимым мотивациями и целями, связано с необходимостью признания внутренней детерминации активности мозга [Александров и др., 2005]. Однако в психофизиологии наиболее распространенной является представление о рефлекторной организации нейронной активности, а в моделировании работы мозга, соответственно, представления о нейронах как обработчиках электрических сигналов по принципу преобразователя «вход-выход» [Уоссермен, 1992], т.е. признается только наличие внешних детерминант. Такая уровневая эклектика означает несоответствие этих взглядов. Для решения этой проблемы в настоящей работе предлагается подход к моделированию внутренней детерминации в работе мозга.

1. Парадигма реактивности

В древности и в средние века действия индивида объяснялись движениями его души, которая считалась непознаваемой объективными методами. В XVII веке вследствие развития механики появилась механистическая метафора работы мозга – Декарт предположил наличие сходства между функ-

¹ Работа выполнена по государственному заданию ФАНО России №0159-2017-0009.

ционированием фонтана (движение воды по трубам) и нервной системы человека (движение «животных духов» по нервам). В дальнейшем на основе этих общепhilософских материалистических представлений И.П. Павловым была развита теория рефлекса. В ней представления Декарта были выражены постулатом о детерминации внешним стимулом последующего поведения, называемого «реакцией». Мы считаем [Крылов, 2012], что **сущность теории рефлекса** можно выразить следующей формулировкой: **индивид, в своем действии и состоянии, объективно отражает предшествующий внешний сигнал**. Под «внешним сигналом» здесь понимается воспринимаемая организмом часть внешней среды. Это утверждение представимо формулой:

$$Y(t + \tau) = f(S(t)), \tau > 0, \quad (1.1)$$

где $S(t)$ – внешний сигнал воспринимаемый индивидом; $Y(t)$ – действие индивида в момент t ; f – некоторая функция. Эта формула описывает причинно-следственную связь – причиной является внешний сигнал (S), следствием является действие индивида (Y): если S , то Y . Суть модельного представления причинно-следственной связи заключается в том, что причинная переменная S определяет вероятностное распределение зависимой переменной Y . Эта формула соответствует базовому понятию в математике – функции (функциональному преобразованию).

Несмотря на широкое принятие теории рефлекса, она подвергалась и подвергается серьезной критике, и эта критика обуславливала необходимость постоянных модификаций теории [Александров и др., 2005]. Декартовский рефлекс учитывал лишь одну детерминанту – подействовавший внешний сигнал, затем, в качестве дополнительных, второстепенных детерминант поведения стали рассматриваться также состояние индивида, его опыт. Однако, в соответствии с теорией рефлекса, внутреннее состояние и опыт индивида детерминируются подействовавшим внешним сигналом, поэтому:

$$Y(t + \tau) = f(S(t), Q(t)) = f^*(S(t), S(t-1), S(t-2), \dots), \tau > 0. \quad (1.2)$$

Здесь внутреннее состояние обозначено Q . Внутреннее состояние отражает предшествующие внешние сигналы и их историю, поэтому и состояние, и поведение в парадигме реактивности детерминируются последовательностью внешних воздействий [Кругликов, 1982].

Итак, применение концепции «рефлекс» к какому-либо явлению означает, что его причины ищутся в **прошлом** и **вовне** данного явления, т.е. что оно порождается, вызывается другим внешним явлением, имевшим место в прошлом.

В рамках этой парадигмы реактивности усматривают сходство между очередной новинкой технического прогресса и живым организмом. Рассматривались аналогии между мозгом и гидравлической машиной, затем, в начале XX века, телефонным коммутатором, а в середине XX века пришла новая метафора, полагающая мозг аналогом компьютера. Ролью нейрона, как и мозга в целом, в соответствии с «вычислительной метафорой», оказалось перекодирование входного сигнала в выходной (обзор развития представлений о мозге см. в [Крылов, 2012]).

В 1943 году МакКаллок и Питтс создали модель нейрона, в которой провели аналогию между работой нейрона и логического элемента (вычислителя). Несмотря на предупреждение авторов, аналогия была принята многими последователями как реальное описание работы нейрона. На основе этих идей развивается направление искусственных нейронных сетей (Neural Networks) [Уоссермен, 1992]. Модельный нейрон суммирует приходящие к нему сигналы, применяет к сумме функциональное преобразование и с задержкой один такт выдает на выход результат вычисления – как раз в соответствии с нашей формализацией парадигмы реактивности (1.1). В 1952 году Хожкин и Хаксли создали модель проведения нервного импульса по аксону с помощью уравнений, аппроксимирующих ионные токи. Эта модель, однако, была затем распространена на всю клетку, и весь нейрон оказался проводником электрического тока, интегратором и проводником входящих сигналов. Хотя реакция нейрона зависит от его внутреннего состояния, но само внутреннее состояние определяется предшествующими входными сигналами (1.2), поэтому такие представления остаются в рамках парадигмы реактивности.

Эта парадигма реактивности позволяет любые математические операции, состоящие из последовательности функциональных преобразований над матрицами, рассматривать как последовательность работы слоев мозга [Уоссермен, 1992]. Успешность прикладной математики в решении практических задач на основе такой аналогии между нейроном и калькулятором, поддерживает эту аналогию и способствует развитию математических методов нейротехнологии как раздела прикладной математики [Уоссермен, 1992].

2. Парадигма активности на уровне нейрона

Парадигма реактивности применительно к работе мозга подвергается критике в психологии и психофизиологии и в качестве альтернативы рассматривается парадигма активности, основанная на представлениях о целенаправленности [Александров, 2008; Крылов и др., 2008; Крылов, 2012]. Эта парадигма рассматривает активность клетки или целого организма как способ достижения цели – нового соотношения со средой. На уровне

нейрона спайковая активность является способом получения необходимых метаболитов от соседних клеток [Александров, 2008; Крылов, 2017а].

Активация нейрона приводит не только к генерации спайков и движению токов по аксону. Активация нейрона приводит к активации соседних глиальных клеток, которые получают метаболиты (глюкозу) из кровотока и снабжают метаболитами (лактат и пр.) активный нейрон [Magistretti, 2009]. При активации нейрона происходит усиление его дыхания (потребления кислорода для генерации энергии в митохондриях в цикле Кребса), т.е. происходит не только усиление затрат энергии на спайковую активность, но и усиление энергопродукции [Загускин, 2010]. Есть биохимические основания считать, что активность нейрона приводит к усилению притока метаболитов к нему и после завершения активности позволяет оказаться в фазе энергетической «сверхкомпенсации», получить метаболический бонус за свою активность, который можно расходовать на затратный биосинтез [Загускин, 2010; Крылов, 2017а]. В фазе «отдых после активности» генерация энергии усилена по сравнению с фазой покоя, а поскольку уже нет затрат на энергообеспечение активности нейрона, получается избыточная энергия, которую клетка использует на восстановление, репарацию, биосинтез (синтез белков необходимый при «обучении» нейрона) [Кондрашова, 1968; Загускин, 2010].

Пресинаптический выброс глутамата не только активировать постсинаптический нейрон, как предполагается в модели МакКаллока–Питтса и в классической модели нейрона в нейроинформатике [Уоссермен, 1992]. Глутамат вытекает из синаптической щели и активировать ближайшие глиальные клетки, которые, потребляя этот глутамат, выделяют метаболиты – глутамин, лактат, АТФ и интермедиаты цикла Кребса, которые потребляются синапсами и нейроном [Magistretti, 2009]. При этом глиальные клетки в этой микрообласти расширяют капилляр и усиливают кровоток в эту область и так усиливают приток метаболитов [Shetty, 2012]. Поэтому приходящие к нейрону «возбуждения» активировать локальный кровоток и приводят к получению «возбуждающимся» нейроном метаболитов [Thompson, 2003].

Поэтому «возбуждение» нейрона и даже само медиаторное воздействие на нейрон способствуют притоку метаболитов к нему. Образуется избыточная энергия (АТФ) и интермедиаты, которые расходуются путем усиления биосинтеза на репаративные процессы в клетке или обучение (которое требует формирования новых белков).

Понятно, что весь мозг не может одновременно усилить приток метаболитов всем нейронам, необходима некоторая последовательность и организация. Такая организация обеспечивается путем поведенческой специализации нейронов при обучении [Швырков, 1995; Александров и др. 2015] – нейрон становится активным только при решении определенной поведенческой задачи, своей активностью обеспечивает совершение определенного

поведенческого акта (относительно которого нейрон специализировался). Так, усиленный приток метаболитов получают именно те нейроны, которые работают в данной задаче, обеспечивая совершение текущего поведенческого акта [Thompson, 2003]. Именно совершаемым поведенческим актом определяется, какие нейроны получают дополнительные метаболиты во время и после своей активности.

В парадигме активности активация нейрона рассмотрена как первопричина. Нейронная активность при этом сама привязана к поведенческим актам [Швырков, 1995; Александров и др., 1997, 2015]. Поэтому можно предполагать, что законы формирования нейрональных связей при обучении новым поведенческим актам [Александров и др., 1997, 2015] подчинены принципам оптимизации энергетики клеток и организма с учетом принципа сверхкомпенсации затрат успешно работающих клеток [Крылов, 2017a].

3. Сложное поведение в однородной среде

Если организм в своем поведении отражает внешние стимулы, как это предполагает теория рефлекса, то поведение в однородной константной среде, являясь функцией от константы, не может быть сложным. Однако поисковое поведение в однородной среде имеет фрактальную структуру последовательных действий, и пары последовательных действий обнаруживают автокорреляции (следующее действие с большей вероятностью совпадает с предыдущим [Maue et al, 2007]). Фрактальная структура поведения не может быть получена простым преобразованием входного однородного сигнала (константы) по (1.1), как это предполагает парадигма реактивности. Поэтому фрактальная структура поведения в однородной среде не поддается объяснению в рефлекторной теории [Непомнящих, 2012; Крылов, 2017б]. Например, в поисковом поведении в однородной среде статистика длительностей движения в одном направлении имеет степенной характер, такой же, как у фракталов, т.е. не является случайным. Рефлекторный агент, совершающий действия (рефлексы) с фиксированными вероятностями не может генерировать такую статистику поведения. Предполагается, что наличие сложности в поведении в однородной (константной, бесстимульной) среде доказывает наличие внутренней причинности [Непомнящих, 2012; Крылов, 2017б].

4. Моделирование внутренней детерминации

Наличие внутренних детерминант, как сказано выше, не предполагается в парадигме реактивности и основанной на ней теории рефлекса, но постулируется в парадигме активности и основанной на ней системной психофизиологии. Системная психофизиология предполагает, что поведение орга-

низма и активность нейронов имеют внутреннюю причину своей целенаправленности и активности [Александров, 2008; Крылов, 2012]. Выше был описан возможный нейрофизиологический механизм внутренней детерминации активности нейронов как действия для получения метаболитов. Теперь рассмотрим возможный механизм внутренней причинности на уровне психических процессов.

Системная психофизиология показывает, что опыт формируется как системная структура: при освоении нового навыка в процессе поведенческих проб постепенно формируется и затем фиксируется новый элемент структуры опыта в виде наслоения на имеющуюся структуру [Александров и др., 1997, 2015]. Элемент опыта фиксирует новый способ взаимодействия индивида с предметной областью и представляет собой анатомическим распределенную совокупность нейронов. Любому элементу опыта можно сопоставить степень его актуализации в данный момент $A(t)$. Физиологически актуализация элемента опыта реализуется активностью нейронов, образующих этот элемент опыта [Швырков, 1995] и степень актуализации отражается в величине спайковой активности этих нейронов в данном акте. Поэтому актуализация элемента опыта является одновременно психологическим и физиологическим явлением, которое может быть зарегистрировано объективным методом – регистрацией активности нейронов [Швырков, 1995]. Поэтому моделирование в терминах актуализации элементов опыта решает психофизиологическую проблему, а не порождает ее, как при построении моделей в непсихофизиологических терминах.

Актуализация элемента опыта $A(t)$ вариативна в последовательных реализациях. Исходя из парадигмы активности, считаем, что актуализация элемента опыта имеет внутреннюю причину:

$$A(t+1) = f(A(t), S(t)).$$

Если теперь рассмотреть простые эксперименты, в которых можно разделить ситуации на «успешные» и «неуспешную», то в каждой из них получается редуцированная формула детерминации с более очевидной внутренней детерминацией актуализации:

$$A(t+1) = f_1(A(t)), \text{ если «успех»};$$

$$A(t+1) = f_0(A(t)), \text{ если «неуспех»}.$$

Вероятность совершения данного действия принимаем равной степени актуализации $A(t)$ этого элемента опыта:

$$P\{\text{действие}(t+1) = i\} = A_i(t).$$

4.1. Модель формирования нового элемента опыта

Ранее нами построена модель формирования нового элемента опыта при освоении нового навыка отражающая статистику кривых научения в эксперименте по обучению животных [Крылов, 2015]. В этом эксперименте правильное действие животного всегда подкреплялось, поэтому правильное действие всегда успешно, а вместо неудач лишь пауза. Возможность неуспеха осваиваемого действия отсутствует, поэтому актуализация этого формируемого элемента опыта только растет:

$$A(t+1) = A(t) + 0,15(1 - A(t)), \text{ если «успех»}; \quad A(t+1) = A(t), \text{ если «пауза»}. \quad (4.1)$$

Когда $A(t)$ достигает порога 0,9 считалось, что элемент фиксируется и обучение завершено. Оказалось, что кривые обучения и их статистика совпадают в модели и у животных, т.е. эта модель достаточно хорошо описывает динамику обучения навыку [Крылов, 2015].

4.2. Модель сложного поведения в однородной среде

В отличие от обучения дефинитивному поведению, поисковое поведение имеет принципиальное отличие – в процессе поиска все действия, кроме последнего, не приводят к достижению успеха. В стандартных задачах на поисковое поведение в однородной среде, когда агент (или животное) не может знать, совершая очередное действие, приближается ли к цели, «неуспешность» действий при поиске является нормой, и все действия кроме самого последнего не подкрепляются. При поиске в однородной среде «успешно» действие или «неуспешно» с точки зрения животного можно оценить так: если животное продолжает движение в избранном направлении, то считает это действие успешным; а если меняет направление, то считает неуспешным. С позиций системной психофизиологии происходит либо продолжение актуализации элемента опыта (реализуемого рассматриваемое действие) и продолжение этого действия, либо деактуализация и прекращение этого действия. Но поскольку никаких событий во внешней среде не происходит в поисковой задаче в однородной среде, признание действие успешным в данной пробе, и продолжение этого действия пропорционально $A(t)$. Тогда изменение актуализации этого элемента опыта зависит только от самой степени актуализации [Крылов, 20176]:

$$A(t+1) = A(t) + k(0,9 - A(t)), \text{ если «успех»}. \quad (4.2)$$

Если же происходит деактуализация текущего активного элемента опыта, то в модели величина актуализации сбрасывается к начальному значению A_0 . Величина A_0 отражает количество N альтернативных действий в данной ситуации и может быть равна $1/N$ с тем, чтобы все возможные поисковые действия оказались снова равновероятны:

$$A(t+1) = A_0, \text{ если «неуспех»}.$$

Длительность цепочки однотипных действий определяется длительностью актуализации элемента опыта и статистика интервалов длительностей действий порождается закономерностями актуализации элементов системной структуры опыта. Статистика длительностей цепочек одинаковых действий в этой модели имеет степенной вид и соответствует экспериментальным данным [Крылов, 2017б]. Это значит, что системная структура опыта, в отличие от набора рефлексов, может быть причиной сложного (фрактального) поведения в однородной среде.

Другая модель, математически сходная с нашей, позволила объяснить наличие автокорреляций в поведении [Непомнящих и др., 2011]. В ней используется динамика «мотивации», сходная с (4.2). Заметим, что «мотивация» психофизиологически выражается именно актуализацией соответствующего элемента опыта, что физиологически отражается в форме текущей активности нейронов этого элемента опыта, поэтому наша модель представлена сразу в системных психофизиологических терминах актуализации элементов опыта без использования понятия «мотивация».

Заключение

Представляется, что сложное поведение в константной среде показывает, что элементы опыта являются активными (системами) подобно организму (надсистеме) и, находясь в системных отношениях друг с другом, каждый элемент «сам решает» продолжать ли активацию.

Принятие решений мозгом – не вероятностный выбор из набора альтернативных рефлексов, а процесс актуализации элементов опыта, величина актуализации которых определяет действие. Поскольку элемент опыта можно сопоставить с «правилом», это означает, что у животных и человека правило «само решает» когда ему применяться и продолжать ли применение, при этом находясь в логических отношениях с другими правилами. В мозге нет гомункулуса, который бы решал, какое правило активировать.

Список литературы

- [Александров, 2008] Александров Ю.И. Активный нейрон // Нейрон: обработка сигналов, пластичность, моделирование: фундаментальное руководство. Тюмень, 2008.
- [Александров и др., 1997] Александров Ю.И., Греченко Т.Н., Гаврилов В.В., Горкин А.Г., Шевченко Д.Г., Гринченко Ю.В., Александров И.О., Максимова Н.Е., Безденежных Б.Н., Бодунов М.В. Закономерности формирования и реализации индивидуального опыта // Ж. высш. нервн. деят., 1997, Т. 47, № 2.
- [Александров и др., 2005] Александров Ю.И., Крылов А.К. Системная методология в психофизиологии: от нейронов до сознания // Идея системности в современной психологии / Под ред. В.А. Барabanщикова. – М.: ИП РАН, 2005.

- [Александров и др., 2015] Александров Ю.И., Горкин А.Г., Созинов А.А., Сварник О.Е., Кузина Е.А., Гаврилов В.В. Консолидация и реконсолидация памяти: психофизиологический анализ // Вопросы психологии, 2015, № 3.
- [Загускин, 2010] Загускин С.Л. Ритмы клетки и здоровье человека. Ростов-на-Дону, Изд-во ЮФУ, 2010.
- [Кондрашова, 1968] Кондрашова М.Н. Биохимический цикл возбуждения // Митохондрии. – М.: Наука, 1968.
- [Кругликов, 1982] Кругликов Р.И. Детерминизм, активность, рефлекс // Методологические проблемы физиологии высшей нервной деятельности. М.: Наука, 1982.
- [Крылов и др., 2008] Крылов А.К., Александров Ю.И. Парадигма активности: от методологии эксперимента к системному описанию сознания и культуры // Компьютеры, мозг, познание: успехи когнитивных наук. – М.: Наука, 2008.
- [Крылов, 2012] Крылов А.К. Поведение и активность нейронов: целенаправленность или реакция // Когнитивные исследования. Сборник научных трудов. Вып.5. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2012.
- [Крылов, 2015] Крылов А.К. Моделирование динамики научения при формировании и реорганизации навыка // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2015. Труды IV Всероссийской конференции. – Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2015.
- [Крылов, 2017а] Крылов А.К. Активность нейрона как способ получения метаболитов // XIX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2017»: Сб. науч. тр., Ч.1. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
- [Крылов, 2017б] Крылов А.К. Актуализация опыта как возможная причина фрактальной структуры поискового поведения // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2017. Труды V Всероссийской конференции. – Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2017.
- [Непомнящих и др., 2011] Непомнящих В.А., Редько В.Г. Метод формирования поискового поведения // Искусственный интеллект и принятие решений, 2011, № 1.
- [Непомнящих, 2012] Непомнящих В.А. Изменчивость поведения беспозвоночных и проблема свободы воли // Журнал общей биологии, 2012, Т. 73, № 6.
- [Уоссермен, 1992] Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. – М.: Мир, 1992.
- [Швырков, 1995] Швырков В.Б. Введение в объективную психологию. Нейрональные основы психики. – М.: Институт психологии РАН, 1995.
- [Maye et al, 2007] Maye A., Hsieh C-h., Sugihara G., Brembs B. Order in Spontaneous Behavior // PLoS ONE. 2007. 2(5).
- [Magistretti, 2009] Magistretti P.J. Role of glutamate in neuron-glia metabolic coupling // Am. J. Clin. Nutr. 2009. Vol.90.
- [Shetty, 2012] Shetty P.K., Galeffi F., Turner D.A. Cellular links between neuronal activity and energy homeostasis // Front Pharmacol. 2012. Vol. 3.
- [Thompson, 2003] Thompson J.K., Peterson M.R., Freeman R.D. Single-neuron activity and tissue oxygenation in the cerebral cortex // Science. 2003. Vol. 299.

УДК 159.95:004.81

ОСОБЕННОСТИ ПРИОБРЕТЕНИЯ ЗНАНИЙ В РАЗНЫХ КАРТИНАХ МИРА¹

Ю.М. Кузнецова (*kuzjum@yandex.ru*)

Институт системного анализа

Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление» РАН, Москва

Работа посвящена психологическим механизмам функционирования разных типов картины мира субъекта в контексте разработки знаковой модели сознания. Обсуждается специфика приобретения знаний в рациональной, житейской и мифологической картинах мира.

Ключевые слова: знаковая модель сознания, картина мира, приобретение знаний

Введение

В данной работе словосочетание «приобретение знаний» используется не терминологически, как, например, в [Гаврилова и др., 2000], а для общего обозначения процессов расширения представлений субъекта в ходе присвоения нового для него знания. В таком значении приобретение знаний предстает как одна из базовых характеристик психического отражения, опосредующего внешнюю и внутреннюю деятельность субъекта: «То, что в предметном мире выступает для субъекта как мотивы, цели и условия его деятельности, должно быть им так или иначе воспринято, представлено, понято, удержано и воспроизведено в его памяти; это же относится к процессам его деятельности и к самому себе – к его состояниям, свойствам, особенностям» [Леонтьев, 1975]. Очевидным образом моделирование сознания предполагает разработку проблемы организации процессов привнесения новой информации и ее систематизации в рамках уже существующих у субъекта знаний.

В знаковой модели сознания развивается представление о качественной специфике элементов и связей, формирующих три составляющих сознания, взятого в его структурном аспекте, то есть картины мира субъекта [Леон-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-29-07051).

тьев А.Н., 1975]; показана возможность описания картины мира как системы семантических сетей, образованных образами, сценариями и смыслами, и очерчена специфика протекающих в этих сетях когнитивной функции обобщения и когнитивно-поведенческого процесса планирования [Осипов и др., 2017]; рассматривался вопрос о формировании реакции на недостоверную информацию [Кузнецова, 2016]. Настоящая работа отражает попытку анализа психологических механизмов, ответственных за те различия в функции усвоения нового для субъекта знания, которые определяются качественными особенностями составляющих знаковую картину мира сетей.

1. Типы картины мира в знаковой модели сознания

Психологический смысл представления о трех типах семантических сетей заключается в выделении в составе целостной картины мира субъекта ее структурных составляющих, элементами которых выступают: образы – для рациональной разновидности картины мира, сценарии – для житейской и смыслы – для мифологической. Функционирующие взаимосвязанно, три разновидности субъективной картины мира в структурном плане могут рассматриваться как самостоятельные образования, характеризующиеся спецификой не только составляющих их элементов, но и связей между ними. Соответственно, процесс приобретения нового знания в разных типах картины мира протекает по-разному и в качестве результата дает различные ментальные структуры.

Зависимость процесса и результата систематизации знания от характера образующих его компонентов представляется очевидной. Так, Э. Дюркгейм писал: «невозможно предположить, чтобы содержание представлений не оказывало воздействия на способы их комбинаций. Правда, психологи говорят иногда о законах ассоциации идей так, как если бы они были одинаковыми для всех видов индивидуальных представлений. Но нет ничего менее правдоподобного: образы сочетаются между собой не так, как ощущения, а понятия — не так, как образы ... каждой категории психических состояний присущи свои особые законы» [Дюркгейм, 1995].

На сегодняшний день в психологии представлены различные концепции, в которых описана качественная специфика знания, связанная со способами обработки информации (классификация способов обобщения Л.С. Выготского, теория типов ментальных схем Ж. Пиаже, исследования особенностей организации экспертного знания и др.). Однако нельзя сказать, что эти идеи востребованы когнитивными науками. Скорее, преобладает отмеченный Э. Дюркгеймом подход, подразумевающий универсальность процедур «упаковки» субъективного знания, вследствие чего получаемые модели оказываются настолько «негибкими» и не соответствующими эмпирической реальности, что это оценивается как серьезная проблема: «Гибкости нет ни в ста-

тических иерархиях понятий, ни в пространственных моделях, ни в репрезентациях, предполагающих существование прототипов. То же самое можно сказать о репрезентациях, выявляемых с помощью латентного семантического анализа» [Величковский, 2006]. В качестве выхода из концептуального тупика предлагается учет внешней по отношению семантике активности, например, исследование влияния, оказываемого на познание целей и мотивов деятельности, образующих ситуативные смысловые контексты, и ответственных за межкатегориальную организацию знаний. Б.М. Величковский демонстрирует объяснительную продуктивность межкатегориальных переходов на примере вписывания понятия «дерево» в разные контексты сравнения: «Так, сравнение дерева с брусьями и другими пиломатериалами ... выявляет один из множества возможных срезов семантики этого понятия (дерево – материал). Сравнение с человеком – совсем другой (дерево – метафора бесчувственности)» (там же).

В разрабатываемой знаковой модели сознания [Осипов и др., 2017] различие между ментальными образованиями предлагается рассматривать в связи с их вхождением в разные типы картины мира. С этой точки зрения характеристики эмпирического обобщения *дерево* в рамках номенклатуры строительных пиломатериалов (житейская картина мира) иные, чем характеристики образного обозначения *дерево* в системе метафор (мифологическая картина мира) и отличаются от характеристик научного понятия *дерево* в системе биологических знаний (рациональная картина мира). Поясним эти различия на другом примере. Представление о *поваренной соли* в рациональной картине мира будет определяться кругом понятий о химической формуле вещества и его положением в систематике неорганических веществ, об участии в метаболизме живых организмов, характеристиках растворения и кристаллизации в различных условиях и т.д. В житейской картине мира знание о *поваренной соли* в типичном случае будет соотноситься с комплексом представлений о сценариях ее приобретения, хранения и использования в кулинарных целях или в рецептах домашней медицины. Наконец, в мифологической картине мира *поваренной соли* атрибутируются определенные, часто вредоносные, магические свойства, что отражается в различных повериях, связанных с рассыпанной солью, в мистическом страхе употребления («соль – белый яд») и т.п.

2. Новое знание в разных типах картины мира

2.1. Рациональная картина мира

Привнесение новой информации в рациональную картину мира субъекта, как и в ее внеличную культурную форму – систему научного знания, – в идеале регулируется принципами познаваемости, достоверности, теоретичности и системности. Основным элементом и средством построения научной

картины мира выступает научное понятие – словесно обозначенное обобщение существенных признаков познаваемого предмета. В отношении понятий могут совершаться такие действия, как проведение мысленных экспериментов, сопоставление, различные преобразования с целью совершенствования и развития самих понятий и их систем, а также получения новых выводных знаний [Швырев, 1984]. Качество рациональности обеспечивается утверждением существования универсальных доступных разуму причинных связей, признанием за формальным доказательством роли главного средства познания, наличием отработанного механизма для получения новых знаний [Садохин, 2006].

При вписывании в рациональную картину мира нового знания происходит установление с уже имеющимися знаниями таких связей, которые должны адекватно выразить как логику предметной области, так и логику надпредметных универсальных закономерностей понятийного мышления. Если новые сведения не могут сами по себе обеспечить непротиворечивость формируемых с их участием обновленных представлений, в рациональной картине мира инициируется активный поиск необходимой для исправления ситуации информации и перестройка структуры знаний.

По-видимому, в различных исследовательских и прикладных практиках, включая когнитивные науки, именно способ приобретения знаний, характерный для рациональной картины мира, принимается за естественный и универсальный. Например, при разработке экспертных систем постулируется принципиальная понятийность и иерархичность структуры сознания человека и ценность таких показателей, как непротиворечивость, полнота, системность и объективность описания предметной области, получаемого в результате деятельности инженера по знаниям; при этом указывается, что «в памяти эксперта все понятия увязаны и закономерности установлены», хотя часто самим экспертом они не рефлексируются, поэтому задача инженера по знаниям заключается в выявлении каркаса умозаключений эксперта, соответствующего принципам научного мышления [Гаврилова и др., 2000]. Между тем, как будет показано, закономерности рационального познания могут быть распространены далеко не на все виды когнитивной деятельности человека.

2.2. Житейская картина мира

Житейская картина мира может быть описана как совокупность сценарных представлений, призванных обеспечить адаптивное поведение в социально освоенных ситуациях и маркированных с точки зрения приемлемости/непримемлости со стороны референтной для носителя группы. Говоря о житейском сознании, практически все исследователи отмечают такие его черты, как нерациональный характер, игнорирование законов логики, отказ от использования научной информации, терпимость к противоречиям [Улыбина, 2001].

Наиболее изученной является внеличностная языковая форма существования житейской картины мира, фиксирующая культуроспецифичную концептосферу, в которой отражаются результаты предметно-практической деятельности на уровне больших культурных общностей – этносов и других социальных групп, время существования которых имеет исторический масштаб [Попова и др., 2002].

Исследования житейской картины мира выявляют ее принципиальную неполноту. Это качество находит свое отражение, в частности, в отсутствии в ней обозначений для объектов, не обладающих потенциалом сценарности. Например, в русской наивной анатомической картине мира имеются слова для обозначения упоминаемых в сценариях-пословицах *руки, ладони, пальца, локтя* или *плеча*; для таких же частей верхней конечности, как *гороховидная* или *ладьевидная кости* пальцев или *лучевая кость*, имеющих терминологические обозначения в научной анатомической картине мира, обозначения в житейской номенклатуре отсутствуют, поскольку сценариев для них нет.

На материале половиц также можно видеть и локальную избыточность житейских знаний. Те фрагменты реальности, которые отражаются в житейской картине мира, могут быть вписаны в разные мотивационные контексты, поэтому на одну и ту же ситуацию часто приходится более одного правильного с житейской точки зрения сценария, например: «Работа не волк – в лес не убежит» / «Без дела жить – только небо коптить», «Семь раз отмерь, один отрежь» / «Дума – что борода, лишняя тягота» и т.п. Нечувствительность к противоречиям, характерная для житейского знания, обеспечивает поведенческую вариативность и не является дефектом в собственной системе координат, но очевидным образом расходится со стандартами рационального мышления.

Внесение нового знания в житейскую картину мира не подразумевает достижения непротиворечивости и цельности, но требует установления его «правильности» в плане соответствия имеющимся у субъекта сценарным комплексам, а социальное происхождение последних подразумевает влияние авторитетности источника новой информации и действие других закономерностей «аргументации *ad hominem*» – то есть, механизмов, имеющих не логическую, а психологическую и социально-психологическую природу. Новое «правильное» знание либо соотносится с имеющимся сценарием и дополняет его, либо, представляя собой отдельный сценарий, встраивается в совокупность имеющихся сценарных комплексов. «Неправильное» знание в житейской картине мира эмоционально обесценивается, относится к категории ненужного и, вследствие этого, остается неассимилированным. Не осваивается и знание, организованное по принципам, отличным от закономерностей житейского мышления. Если у человека достаточно эффек-

тивна непонятная память, он может являться носителем такого неприсвоенного знания, но не будет способным пользоваться им в своих целях. В общем же случае типичными исходами при работе житейской картины мира с чужеродным содержанием является либо прямое его отторжение, либо качественная трансформация, превращающая нежитейское знание в житейское. В частности, в ходе «перестройки и адаптации научных знаний в соответствии с требованиями и действительностью сложившейся системы социальных отношений» [Донцов и др., 1987], формируются так называемые «социальные представления» – житейский суррогат системы научных понятий.

2.3. Мифологическая картина мира

Компонентами мифологической картины мира являются личностные смыслы, отражающие оценку жизненного значения для субъекта объективных обстоятельств и его действий в этих обстоятельствах [Леонтьев, 1975], в силу чего картина мира данного типа могла бы называться собственно *смысловой*. Однако ее исследование, подразумевающее проникновение в глубинные слои психики человека, сильно затруднено на методическом уровне. Более доступны для изучения смысловые структуры в их внеличных культурных формах – мифы и мифологические системы («мифологии» в терминологии Р. Барта), что и послужило основанием для названия этой разновидности картины мира мифологической.

Для мифологической картины мира поступление новой информации подразумевает установление личностного смысла этой информации и вписывание ее в имеющиеся смысловые комплексы. Как уже было сказано, описание таких комплексов представляет собой существенную сложность, поскольку смысловые связи, установление которых окрашивает поступающую информацию в яркие чувственные тона, сами по себе являются для субъекта в большинстве случаев неосознаваемыми, невербализуемыми и поэтому недоступными для рефлексии и отчета. Для их осознания требуется специальное познавательное действие – «решение задачи на смысл», по выражению А.Н. Леонтьева, – в результате которого человек может определить свое отношение в категориях, имеющих аффективное содержание.

К классификации смысловых комплексов и их оснований имеется несколько подходов. Например, в рамках деятельностной парадигмы В.В. Столин выделяет позитивный, негативный и конфликтный смыслы [Столин, 1983]; в психосемантической парадигме выделяются универсальные (Ч. Осгуд) или сугубо индивидуальные (Дж. Келли) глубинные конструкторы, опосредующие многомерную категоризацию объектов [Петренко, 2005]. На настоящий момент вопросы о составе, структуре, индивидуальной и групповой специфике содержания смысловых конструкторов еще не получили удовлетворительного решения.

Итак, вписывание нового знания в мифологическую картину мира протекает как процесс отнесения нового компонента к широкому и аморфному смысловому конгломерату, который в самом простом варианте мог бы быть обозначен как «то, что мне нравится» или «то, что мне не нравится». При большей степени дифференциации смысловые конгломераты могут характеризоваться сочетанием универсальных конструктов Ч. Осгуда, например: «приятное, сильное, активное», «приятное, слабое, пассивное», «неприятное, сильное, пассивное». Выделение возможно и по эмоциональному содержанию, в этом случае словесное обозначение соответствующей эмоции уместно использовать для наименования смыслового комплекса. Так, в «Анне Карениной» встречаем описание комплекса *позор*, сформировавшегося у персонажа на основе схожих аффективных реакций на разнородные жизненные ситуации: «Левин каждый раз вздрагивал и краснел, вспоминая позор отказа, он говорил себе: «Так же краснел и вздрагивал я, считая все погибшим, когда получил единицу за физику и остался на втором курсе; так же считал себя погибшим после того, как испортил порученное мне дело сестры». При этом один и тот же компонент мифологической картины мира может быть отнесен не к одному, а к нескольким смысловым конгломератам, что на эмоциональном уровне переживается как противоречивость чувств по отношению к объекту.

Внутри смысловых конгломератов связи между входящими в них компонентами замыкаются в силу самого этого вхождения, и имеют поэтому чисто субъективный характер, вследствие чего установление внешне объяснимой логики смысловых объединений оказывается крайне затруднительным.

Важной характеристикой мифологической картины мира является ее общая выраженная ригидность по отношению к новому знанию, иногда делающая совершенно невозможным привнесение чего бы то нового в систему имеющихся смысловых комплексов и какого-либо преобразования самой этой системы, что иллюстрирует еще один фрагмент романа Толстого: «Левин никогда не называл княгиню *тапан*, как это делают зятья, и это было неприятно княгине. Но Левин, несмотря на то, что он очень любил и уважал княгиню, не мог, не осквернив чувства к своей умершей матери, называть ее так».

Заключение

Одним из ближайших следствий качественных различий в способах структурирования знаний в картинах мира разного типа является влияние, оказываемое ими на коммуникативные процессы. Эффективным, то есть позволяющим участникам осуществлять свои коммуникативные намерения, может быть общение, в ходе которого тип картины мира, из которой отправитель формулирует сообщение, соответствует типу картины мира

получателя этого сообщения. Рассогласованность в том, какого типа картины мира опосредуют формулирование и декодирование передаваемой информации, приводит к коммуникативной неудаче. Она наблюдается, например, при взаимодействии преподавателя, решающего задачу формирования у своих слушателей фрагмента научной картины мира, и житейски мотивированной аудитории, стремящейся узнать «правильные ответы» на экзаменационные вопросы; врачи сталкиваются с магическим отношением пациентов к медицинским назначениям; известно, что попытка рациональной или сценарной интерпретации смысловой информации ведет к конфликтам в межличностном общении. Способность ориентироваться в способах приобретения знания участниками взаимодействия и гибко подстраиваться к ведущей картине мира партнеров может иметь существенное значение для развития интеллектуальных систем, выполняющих различные коммуникативные функции.

Список литературы

- [Величковский, 2006] Величковский Б.М. Когнитивная наука: Основы психологии познания. В 2 т. Т. 2. – М.: Академия, 2006.
- [Гаврилова и др., 2000] Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000.
- [Донцов и др., 1987] Донцов А.И., Емельянова Т.П. Концепция социальных представлений в современной французской социологии. – М.: МГУ, 1987.
- [Дюркгейм, 1995] Дюркгейм Э. Социология. Ее предмет, метод, предназначение / Пер. с фр. А.Б. Гофмана. – М.: Канон, 1995.
- [Кузнецова, 2016] Кузнецова Ю.М. Семиотический подход к информационной защите личности // Тенденции и перспективы развития социотехнической среды: Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – М.: Изд-во СГУ, 2016.
- [Леонтьев, 1975] Леонтьев А.Н. Деятельность. Сознание. Личность. – М.: Политиздат, 1975.
- [Осипов и др., 2017] Осипов Г.С., Панов А.И., Чудова Н.В., Кузнецова Ю.М. Знаковая картина мира субъекта поведения. – М.: Физматлит, 2017.
- [Петренко, 2005] Петренко В.Ф. Основы психосемантики. – СПб.: Питер, 2005.
- [Попова и др., 2002] Попова З.Д., Стернин И.А. Очерки по когнитивной лингвистике. – Воронеж: Истоки, 2002.
- [Садохин, 2006] Садохин А. Концепции современного естествознания. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006.
- [Столин, 1983] Столин В.В. Самосознание личности. – М.: МГУ, 1983.
- [Улыбина, 2001] Улыбина Е.В. Психология обыденного сознания. – М.: Смысл, 2001.
- [Швырев, 1984] Швырев В.С. Научное познание как деятельность. – М.: Политиздат, 1984.

УДК 004.81

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВО-ПОДОБНЫХ КОГНИТИВНЫХ ФЕНОМЕНОВ НА АЛГЕБРЕ ФУРЬЕ- ДУАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ: ФЕНОМЕН «ЛИНДА»¹

А.В. Павлов (*pavlov@phoi.ifmo.ru*)
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Показана реализация на алгебре фурье-дуальных определяющих модель операций когнитивного феномена «Линда», относимого к категории квантово-подобных. Ключ к реализации феномена без обращения к собственно квантовым механизмам в рамках биологически мотивированного нейросетевого подхода – учет нелинейности сред для записи весов межнейронных связей.

Ключевые слова: квантово-подобные феномены, квантовая логика, квантовая вероятность, квантовая когнитивистика, оператор проектирования, некоммутативность, нейронные сети, голография, фурье-дуальность, нелинейность, экспозиционные характеристики

Введение

В последние годы в когнитивной науке сформировалось направление, называемое квантовой когнитивистикой и основанное на аналогиях на уровне математических моделей между рядом когнитивных и квантово-механических феноменов. Его развитие обычно связывают с успешным применением квантовой логики к описанию суждений в условиях неопределенности. В частности, с анализом введенного в научный оборот Тверским и Канеманом феномена «Линда» [Tversky, Kahneman, 1983].

Суть феномена в том, что опрашиваемым предлагался рассказ: «Линде 31 год, она одинокая, откровенная и очень яркая, специализировалась в философии. В студенческие годы глубоко интересовалась вопросами дискриминации и социальной справедливости, участвовала в антиядерных демонстрациях». Затем задавался вопрос: кем является Линда: во-первых, феминисткой (F); во-вторых, кассиром в банке (T); в-третьих, феминисткой, работающей кассиром в банке ($F&T$)?

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00676).

Ответ №3 формально описывается как конъюнкция вариантов 1 и 2. Поскольку события 1 и 2 независимы (в [Trueblood et al., 2014] они названы несовместными), то согласно классической теории [Колмогоров, 1974], их совместная вероятность должна быть ниже, чем вероятности 1 и 2 по отдельности. Но эксперименты дали такой порядок: $P(F) > P(F \& T) > P(T)$.

Порядок $P(F \& T) > P(T)$, рассматриваемый для независимых событий в рамках классического подхода как грубая логическая ошибка, правомочен в квантовой физике, что и дало основания применить квантовую логику к описанию когнитивных процессов [Bussemeyer et al., 2011]. При этом нерешенность проблемы интерпретации в квантовой физике [Гриб, 2013] и тут привела к очень широкому спектру мнений [Meijer, Raggert, 2014].

Применительно к феномену «Линда», аналогии с квантовой механикой формально ограничиваются лишь некоммутативностью проекторов, описывающих вывод в квантовой логике. Но некоммутативность сама по себе еще не квантовость, а какой-либо действительно квантовой природы здесь, на наш взгляд, не видно. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть возможности реализации данного феномена без обращения к «квантовости». В докладе показано, что феномен «Линда» может быть получен одним из методов классической волновой физики – голографии Фурье, порождающей алгебру фурье-дуальных операций [Павлов, 2001].

1. Подход и модель

1.1. Общий подход

Согласно правилу Борна, в квантовой физике вероятность события $B_{x,y}$, например, нахождения частицы в точке (x, y) , задается формулой

$$P_{\psi}(B_{x,y}) = \psi(x, y)\psi^*(x, y), \quad (1.1)$$

где ψ – волновая функция частицы или амплитуда вероятности [Фейнман и др., 1965], астериск – символ комплексного сопряжения. Выражение (1.1) формально точно соответствует определению интенсивности в волновой физике, в котором волновая функция $\psi(x, y)$ описывает поле комплексных амплитуд. Это позволяет нам использовать интенсивность волнового поля $I(x, y) = \psi(x, y)\psi^*(x, y)$, измеряемую квадратичным приемником, как адекватный аналог вероятности в модели исследуемого феномена.

В 1906 году А. Гольдшайдер предложил подход к исследованию механизмов памяти и внимания через анализ взаимодействия волновых фронтов, формирующихся в кортикальной области мозга при восприятии сенсорных стимулов и воспоминании [Прибрам, 1997]. Позже этот подход был развит в голографическую парадигму работы мозга. В этих рамках, отдавая себе отчет в различной физической природе волновых процессов мышления и волновой физики, правомочно использование формального и

экспериментального аппарата голографии, как раздела волновой физики, для описания и моделирования когнитивных процессов. В контексте темы доклада и, в частности, выражения (1.1), голография актуальна как метод регистрации и восстановления комплексных амплитуд $\psi(x, y)$, буквально соответствующий биологически мотивированному правилу Хебба.

Математическую связь между методами искусственного интеллекта и волновой физикой дает алгебра фурье-дуальных операций [Павлов, 2001], отвечающая критерию биологической мотивированности [Глезер, 1999].

Заслуживает внимания также цикл работ М. Peruš [Peruš, 2000, 2001; Loo et al, 2004; Tay et al., 2010], в которых на основе аналогий между нейронными сетями (НС), квантовой механикой и голографией развито направление «квантовая голография» и показана реализация ряда НС моделей, в частности, ассоциативной памяти. Но рассуждения выходят за рамки концепции памяти: память – это восстановление эталонного образа или, в квантовых терминах, – коллапс волновой функции к собственному значению, а рассуждения – формирование образа, отличного от эталона или коллапс к значению, отличному от заданного при обучении эталонного.

1.2. Нейросетевой подход к реализации феномена «Линда»

Обсуждаемый феномен проявляет взаимодействие трех внутренних репрезентаций: формируемого образа «Линда» **L** и двух наличествующих понятий: «Феминистка» **F** и «Кассир» **T**. Эти внутренние репрезентации представлены нейронными ансамблями, описываемыми векторами **L**, **F** и **T**. Вектор **L**, формируемый по восприятию рассказа, описывает состояние оперативной памяти [Baddeley, 1992]. Запомненные в весах связей понятия **F** и **T** представлены в памяти в подпространствах \mathcal{F} и \mathcal{T} , соответственно; их размерности определяются числом признаков соответствующих понятий.

Рассказ о Линде построен так, чтобы образ **L** явно ассоциировался с понятием **F**, т.е. чтобы их внутренние репрезентации имели общие признаки, и никак не ассоциировался (в рассказе) с понятием **T**. Предполагается, что понятия **F** и **T** независимы.

В квантовой логике логический вывод формализован оператором проектирования вектора текущего состояния [Bussemeyer et al., 2011]. Но декларируемая несовместность **F** и **T** (на самом деле – независимость) не позволяет описать вывод одновременным проектированием вектора **L** на оба подпространства \mathcal{F} и \mathcal{T} . Поэтому суждение как конъюнкция (**F**&**T**) рассмотрено как результат последовательных проекций вектора **L** (рис.1 [Trueblood et al., 2014]): сначала на более вероятное подпространство \mathcal{F} , а затем из \mathcal{F} на \mathcal{T} . На рис. 1 виден эффект некоммутативности проекторов: вероятность того, что Линда – кассир выше, если вначале решено, что она

феминистка, и наоборот, если вначале признано, что она кассир, то ниже вероятности и этого ответа, и того, что она к тому же и еще феминистка.

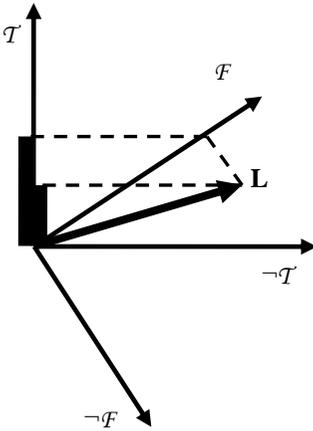


Рис. 1. Схема конъюнкции применительно к феномену «Линда» как последовательных проектирований вектора состояния L на подпространства F и T ; для наглядности размерности F и $T = 1$

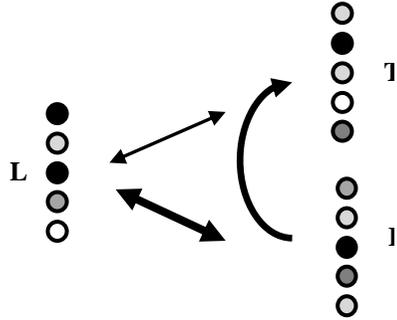


Рис. 2. НС модель феномена «Линда», этап конъюнкции: толщины линий между нейронными ансамблями L , F и T соответствуют силе ассоциативных связей между нейронными ансамблями, дуга – связь, не заданная при обучении

Таким образом, вопрос НС реализации и НС модели феномена «Линда» без обращения к квантовой физике сводится к установлению связи понятий F и T (т.е. представляющих их нейронных ансамблей), которая, как предполагается, при обучении НС этим понятиям явно не задана. Иными словами, это вопрос поиска классического механизма самостоятельного установления НС связи $F \leftrightarrow T$, изображенной на рис. 2 дуговой стрелкой.

Одно из возможных направлений поиска определяется тем, что веса межнейронных связей регистрируются материальными структурами мозга: синаптическими контактами при участии нейроглии; далее в целом будем называть их регистрирующими средами (РС). Зависимость зарегистрированного веса связи от возбуждения связываемых нейронов, которую назовем экспозиционной характеристикой (ЭХ), в реальности всегда нелинейна. Поэтому имеет смысл искать возможности решения нашей задачи на основе эффектов, обусловленных нелинейностью ЭХ РС. В частности, представляет интерес известный механизм формирования разностных частот, работающий и в голографии [Орлов, 2004].

1.3. Модель

НС хранит запомненную информацию, в том числе понятия **F** и **T**, в виде структуры межнейронных связей. Рассмотрим формирование связей, хранящих понятия **F** и **T**, при реализации правила обучения Хебба на алгебре фурье-дуальных операций с учетом следующих допущений.

1. Понятия **F** и **T** регистрируются независимо (последовательно), но в одной РС по схеме «Звезда Гроссберга», каждому понятию соответствует свой нейрон Гроссберга $\delta_F(x)$ и $\delta_T(x)$, соответственно (рис. 3).

2. ЭХ РС может быть представлена степенным рядом, ограничимся рассмотрением первых двух членов ряда: линейного и квадратичного.

3. Квадратичный член возникает при обучении второму понятию или после него – это важно в плане правомочности суммирования амплитуд.

Тогда структура связей может быть описана следующим образом:

$$H(v) = \eta_1 \left\{ \begin{aligned} & \left[R_F \cdot \exp(j\omega x_F) + \mathfrak{F}(F(x)) \right] \cdot \left[R_F \cdot \exp(j\omega x_F) + \mathfrak{F}(F(x)) \right]^* \\ & + \left[R_T \cdot \exp(j\omega x_T) + \mathfrak{F}(T(x)) \right] \cdot \left[R_T \cdot \exp(j\omega x_T) + \mathfrak{F}(T(x)) \right]^* \end{aligned} \right\} \\ + \eta_2 \left\{ \begin{aligned} & \left[R_F \cdot \exp(j\omega x_F) + \mathfrak{F}(F(x)) \right] \cdot \left[R_F \cdot \exp(j\omega x_F) + \mathfrak{F}(F(x)) \right]^* \\ & + \left[R_T \cdot \exp(j\omega x_T) + \mathfrak{F}(T(x)) \right] \cdot \left[R_T \cdot \exp(j\omega x_T) + \mathfrak{F}(T(x)) \right]^* \end{aligned} \right\}^2, \quad (1.2)$$

где η_1 и η_2 – коэффициенты при линейном и квадратичном членах, R_F и R_T – амплитуды, пропорциональные уровням возбуждения нейронов $\delta_F(x)$ и $\delta_T(x)$, x_F и x_T – их координаты, j – мнимая единица, v – пространственная частота, $\omega = 2\pi v$, \mathfrak{F} – символ преобразования Фурье.

Нас интересует квадратичный член. Его разложение дает, кроме прочих, также и два слагаемых, описывающих показанную дугой на рис. 2 и рис. 3 искомую связь между не связанными явным образом нейронами Гроссберга $\delta_F(x)$ и $\delta_T(x)$ и, тем самым, между эталонами $F(x)$ и $T(x)$:

$$H_{FT}(v) = \eta_2 \cdot \left\{ \begin{aligned} & \mathfrak{F}^*(F(x)) \cdot \mathfrak{F}(T(x)) \cdot R_F \cdot R_T \cdot \exp(j\omega(x_F - x_T)) + \\ & + \mathfrak{F}(F(x)) \cdot \mathfrak{F}^*(T(x)) \cdot R_F \cdot R_T \cdot \exp(-j\omega(x_F - x_T)) \end{aligned} \right\}. \quad (1.3)$$

Выражение (1.3) описывает новые неявные связи в (1.2), возникшие вследствие квадратичной нелинейности ЭХ РС [Орлов, 2004]; назовем их субголограммой. Одинаковые подэкспоненциальные выражения в (1.3) с противоположными знаками означают двунаправленность связей.

При предъявлении образа «Линда» $L(x)$ связи, описываемые линейным членом (2), активируют соответствующие нейроны Гроссберга:

$$\delta_F^R(\Delta) = \eta_1 (L(x) \otimes F(x)), \quad (1.4a)$$

$$\delta_T^R(\Delta) = \eta_1 (L(x) \otimes T(x)), \quad (1.4б)$$

где R – восстановленный, \otimes – символ корреляции, Δ – координата.

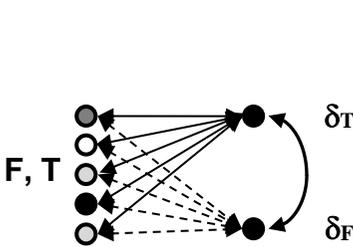


Рис. 3. Структура связей НС, независимо обученной F и T : сплошные линии – результат обучения понятию «Кассир»; штрих – понятию «Феминистка»; дуга – связь (1.3), самостоятельно возникшая за счет квадратичной нелинейности

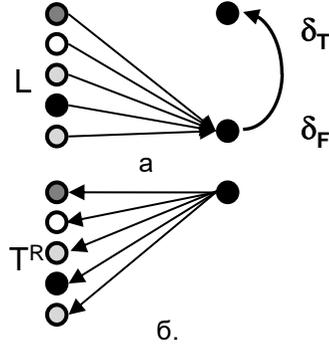


Рис. 4. Схема последовательной активации связей: а – проекция L на F и возбуждение $\delta_F \rightarrow \delta_T$ реализуется первым слагаемым в (1.3);

б – проекция $[L(x) \otimes F(x)]$ на T

По условиям эксперимента [Tversky, Kahneman, 1983] образ «Линда» формируется рассказом так, что $\langle L(x), F(x) \rangle > \langle L(x), T(x) \rangle$, где $\langle \rangle$ – символ скалярного произведения. Введем их отношение:

$$k = \frac{\langle L(x), F(x) \rangle}{\langle L(x), T(x) \rangle} > 1.$$

Отклики, т.е. возбужденные НА, формирует и субголограмма (1.3):

$$F^R(\Delta) = \eta_2 \cdot R_F \cdot R_T \cdot [L(x) \otimes T(x)] * \{F(x) * \delta(x_F - x_T)\}, \quad (1.5a)$$

$$T^R(\Delta) = \eta_2 \cdot R_F \cdot R_T \cdot [L(x) \otimes F(x)] * \{T(x) * \delta(x_T - x_F)\}, \quad (1.5б)$$

где $*$ – символ операции свертки.

Выражения (1.5a) и (1.5б) описывают требуемую последовательность проектирований: кросскорреляционные функции в квадратных скобках описывают проекцию входного вектора L сначала на соответствующее

подпространство (F на рис. 4а), а затем из него – на второе (T на рис. 4б). При этом этап рис. 4а полностью реализуется первым слагаемым в (1.3).

Для большей ясности изложения пренебрежем уменьшением разрешения в результате свертки с корреляционными функциями и заменим последние скалярными произведениями:

$$F^R(\Delta) = \eta_2 \cdot R_F \cdot R_T \cdot \langle L(x), T(x) \rangle \cdot \{F(x) * \delta(x_T - x_F)\}, \quad (1.6a)$$

$$T^R(\Delta) = k \cdot \eta_2 \cdot R_F \cdot R_T \cdot \langle L(x), T(x) \rangle \cdot \{T(x) * \delta(x_F - x_T)\}. \quad (1.6b)$$

Рассмотрим обратное прохождение возбуждения от НА (1.4а), (1.4б), (1.6а) и (1.6б) через связи, описываемые выражением (1.2). Возбуждение от НА (1.4а) и (1.4б) проходя в обратном прохождении по связям, описываемым линейным членом (1.2), активируют налагающиеся друг на друга НА

$$F^{L(2)}(x) = \eta_1 \cdot k \cdot R_F \cdot F(x) \cdot \langle L(x), T(x) \rangle, \quad (1.7a)$$

$$T^{L(2)}(x) = \eta_1 \cdot R_T \cdot T(x) \cdot \langle L(x), T(x) \rangle, \quad (1.7b)$$

где $L(2)$ означает восстановленный линейным членом в выражении (1.2). Это соответствует классической модели авто-ассоциативной памяти. Отношение интенсивностей (1.6а) к (1.6б) в итоговом НА:

$$V^{L(2)} = \frac{\left(\langle F^{L(2)}(x), F^{L(2)}(x) \rangle \right)^2}{\left(\langle T^{L(2)}(x), T^{L(2)}(x) \rangle \right)^2} = k^2. \quad (1.8)$$

Поскольку по условиям эксперимента k достаточно велико, а нейроны имеют сигмообразную активационную функцию, то при попадании (1.7а) в рабочий участок динамического диапазона (1.7б) попадает в область нечувствительности. И наоборот, если (1.7б) в рабочем участке, то (1.7а) оказывается в области насыщения. Имеем классическую вероятность, которая реализуется в рамках модели авто-ассоциативной памяти.

Ситуацию кардинально меняет наличие квадратичной субголограммы (1.3). Возбуждение от НА (1.5а) и (1.5б) в обратном ходе через квадратичную субголограмму (1.3) активируют НА в той же локализации, что и (1.7а), (1.7б):

$$F^{(3)}(x) = \eta_2 \cdot F^R(x) * (T(x) \otimes F(x)),$$

$$T^{(3)}(x) = \eta_2 \cdot T^R(x) * (F(x) \otimes T(x)).$$

Итоговые восстановленные образы «Феминистка» и «Кассир»:

$$F^{RB}(x) = F(x) \cdot \langle L(x), T(x) \rangle \cdot R_F \cdot \{k \cdot \eta_1 + \eta_2^2 \cdot R_T \cdot \langle T(x), F(x) \rangle\},$$

$$T^{RB}(x) = T(x) \cdot \langle L(x), T(x) \rangle \cdot R_T \cdot \{\eta_1 + k \cdot \eta_2^2 \cdot R_F \cdot \langle T(x), F(x) \rangle\}.$$

Сравним отношение интенсивностей итоговых образов с отношением интенсивностей образов, формируемых линейным членом (1.3):

$$V = \frac{V^{RB}}{V^{L(2)}} = \left(k \cdot \frac{1 + k \cdot r_{\eta} \cdot R_F \cdot \langle T(x), F(x) \rangle}{k + r_{\eta} \cdot R_T \cdot \langle T(x), F(x) \rangle} \right)^2 = \left(\frac{1 + k \cdot r_{\eta} \cdot R_F \cdot \langle T(x), F(x) \rangle}{1 + \frac{1}{k} r_{\eta} \cdot R_T \cdot \langle T(x), F(x) \rangle} \right)^2,$$

где $r_{\eta} = \eta_2^2 / \eta_1$. Можно видеть, что поскольку $k > 1$, то V растет с ростом k , скорость роста зависит от отношения η_2 и η_1 , информационных характеристик образов и условий обучения, но всегда положительна.

Заключение

Рассмотренный механизм возникновения связей между обучающими образами за счет нелинейности экспозиционных характеристик сред для записи весов межнейронных связей обеспечивает точное соответствие реализуемой модели обработки, используемой в квантовой логике концепции последовательного проектирования вектора состояния сети, инициируемого в результате сенсорного восприятия, на подпространства понятий и/или образов, с которыми вектор состояния соотносится. Анализ дан для двух понятий, при увеличении их количества связи на основе данного механизма возникают между всеми понятиями, т.е. модель не имеет ограничений сверху на количество ассоциируемых понятий и, соответственно, последовательных проектирований вектора состояния.

Таким образом, феномен «Линда», часто рассматриваемый как один из краеугольных камней концепции квантовой природы сознания, интеллекта, социума, может иметь в своей основе вполне классические механизмы, не требующие обращения к квантовым эффектам и механизмам, а именно нелинейность отклика сред, реализующих связи в биологических нейронных сетях, в социуме. Специально подчеркнем, что этот вывод не следует рассматривать как отрицание возможности наличия именно квантовых эффектов или, более того, обуславливающей их квантовой природы сознания, интеллекта и социума, но лишь как попытку найти возможность простого объяснения в рамках известных подходов.

Благодарности. Автор считает приятным долгом поблагодарить к.т.н., В.В. Орлова за обсуждения и демонстрацию полученных им экспериментальных результатов, к.ф.м.н. Н.А. Соловьева за дискуссии, способствовавшие как первоначальному интересу автора к теме, так и уточнению его позиции по ряду вопросов.

Список литературы

- [Глезер, 1999] Глезер В.Д. Согласованная фильтрация в зрительной системе // Оптический журнал, 1999, Т. 66, № 10.
- [Гриб, 2013] Гриб А.А. К вопросу об интерпретации квантовой физики // УФН, 2013, Т. 183, № 12.
- [Колмогоров, 1974] Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей. М., 1974.
- [Орлов, 2004] Орлов В.В. О решетках, возникающих при нелинейной записи наложенных голограмм // Письма в ЖТФ, 2004, Т. 30, Вып. 24.
- [Павлов, 2001] Павлов А.В. Об алгебраических основаниях Фурье-голографии // Оптика и спектроскопия, 2001, Т. 90, № 3.
- [Прибрам, 1997] Прибрам К. Нелокальность и локализация: голографическая гипотеза о функционировании мозга в процессе восприятия и памяти // В сб. «Синергетика и психология». В.1. «Метод. вопросы». М., 1997.
- [Фейнман и др., 1965] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып.8. – М.: Мир, 1965.
- [Фейнман, Хибс 1968] Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. – М.: Мир, 1968.
- [Baddeley, 1992] Baddeley, A. Working memory. Science. 1992. 255.
- [Busemeyer et al., 2011] Busemeyer J.R., Pothos E., Franco R., Trueblood J.S. A quantum theoretical explanation for probability judgment “errors” // Psychol. Rev. 2011. Vol. 118. No. 2.
- [Grib, 2018] Grib A. Some Remarks on Quantum Logics and Quantum Mechanics // Adv. Appl. Clifford Algebras (2018) 28:29. 2018 Springer International. – <https://doi.org/10.1007/s00006-018-0818-2>.
- [Khrennikov, 2015] Khrennikov A.Yu. Quantum-like modeling of cognition // Frontiers in Physics. 2015. Vol. 3.
- [Meijer et al., 2014] Meijer D.K.F., Raggett S. Quantum Physics in Consciousness Studies // In book: Quantum Mind UK. 2014.
- [Peruš, 2000] Peruš M. Neural Networks as a basis for quantum associative networks // Neural network world. 2000. Vol. 10.
- [Peruš, 2001] Peruš M. Multi – level Synergetic Computation in Brain // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2001. Vol. 4. No. 2.
- [Loo, 2004] Loo C.K., Peruš M., Bischof H. Associative memory based image and object recognition by quantum holography // Open Systems & Information Dynamics. Kluwer Academic Publishers. 2004. Vol. 11. No. 3.
- [Tay, 2010] Tay N.W., Loo C.K., Peruš M. Face Recognition with Quantum Associative Networks Using Overcomplete Gabor Wavelet // Cogn. Comp. 2010. 2.
- [Trueblood et al., 2014] Trueblood J.S., Pothos E.M., Busemeyer J.R. Quantum probability theory as a common framework for reasoning and similarity // Front. Psychol., 11 April 2014. – <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00322>.
- [Tversky, 1983] Tversky A., Kahneman D. Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment // Psychological Review. 1983. 90(4). – <http://dx.doi.org/10.1037/0033-295X.90.4.293>.

УДК: 159.95:004.81

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЛАНИРОВАНИЯ В ЗНАКОВОЙ КАРТИНЕ МИРА¹

Н.В. Чудова (*nchudova@gmail.com*)

Институт системного анализа

Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление» РАН, Москва

В работе рассмотрены психологические аспекты процессов планирования и целепорождения, введено представление о типах знаков для моделирования знаковой картины мира, предложена схема планирования для интеллектуального агента, обладающего знаковой картиной мира.

Ключевые слова: планирование, целепорождение, знаковая картина мира, семантические сети

Введение

В когнитивных науках проблема преимуществ, предоставляемых когнитивными функциями, регулируемые на уровне сознания, долгое время не обсуждалась. Одни исследователи исходили из предположения, что сознание тождественно психике и можно моделировать целенаправленное поведение и сознательный выбор на примере поведения мыши, другие интересовались в первую очередь неосознаваемыми процессами (см., например, Хрестоматию по когнитивной психологии, изданную МГУ [Когнитивная психология, 2011], где тема «Осознаваемые и неосознаваемые процессы в познании» представлена 4 работами, 3 из которых в своём названии содержат термины «неосознаваемый», «имплицитный», но ни одна не содержит термин «осознаваемый»). В последние годы ситуация стала меняться, подтверждением чему может служить работа, написанная ведущими отечественным и американским когнитивными психологами в работе [Фаликман, Коул, 2014]. Идеи культурно-исторического подхода Выготского–Лурии–Леонтьева, на которые мы опираемся при моделировании сознания [Осипов и др., 2018], оказались теперь востребованы и в мировой когнитивной психологии. Не случайно аналитический обзор работ по когнитивным

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №17-29-07051).

наукам 2017 года носит название «Новая волна Выготского в когнитивной науке: разум как незавершенный проект», при этом утверждается, что «наметившиеся сближения с культурно-деятельностной парадигмой» отмечают и западные коллеги, «количество исследований в логике Выготского в западной науке постоянно возрастает» [Фаликман, 2017], «энактивизм предлагает заменить понимание познавательных процессов как процессов переработки информации моделями наделения значением» [Логинов, Спиридонов, 2017]. Можно ожидать, что и вопросы планирования, целеобразования, саморегуляции в ближайшее время окажутся в центре внимания когнитивных наук как вопросы, требующие обращения к тематике сознания и знакового опосредствования.

1. Понятие планирования в психологии

В психологической литературе процессы планирования рассматриваются в двух аспектах – в социальном, связанном с распределением работ в коллективе и принятием управленческих решений [Лазарев, 1980; Карпов, 2007], и в интеллектуальном, связанном с «проигрыванием в уме» условий и требований задачи, когда планирование понимается как «исследовательская деятельность человека ..., предворяющая практическое преобразование ситуации» [Тихомиров, 1984]. Для процесса решения задачи коалицией интеллектуальных агентов актуальны оба этих аспекта. При моделировании процессов планирования на семантических сетях, в которых объектами выступают компоненты знака (имя, значение, образ, смысл), активация различных фрагментов этих сетей представляет собой отражение моментов «всплывания» в сознании результатов текущей работы когнитивных и аффективных процессов. Такая модель работы сознания позволяет описывать и процессы целепорождения при решении задачи, и организационные действия в коллективе агентов – как опосредствованные вербализованными знаниями о мире (т.е. знания, представленные как тексты).

Приходится констатировать, что сам механизм планирования при решении проблем остаётся в психологии недостаточно исследованным [Чувгунова, 2015], так что воспользоваться готовой психологической моделью в работах по искусственному интеллекту вряд ли возможно. Поэтому для начала дадим развёрнутое определение планирования как процесса выдвижения и проверки гипотез о целях и действиях, необходимых для решения проблемы (выполнения задания). По функции планирование, включающее целепорождение, – это выделение действий, обеспечивающих достижение желаемого результата: «Анализ исследовательской деятельности, подготавливающий выбор очередного практического действия ... показывает, что ... может быть отчетливо выражен специальный этап планирования собствен-

ных действий в последующих ситуациях. ... Таким образом, сформированный план является одним из существенных факторов сокращения поисковой деятельности в последующих ситуациях» [Тихомиров, 1984, с.36]. По форме планирование – это исследовательские действия в безопасном пространстве пробы возможных и необходимых практических действий. Именно в создании такого пространства для «мысленных экспериментов» А.Р. Лурия видел особую функцию языка как «второй реальности»; как подчёркивает К.Н. Поливанова, «в означивании происходит проба действия, его обнаружение, разглядывание» [Поливанова, 1996, с.26]. Наконец, по своему содержанию планирование – это оперирование со знаками, имеющими денотаты в предметной реальности, на основе оперирования знаками, имеющими денотаты в понятийной (символической) реальности.

1. Типология знаков в знаковой картине мира

Остановимся на последнем утверждении, касающемся содержания процесса планирования, более подробно.

Номинативная функция языка реализуется в знаке-вещи (имеющей в качестве имени изосемические слова, по Г.А. Золотовой), это знак, имеющий денотат в физической реальности. Значение вещи в таком знаке опосредствовано семантической ролью, отражающей функцию вещи (быть средством, быть целью, быть местом, быть причиной и т.д.) в конкретной ситуации. Личностный смысл при этом опосредствован модальностью, отражающей роль вещи в жизни/ситуации субъекта в виде желаемого, необходимого или возможного действия с этой вещью («хочу», «должен», «могу»). Образ же опосредствован концептами – понятиями, отражающими существенные признаки вещи, при этом сами понятия могут быть не представлены в сознании, а могут быть представлены в виде знаков-абстракций (такими как форма, настроение, время суток и проч.). Отметим, что представленность в сознании таких знаков-абстракций сама по себе является мотиватором операции сравнения и действия рассуждения.

Знаки-абстракции, имеющие денотат в символической реальности, образуют четыре группы в соответствии с тем, для какого компонента знака-вещи они являются обобщениями. Соответственно, необходимо различать знак-событие, знак-концепт, знак-переживание и знак-лингвистическая категория.

Знак-событие является обобщением для совокупности знаков-вещей, имеющих общую в каком-либо отношении ролевую структуру значений (эти знаки-вещи представляют собой протознаки [Осипов, 2010] для знака-события). Такой знак имеет денотат в виде так или иначе выделяемой житейской ситуации, его значение организовано как сценарий, а его образ представляет собой совокупность образов знаков-вещей, заполняющих

слоты сценария. Смысл события задаётся его положением в структуре деятельности – является это событие самостоятельным мотивом деятельности или представляется собой промежуточную цель, средство удовлетворения потребности. Оно также может выступать препятствием или быть амбивалентным по отношению к потребностям субъекта (быть мотивом одной деятельности и одновременно препятствием для другой) [Столин, 1983]. В случае если смысл события – быть препятствием, возможно уточнение этого смысла через определение положения этого препятствия в структуре жизнедеятельности, так что событие-препятствие может иметь смысл борьбы, отказа от мотива, минимизации убытков или средства самосовершенствования (подробнее см. в [Чудова, 2017]).

Знак-концепт является обобщением для совокупности знаков-вещей, имеющих общую в каком-либо отношении признаковую структуру образов. Знак такого типа имеет денотат в виде концепции, представленной в научных текстах и произведениях искусства; его значение организовано как набор признаков явления (природного, технического, социального); его образ представляет собой метод конструирования/распознавания этого явления; его смысл задаётся как мировоззренческая позиция.

Знак-переживание является обобщением для совокупности знаков-вещей, имеющих общий смысл (смысл желания, долженствования или возможности). Его значение организовано как нарратив, где «Я» – главный герой сценария, в котором много места занимает прежде всего описание слота «мотив». Образ такого знака сформирован из характеристик действий и вещей, вокруг которых разворачивается нарратив, а его смысл представляет собой утверждение субъектом своей оценки, даваемой этим вещам, действиями и ситуации в целом.

Содержание знака-лингвистической категории требует отдельного описания, выходящего за рамки данной работы.

2. Этапы планирования в знаковой картине мира

Рассмотрим этапы планирования для субъекта, опосредствующего свою деятельность знаками. Согласно К. Бюлеру, решение задачи начинается с её формулировки: «Поставленная в формулировке цель (требование) «заставляет» решателя понять задачу, т.е. осознать отношение между данным и искомым» [Спиридов, 2003]. В искусственном интеллекте в 70-е годы была предпринята попытка продвинуться в этом направлении: «Анализируя процесс решения задачи, Дж. Грино выделяет пять последовательных стадий: 1) чтение текста задачи, 2) интерпретация понятий, 3) извлечение релевантной информации, 4) создание плана решения, 5) выполнение вычислительных операций» [Величковский, 2006]. Однако, на том этапе раз-

вития ИИ это оказалось невозможным. Теперь, с развитием методов интеллектуального анализа текстов, появляется возможность реализовать 1-й и 2-й этапы схемы Грино в рамках функционирования сети на именах знаков. Схема планирования интеллектуальным агентом теперь может выглядеть так: *во-первых*, создание языковой среды задачи: актуализация базовых имён (имён, содержащихся в формулировке задачи) и установление лингвистических отношений на них; *во-вторых*, создание модели фрагмента языковой реальности: установление на именах связей, отражающих системность речи и актуализация имён, связанных системными отношениями с базовыми; *в-третьих*, уточнение задачи: конкретизация образов, значений и смыслов для базовых знаков (переход от свободных переменных в правилах к фактам на основе заполнения фрагмента языковой реальности текущими значениями из рабочей памяти); *в-четвертых*, создание операционального плана деятельности.

Первый этап в системах ИИ может быть реализован с помощью метода реляционно-ситуационного анализа (РСА), который позволяет выявлять семантику текста, ставя в соответствие синтаксемную структуру предложения логической структуре действий, описанных в этом предложении [Осипов и др., 2008]. Задание, полученное в форме текста (в пределе – предложения), может быть уточнено с помощью текстового анализатора, поскольку с психологической точки зрения грамматические и семантические связи не только позволяют оформить мысль в доступный для коммуникации материал, но и сами являются инструментами прояснения связей между объектами мысли. Вот такой, уже уточнённый образ решаемой задачи, создаёт человек, когда «вчитывается» в текст задачи/задания, пытаясь понять, что именно от него требуется в конкретной ситуации. Как и у читающего текст задания человека, этот этап у интеллектуального агента должен осуществляться с опорой на лексику (на сеть имён), но сам лингвистический анализ может проходить в автоматическом режиме, с вынесением на уровень сознания только его результатов.

Второй этап требует для своей реализации обращения к системным свойствам языка в том объёме, который задан связями и характеристиками базовых (представленных в тексте задания) имён. Речь идёт о тех отношениях между именами, которые концептуализируются в упомянутых выше именах-лингвистических категориях (гипонимия/ гиперонимия, антонимия/синонимия и проч.). Необходим этот этап для того, чтобы дополнить ситуацию выполнения задачи за счёт введения новых знаков, объективно связанных с базовыми знаками. Эти дополнительные знаки в ситуации решения задачи только подразумеваются, они заданы субъекту лишь «виртуально» – как реальность, отражённая в языке. Например, выявление воз-

возможности существования возвратной частицы для глагола, которым описывается в задании перемещение неживого предмета, означает, что этот объект способен к самостоятельным движениям, а значит при выполнении задания потребуется дополнительный ресурс внимания для контроля местоположения этого объекта (так, задание «катить мячик в заданном направлении» должно быть дополнено требованием «не дать ему катиться в другом направлении»). Реализация этого этапа требует дополнения метода РСА представлениями о системности речи и превращения интеллектуального анализа предложения в то, что может быть названо когнитивным анализом текста.

Для реализации третьего этапа методологически адекватным является подход смысловой теории мышления (СТМ) О.К. Тихомирова, поскольку центральным моментом, определяющим трактовку процесса решения задачи, в этой теории является понятие опосредствования: «Существенным отличием концепции Тихомирова ... является обращение к идее опосредствования, суть которой как раз в выходе субъекта за пределы индивидуального опыта» [Корнилова, 2008]. В СТМ разработаны представления об эмоционально-смысловой регуляции выдвижения целей, в частности, о роли операциональных смыслов объектов проблемной ситуации в выборе направлений «исследовательских туров», совершаемых для формирования образа наличной ситуации и для проверки гипотез о возможных препятствиях на пути выполнения требований задачи. Показано, что опора на операциональные смыслы позволяет отказаться от стратегии полного перебора вариантов развития ситуации и существенно сократить объём исследовательской работы при подготовке плана действий. Другой существенной для моделирования целепорождения категорией анализа в СТМ является категория «предрешения» (категория невербализованного операционального смысла решения). Предрешением завершается исследовательская деятельность, необходимая для выдвижения целей, а после появления на неосознаваемом уровне предрешения появляется возможность уже в плане сознания сформулировать цели и задать действия, обеспечивающие выполнение задания. Таким образом, третий этап в планировании, на котором происходит конкретизация образов, значений и смыслов для базовых знаков, может моделироваться с опорой на те представления о предрешении в процессе целепорождения, которые были сформулированы в школе О.К. Тихомирова на основе экспериментальных работ в области смысловой регуляции мышления.

Четвёртый этап планирования требует «сборки» полученной на предыдущих этапах информации о значениях, образах и смыслах объектов под определёнными именами. Таким образом осуществляется возврат к тексту задачи, когда знаки обобщены и одновременно конкретизированы (за счёт

внесения релевантной информации, содержащийся в системе языка, и информации, добытой при измерении физических параметров реальности), а связи между ними дополнены необходимыми знаками-медиаторами, представляющими собой промежуточные цели и роли.

Отметим, что необходимая в планировании, включающем целепорождение, функция самосознания реализуется в высказывании, содержащем местоимение «я» и является динамической системой совокупности таких высказываний (константные и ситуативные желания, долженствования, возможности). Эта функция самосознания может быть введена через знаки-вещи, в отношении которых делаются высказывания, содержащие притяжательное местоимение «моё». Но также она может быть введена через одну из компонент знака: как набор семантических ролей, в которых выступает имя субъекта или местоимение «я»; как набор концептов, которым описываются свойства «Я»; как модальности, используемые при описании «Я».

Заключение

Введенное представление о типах знаков и предложенная схема планирования могут представлять интерес для моделирования процессов целепорождения и планирования в знаковой картине мира.

Список литературы

- [Величковский, 2006] Величковский Б.М. Когнитивная наука: Основы психологии познания: в 2 т. Т. 2 – М.: Издательский центр «Академия», 2006.
- [Карпов, 2007] Карпов А.В. Психология менеджмента. – М.: Гардарики, 2007.
- [Когнитивная психология, 2011] Когнитивная психология: история и современность. Хрестоматия; пер. с англ. Под ред. М. Фаликман и В. Спиридонова. – М.: Ломоносовъ, 2011.
- [Корнилова, 2008] Корнилова Т.В. Методологические проблемы психологии в трудах О.К. Тихомирова и его школы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 14. Психология, 2008, № 2.
- [Лазарев, 1980] Лазарев В.С. Планирование как главное направление и исходный принцип исследования в психологии управления // Вопросы психологии, 1980, № 6.
- [Логинов, Спиридонов, 2017] Логинов Н.И., Спиридонов В.Ф. Воплощённое познание как современный тренд развития когнитивной психологии // Вестник СПбГУ. Психология и педагогика, 2017, Т. 7, Вып. 1.
- [Лурия, 1979] Лурия А.Р. Язык и сознание / Под ред. Е.Д. Хомской. – М.: МГУ, 1979.
- [Осипов и др., 2018] Осипов Г.С. и др. Знаковая картина мира субъекта поведения. – М.: Физматлит, 2018.
- [Осипов, 2010] Осипов Г.С. Семиотическая картина мира // IV Международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов в 2т. Т. 2. Томск, Томский государственный университет, 2010,

- [Осипов и др., 2008] Осипов Г.С., Смирнов И.В., Тихомиров И.А. Реляционно-ситуационный метод поиска и анализа текстов и его приложения // Искусственный интеллект и принятие решений, 2008, № 2.
- [Панов, 2018] Панов А.И. Целеполагание и синтез плана поведения когнитивным агентом // Искусственный интеллект и принятие решений, 2018, № 2.
- [Поливанова, 1996] Поливанова К.Н. Психологическое содержание подросткового возраста // Вопросы психологии, 1996, № 1.
- [Спиридонов, 2003] Спиридонов В.Ф. Механизмы решения задач и проблем в свете «экологического» подхода // Культурно-исторический подход и проблемы творчества. М., 2003.
- [Столин, 1983] Столин В.В. Самосознание личности. – М.: МГУ, 1983.
- [Тихомиров, 1984] Тихомиров О.К. Психология мышления. – М.: МГУ, 1984.
- [Фаликман, 2017] Фаликман М.В. Новая волна Выготского в когнитивной науке: разум как незавершенный проект // Психологические исследования, 2017, Т. 10, № 54.
- [Фаликман, Коул, 2014] Фаликман М.В., Коул М. «Культурная революция» в когнитивной науке: от нейронной пластичности до генетических механизмов приобретения культурного опыта // Культурно-историческая психология, 2014, Т. 10, № 3.
- [Чувгунова, 2015] Чувгунова О.А. Планирование как предмет психологического исследования // Психологические исследования, 2015, Т. 8, № 43. – <http://psystudy.ru/index.php/num/2015v8n43/1191-chuvgunova43.html>.
- [Чудова, 2017] Чудова Н.В. Концептуальная модель смысловой регуляции поведения интеллектуальных агентов // Искусственный интеллект и принятие решений, 2017, № 4.

СЕКЦИЯ 8 | МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССУЖДЕНИЙ И
НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ЛОГИКИ

УДК 007.5

ПОЙА-МЕТОД: КОМПЬЮТЕРНОЕ ВОПЛОЩЕНИЕ
МЕТОДОЛОГИИ Д. ПОЙА¹

А.Б. Воробьев (*abvorobyev@bk.ru*)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва

С.С. Курбатов (*curbatow.serg@yandex.ru*)

Научно-исследовательский центр
электронной вычислительной техники, Москва

И.Б. Фоминых (*igborfomin@mail.ru*)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва

Предложена концепция интегральной системы автоматического решения задач с естественно-языковым интерфейсом. Концепция разработана с целью алгоритмического и программного воплощения идей Д. Пойа. Отмечена важность предметно-независимых эвристик и проведены эксперименты по их алгоритмизации и представления в онтологии. Обсуждаются результаты экспериментов по проверке алгоритмов для задач геометрии.

Ключевые слова: естественно-языковой интерфейс, эвристики Пойа, автоматическое решение задач, онтология

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 18-07-00098, 15-07-02320).

Введение

Известный математик, психолог и педагог Дьёрдь Пойа предложил методологию того, как люди решают задачи и как надо учить решать задачи. Пойа отмечал, что недостаточно просто получить решение, важно получить ответы на ряд вопросов, таких как:

- как от формулировки перейти к формализации;
- как развивать формальную постановку (уравнение, чертеж);
- какие наводящие соображения использовать для решения;
- как наглядно отобразить найденное решение;
- что даст решение, как его проверить и обобщить;
- какие другие пути получения решения?

Поиском ответов на эти вопросы были посвящены работы Д. Пойа, но эти ответы были ориентированы, в основном, на педагога [Пойа, 1976]. С развитием исследований в области автоматического решения задач, автоматического доказательства теорем. Идеи Д. Пойа успешно использовались в эвристических программах. Однако полноценное компьютерное воплощение методологии Д. Пойа не исчерпывается только эвристиками. Вопросы перехода от естественно-языкового (ЕЯ) описания проблемы к её формализации (и особенно выбор собственно формализации или представления), выбора нужной эвристики, возможностей автоматического формирования эвристик, их организации в иерархии и связь с системой знаний, обобщения решений и их качественная оценка, организации системы знаний для решенных задач, создания обучающих систем с удобным интерфейсом (включающим ЕЯ-диалог и графику) пока не получили полноценного решения.

Именно на решение этих вопросов и на то, как они связаны с вопросами Д. Пойа, направлена данная работа. Универсальная схема решения по Пойа сводится к следующим основным положениям:

- 1) чёткое оформление проблемной ситуации;
- 2) детализация проблемы;
- 3) по выявлению сходства, проведению аналогий и установлению тождества между объектами и идеями;
- 4) переформулировка проблемы (условий задачи);
- 5) включение в процесс осмысления проблемы как можно большего объёма достоверных сведений;
- 6) обязательная проверка правильности условий поставленной проблемы;
- 7) осуществление «внутреннего обзора» проведённых этапов творческого поиска.

Эти положения лишь кратко перечислены, Д. Пойа развивает каждое из них и даёт рекомендации по их реализации (специалистом, решающим проблему). Далее все рекомендации Д. Пойа рассматриваются в аспектах алгоритмизации, программного воплощения и представления в системе знаний (в виде онтологии).

Подчеркнем, что трансляция ЕЯ- описаний не просто некоторый этап решения: лингвистическая поддержка проходит через весь процесс решения. В частности, без лингвистической (и онтологической) поддержки ее эвристики, будучи погружены в программные коды, в значительной мере **утрачивают наглядность, общность и возможности корректировки**. Первые два свойства отмечены Д. Пойа как одни из основных, последнее важно для программного воплощения.

Разумеется, компьютерное воплощение методологии Д. Пойа в полном объёме пока не представляется реальным. В данной работе предлагается концепция интегральной системы автоматического решения задач с естественно-языковым интерфейсом, разработанная с целью алгоритмического и программного воплощения идей Д. Пойа (в дальнейшем эту концепцию будем именовать Пойа-метод). Алгоритмы, реализующие отдельные положения концепции, доведены до уровня программ.

1. Интегральная система

В состав интегральной системы входят лингвистический транслятор для получения онтологического представления задачи, сформулированной на ЕЯ, эвристически-ориентированный решатель и подсистема графического представления решения в виде чертежа, формул и ЕЯ-комментария.

Ещё раз отметим важность ЕЯ-описания условий задачи в соответствии с первым положением универсальной схемы решения о чётком оформлении проблемной ситуации, о том «... как связаны друг с другом различные элементы задачи, как неизвестное связано с данными». [Викентьев, 2018]. Исключение возможности ЕЯ-интерфейса потребует ввода условий на формальном языке, что означает ущербность реализации концепции, поскольку именно переход от ЕЯ-описания к формальному представлению является одним из существенных пунктов универсальной схемы решения Пойа.

Интегральность системы предполагает не только сбалансированное объединение отраженных в системе компонент, но и максимально тесное их взаимодействие. Это означает, в частности, что на каждом этапе решения возможно получить объяснение по выбранному текущему объекту: синтаксической структуре, онтологическому описанию, выбранной эвристике или правилу, ЕЯ-комментарии, графическому объекту (чертежу, визуализированной конструкции, формуле). В последнем случае выбор осуществляется обычным кликом мыши.

При этом объяснение должно быть в пределе доведено до уровня исходной ЕЯ-формулировки задачи, ибо именно оно является первичным описанием. Объяснение в стиле «устанавливается комплетивное отношение между словоформами без адьюнктивного параметра» не является удовлетворительным в интегральной системе.

2. Онтология, решатель, эвристики

Аксиомы, теоремы и описания, имеющие вид «если ..., то ...», будут далее для краткости называться *правилами (rule)* или *утверждениями*. Выбор «правила» подчеркивает компьютерную организацию аксиоматики (по аналогии с **production rule**).

Механизм работы с правилами и их **выполнением** (означивание левой части и формирование структуры онтологии, соответствующей правой части) разработан в общем виде. Этот механизм **инвариантен** к специфике объектов и отношений правила, в его задачи входит только корректное применение правила. Однако для механизма **выбора** правил эта специфика, напротив, **весьма важна**. Поэтому типы объектов в правиле ссылаются на структуры онтологии, отражающие содержательную сторону объектов (иерархии род-вид, часть-целое, ассоциативные связи и т.п.).

Механизм выполнения правил представляет дедуктивную составляющую онтологии, в пределе **гарантирующую** истинность результата. Механизм выбора представляет **эвристическую** составляющую, не гарантирующую результат, но позволяющую избежать перебора вариантов, в том числе на основе использования аналогий, схожести с ранее решенными задачами (прецедентами), учета содержательной стороны, переформулировки или выбора более адекватного представления. Именно **взаимодействие** механизмов **выбора** (на базе онтологии) и **выполнения** обеспечивает связь дедукции и правдоподобных рассуждений.

2.1. Теоретический базис геометрии

Полная система аксиом для элементарной геометрии была построена Давидом Гильбертом [Гильберт, 1948]. Альфредом Тарским была предложена формализация элементарной геометрии как теории 1-го порядка с равенством [Беклемишев, 2008]. Тарский использовал только три предиката: равенство, между и четырехместный предикат, содержательно означающий равенство длин отрезков, задаваемых парами точек.

- \mathbb{R}^2 – множество точек евклидовой плоскости;
- $V(a, b, c)$ – трехместный предикат «точка b лежит на прямой ac между точками a и c »;

- \cong – четырехместный предикат (записываемый $ab \cong cd$) «отрезки, задаваемые парами точек ab и cd , имеют равные длины».

Аксиоматика включает более 10 аксиом. Вот примеры двух из них:

$$\exists x(Bqax \wedge ax \cong bc); \quad (2.1)$$

$$Varc \wedge Bqcb \rightarrow \exists x(Baxq \wedge Bbrx). \quad (2.2)$$

Аксиома (2.1) утверждает, что на прямой можно отложить от точки отрезок заданной длины в заданном направлении. Аксиома (2.2) – аксиома Паша, в стандартной формулировке содержательно выражающая, что прямая, проходящая через внутреннюю точку стороны треугольника и не проходящая через вершины, пересечет во внутренней точке одну из других сторон. Использование аксиомы Паша для доказательства конкретного утверждения приведено в [Курбатов и др. 2016].

Тарским доказаны две важные теоремы [Беклемишев, 2008].

Теорема о полноте. Для любого предложения языка элементарной геометрии, если $(\mathbb{R}^2; =, B, \cong) \models A$, то A логически следует из аксиом.

Теорема о разрешимости. Существует алгоритм проверки произвольной формулы A языка элементарной геометрии на выполнимость в \mathbb{R}^2 .

Отношение $M \models A$ означает «формула A истинна в модели M ».

Однако практическое использование алгоритма Тарского ограничивается экспоненциальным ростом времени решения в зависимости от длины исходного утверждения. Именно это инициирует поиск более эффективных методов решения, в частности, широко известный метод семантических таблиц и его модификации.

Эти методы позволили выявить, что «... основу дедукции составляют некоторые отношения **содержательно-семантического характера**. Очевидны также **широкие эвристические возможности** этого метода для поиска и построения выводов и доказательств» [Бернштейн, 2018]. Именно на эвристической и содержательной специфике задач, представленной в онтологии, делается главный акцент в данной статье.

Теоретический базис важен, поскольку принципиально онтология должна позволить проследить полный вывод содержательных теорем от выбранной аксиоматики (Гильберта или Тарского), а также продемонстрировать эквивалентность аксиоматик.

2.2. Эвристики

Наибольший интерес представляют эвристики, претендующие на предметную независимость. Выделено около 20 таких эвристик – статистические данные о применяемых методах, отбрасывание частей условия и ана-

лиз на пересечение множеств, сведение задачи к алгебраической формулировке и т.д. Ряд важных положений, полезных при формализации индукции и эвристик приведен в [Пойа, 1975], но в работе сделан акцент на [Пойа, 1976]. В этой книге формулировки эвристик более ориентированы на алгоритмически-программную реализацию и в большей мере соответствуют прикладному аспекту (создание обучающей системы с ЕЯ-интерфейсом).

Вопрос алгоритмизации представительного множества эвристик, организации их структуры и индексации, а также возможностей их автоматизированного формирования путем интеллектуального сканирования соответствующих текстов является предметом дальнейшего исследования.

3. Эксперимент

Экспериментальное исследование носило комбинированный характер и включало, в основном, автономную проверку отдельных компонент систем (лингвистический транслятор, онтологический решатель, графическая подсистема) в полуавтоматическом режиме. Подчеркнем, что, хотя эксперименты проводились для геометрической области, разработанные алгоритмы и программная реализация ориентированы на применение для гораздо более широкого класса задач (алгебра, тригонометрия, матлогика, элементы физики). Под элементами физики подразумевается решение качественных физических задач (с привлечением онтологии внешнего мира), а также эвристический выбор формул для физической задачи, сформулированной на ЕЯ. Основная цель при формализации эвристик заключалась в абстрагировании от специфики предметной области и стремлении получить для эвристики наиболее общую формулировку.

3.1. Лингвистическая трансляция

Выше уже отмечалась важность использования ЕЯ; это не только ввод условий задачи, это организация общения для синтеза ЕЯ-описаний: вопросы, рекомендации, обоснования выбора эвристик, описания шагов решения, обобщение решения. Лингвистический анализ соответствует первому пункту схемы Пойа – «понимание проблемной ситуации». Его основной целью является получение формальной структуры в онтологии, наиболее удобной для последующего автоматического решения.

Этот этап нетривиален, что демонстрирует эксперимент с трансляцией задачи построения прямоугольного треугольника по гипотенузе и биссектрисе прямого угла. Конкретно, при трансляции заданные по условию объекты онтологии получают статус «fix» (фиксирован), а требующие нахождения помечаются знаком вопроса «?» (рис. 1).

Без специальной эвристики выбор между представлениями не дифференцируется и зависит от базовых инструментов построения (циркуль и линейка). Эвристика предлагает выбор первого представления, как содержащего меньшее число неизвестных.

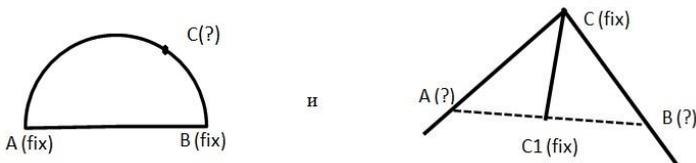


Рис. 1. Два формальных представления задачи

3.2. Примеры задач

Ниже приводятся примеры наиболее интересных задач, на которых отработывались вопросы алгоритмизации эвристик и проводились эксперименты по программной реализации алгоритмов.

3.2.1. Эмпирические эвристики. Задача 1: для точки внутри равностороннего треугольника заданы расстояния до вершин.

Требуется: Построить равносторонний треугольник.

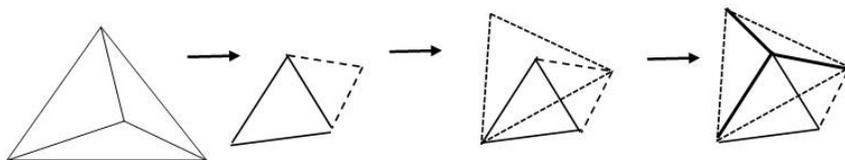


Рис. 2. Эмпирическое решение алгоритма (использование эвристик и модели)

Схема решения, предлагаемая алгоритмом, значительно отличается от приведенной в [Тригг, 1975] задачи № 201, эвристические шаги алгоритма отражены на рис. 2; эвристики предметно-зависимы, но допускают обобщение («построить треугольник по заданным сторонам» – «построить объект по заданным элементам»; «оценить расстояние» – «предварительная оценка неизвестного»; «обращение к чертежу за конкретными данными» – «обращение к модели за эмпирическими данными»).

3.2.2. Обобщение по онтологической структуре. Задача 2: длина катета **a** и сумма длин гипотенузы **c** и другого катета **b** (рис. 3).

Требуется: построить прямоугольный треугольник.

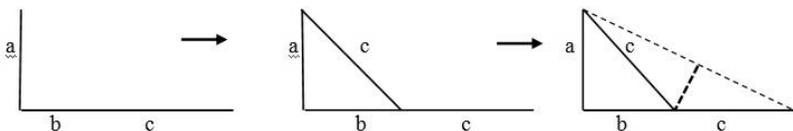


Рис. 3. Этапы решения задачи

Онтологическая структура задачи включает два конкретных элемента (прямой угол и операцию суммирования). Наличие в онтологии соответствующих иерархий позволяет перейти от конкретных к более общим значениям (произвольный угол) или к операциям, связанным ассоциативно (разность или отношение). В этом случае аналогия будет формализована как попытка выполнить те же операции, которые получены после решения исходной задачи.

3.2.3. Эмпирическая догадка для теоремы Чевы. Важным положением методологии Поля является утверждение: «лучший способ изучить – это открыть самому». В трактовке «изучить» и «открыть» как «автоматически пополнить знания онтологии» проводился эксперимент получения эмпирической догадки теоремы Чевы. Это классическая теорема геометрии треугольника, устанавливающая зависимость отношений отрезков, разбиваемых основаниями чевиан (являющимися обобщением понятий высоты, биссектрисы и медианы). Эксперимент состоял в автоматической генерации целочисленных значений для разбиения сторон, по которым алгоритм эмпирически выдвигал догадку, эквивалентную теореме Чевы.

Результаты эксперимента продемонстрировали успешность алгоритмизации и компьютерного воплощения более 10 предметно-независимых эвристик [Воробьев, 2018].

Заключение

Предложенная концепция и её экспериментальная разработка в направлении алгоритмического и программного воплощения идей Поля, на наш взгляд, открывает перспективы создания систем искусственного интеллекта, интегрирующих результаты лингвистической трансляции, онтологически-ориентированных решателей и концептуальной графики. Проведенное тестирование в целом подтверждает перспективность исследований.

В фундаментальном аспекте такие исследования должны помочь пониманию когнитивных механизмов и моделей, используемых человеком при решении задач. В прикладном аспекте – позволят создать обучающие системы качественно нового уровня, обеспечивающие поддержку естественно-языкового общения, автоматического решения нетривиальных задач и объяснения процесса решения.

Список литературы

- [Беклемишев, 2008], Беклемишев Л.Д. Введение в математическую логику. – https://www.hse.ru/data/2011/11/24/1271317411/kurs_bekl.pdf.
- [Бернштейн, 2018] Бернштейн В. С., Ивлев Ю. В. Метод семантических таблиц. – <http://gtmarket.ru/concepts/6938>.
- [Викентьев, 2018] Викентьев И.Л. «Универсальная» схема решения по Дьёрдо Пойа. – <http://vikent.ru/enc/7738>.
- [Воробьев, 2018] Воробьев А.Б. – <http://www.eia--dostup.ru/PROJECT-15-07-03847.htm>.
- [Гильберт, 1948] Гильберт Д. Основания геометрии. – Л: Гостехиздат, 1948.
- [Курбатов и др. 2016] Курбатов С.С., Воробьев А.Б. Онтологический решатель геометрических задач по естественно-языковому описанию // Сб. трудов XV Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2016. В 3-х т. Т. 1. – Смоленск: Универсум, 2016.
- [Поя, 1975] Пойа Д., Математика и правдоподобные рассуждения. – М: Наука, 1975.
- [Поя, 1976] Пойа Д., Математическое открытие. – М: Наука, 1976.
- [Тригг, 1975] Тригг Ч., Задачи с изюминкой. – М: Мир, 1975.

УДК 510.635

НАДСТРОЙКА ВРЕМЕНИ НАД СИТУАЦИОННО-СОБЫТИЙНЫМ ИСЧИСЛЕНИЕМ

М.М. Зернов (*zmmioml@yandex.ru*)
Филиал Национального исследовательского
университета «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск

Работа продолжает серию публикаций, посвящённых разработке ситуационно-событийного исчисления со многими исходами и одновременными действиями (ССИМИОД). Рассматривается надстройка дискретного ветвящегося времени над ССИМИОД на основе атрибута системного времени и продолжительности событий/действий.

Ключевые слова: ситуационное исчисление, одновременные действия, теория 1 порядка, продолжительность действий

Введение

Преимуществами ситуационных исчислений разнообразного вида как основы для языка описаний действий интеллектуального агента [McCarthy, 2002; Lin, 2007; De Giacomo et al., 2000; De Giacomo et al., 2016b; Schwering et al., 2017] являются их верифицируемость [De Giacomo et al., 2016a], удобство описания целей в виде формул исчисления предикатов, гибкость описания относительно информационных запросов.

В работах [Зернов, 2016; Zernov, 2017] ранее был предложен вариант построения ситуационных исчислений, отвечающих требованиям возможности учёта как нескольких вариантов исходов применяемых действий, так и одновременности действий. Исчисление строилось как многосортная теория 1 порядка и получило название ситуационно-событийного исчисления со многими исходами и одновременными действиями (ССИМИОД).

Одновременность действий в ССИМИОД, в отличие от аналогов [McCarthy, 2002; Mueller, 2007], достигалась путём формирования и применения списков пар «событие/действие – объект приложения». При этом «одновременность» означала, что, не смотря на последовательное применение действий к объектам, условия применимости действий списка проверялись относительно одной и той же исходной ситуации. Вопрос же непосредственного учёта времени оставался нераскрытым.

В какой-то мере учёт продолжительных и при этом «конкурирующих» действий реализован в языке ConGolog [De Giacomo et al., 2000; De Giacomo et al., 2016a]. Здесь над ситуационным исчислением строятся конструкции языка высокого уровня, представленные формулами 1-го и 2-го порядка. Конкурентное выполнение процессов строится как попеременное выполнение атомарных действий. Поддерживается как недетерминированное исполнение инструкций (программ разных агентов), так и исполнение с приоритетом. Вводится механизм прерываний, напоминающий механизм событий в [McCarthy, 2002]. Продолжительность действий реализуется посредством замены продолжительного фонового действия состоянием его выполнения, в котором всякое другое действие, имеющее продолжительность, приводит к изменению предметных параметров ситуации по временной зависимости. В работах [De Giacomo et al., 2016a; De Giacomo et al., 2016c] тех же авторов обосновываются возможности по верификации темпоральных свойств ConGolog-программ (как и лежащих в их основе ситуационных исчислений) посредством аппарата μ -исчисления, поддерживающего как линейное, так и ветвящееся время. Тем не менее, одновременное выполнение атомарных действий остаётся невозможным.

Заметим, что требования учёта альтернативности исходов действий, возможностей по анализу различных наборов действий, применяемых в некоторой ситуации, а также необходимость постоянного анализа состояния мира с целью проверки условий возникновения событий приводят к концепции дискретного ветвящегося времени, как основной для ССИМИОД.

1. Основные черты ситуационно-событийного исчисления со многими исходами и одновременными действиями

ССИМИОД – ситуационное исчисление, построенное в соответствии со следующими принципами [Зернов, 2016; Zernov, 2017].

Используется формализм многосортной логики. События и действия рассматриваются как один сорт. У действий/событий может быть несколько исходов (вариантов), каждому из которых соответствует своя вероятность/возможность, а также аксиома эффекта действия. Действия и события рассматриваются в контексте объектов мира, а их эффекты являются контекстнозависимыми. Для учёта одновременности действий, используются списки пар «событие/действие – объект приложения». Каждому исходу действий сопоставляется возможность исхода, аналогично, каждой ситуации сопоставляется возможность пребывания мира в ситуации. Для возможностей определены операции сложения и умножения, определяя которые, можно привлекать теорию вероятностей или теорию возможности.

Введём ряд условных обозначений и допущений. Предикаты, функции, константы и имена сортов будем писать с заглавной буквы, а переменные со строчной. Под $x:Q$ будем понимать запись «переменная x сорта Q ».

Запись $Q = Q_1 \times Q_2 \times \dots \times Q_n$ означает, что сорт Q является декартовым произведением сортов Q_1, Q_2, \dots, Q_n . Элементы подобных сортов будем указывать как в виде одного символа, так и в виде n -ки (x_1, x_2, \dots, x_n) , где $x_1:Q_1, x_2:Q_2, \dots, x_n:Q_n$. Под *List of Q* будем обозначать список из элементов сорта Q .

С помощью записи $F(x_1:Q_1, x_2:Q_2, \dots, x_n:Q_n):Q$ указывается, что функциональный символ F арности n применим к переменным сортам Q_1, Q_2, \dots, Q_n соответственно порядку записи и образует терм сорта Q .

Аналогично, запись вида $P(x_1:Q_1, x_2:Q_2, \dots, x_n:Q_n)$ обозначает, что предикатный символ P арности n применим к переменным сортам Q_1, Q_2, \dots, Q_n соответственно порядку записи. В случаях, когда из контекста ясен сорт переменной, будем избегать его прямого указания.

В ССИМИОД введено базовое множество сортов, включающее, помимо прочего, множество сортов объектов – сорт *Object* и его подсорта, множество сортов параметров ситуаций (обобщённый сорт параметров *Fluent*, подсорт логических параметров *RelFluent*, подсорт предметных параметров *FuncFluent*), сорт ситуаций *Sit*, сорт событий/действий *Event*, сорт вариантов исходов событий/действий *Var*, сорт возможностей *Possibility*.

Введён сорт пар событие-объект применения $EventObj = Event \times Object$ и сорт списка таких пар $EventObjList = List\ of\ EventObj$. Запись $x \in list$ означает, что элемент x входит в список $list$.

Применяются следующие функции и предикаты.

$Granted(s:Sit, a: Event, o: Object)$ – предикат, определяющий допустимость действия a в контексте объекта o в ситуации s .

$Occurs(s: Sit, e: Event, o: Object)$ – предикат, определяющий факт возникновения события e в контексте объекта o в ситуации s .

$Enabled(s:Sit, v: Var, o: Object)$ – предикат, определяющий допустимость варианта v исхода некоторого события для объекта o в ситуации s .

$Result(s:Sit, a: Event, o: Object, r:Sit)$ – предикат, устанавливающий, что ситуация t является результатом применения к ситуации s события/действия a в контексте объекта o .

$ResultL(s:Sit, leo: EventObjList, t:Sit)$ – ситуация t является результатом применения к ситуации s списка событие-объект leo .

$OccursL(s:Sit, leo: EventObjList)$ – предикат, устанавливающий, что в ситуации s возникают пары событие-объект из списка leo .

$OccursMaxL(s:Sit, leo: EventObjList)$ – предикат, аналогичный $OccursL()$, но с условием, что иных событий в ситуации s не возникает.

$GrantedL(s:Sit, leo: EventObjList)$ – предикат, устанавливающий, допустимость списка пар событие-объект leo в ситуации s .

$Holds(s: Sit, o: Object, rf: RelFluent)$ и $Value(s: Sit, o: Object, ff: FuncFluent):Any$ – предикат и функция, устанавливающие значения логических и предметных параметров соответственно.

$Changes(s: Sit, e: Event, o: Object, f: Fluent)$ – предикат говорящий, что событие e в ситуации s меняет параметр f в контексте объекта o .

$Apply(s: Sit, v: Var, o: Object,):Sit$ – результат применения варианта исхода v относительно объекта o в ситуации s .

$Poss(x: Sit \cup Var):Possibility$ – функция, значением которой является оценка возможности ситуации или варианта исхода действия.

$Act(v: Var):Event$ – функция, значением которой является событие/действие, к которому относится вариант v .

Для каждого внешнего события (действия) задаётся аксиома применимости, определяющая значение предиката $Granted()$. Для каждого внутреннего события задаётся аксиома возникновения события, определяющая значение предиката $Occurs()$. Для каждого варианта исхода события/действия задаётся аксиома допустимости варианта в ситуации, определяющая значение предиката $Enabled()$.

Для каждого варианта исхода каждого действия/события задаётся аксиома эффекта действия, задающая новые значения параметров ситуации в контексте объекта применения действия/события.

Задан набор предметно-независимых аксиом, определяющих базовые механизмы определения результата применения списка событие/действие-объект, схемы индукции и аксиомы кадра.

2. Продолжительное ситуационно-событийное исчисление со многими исходами и одновременными действиями

2.1. Предикаты и функции

Настройку времени над ССИМИОД будем называть продолжительным ситуационно-событийным исчислением со многими исходами и одновременными действиями или сокращённо ССИМИОД2.

Рассмотрим сорта, константы, функции и предикаты, объявляемые в дополнение к уже имеющимся в ССИМИОД или переопределяемые (расширяемые) с учётом появления новых сортов.

Время и продолжительность действий введём через специальный объект «система» и его атрибуты. Ключевую роль в продолжении действия играет доступность вариантов.

Введём сорт $BranchVar$ – варианты развития во времени события/действия. Вариант развития является агрегирующей сущностью для частных исходов, заданных для каждого шага исполнения действия.

Добавим специальный объект-константу $System: SYSTEM \leq Object$, где $SYSTEM$ – сорт, включающий единственный объект $System$.

Данный объект отвечает за общесистемные атрибуты, непосредственно в ССИМИОД2 введём 2:

- *Time: FuncFluent* – время;
- *NeedsAdvance: RelFluent* – флаг необходимости продвижения времени.

Вводим специальное событие продвижения времени *TimeShift: Event*, для которого определим единственный вариант развития *Shift: BranchVar*.

Стоит отметить, что на практике варианты развития события/действия могут иметь различную продолжительность. Таким образом, в отличие от сложившейся традиции, функция продолжительности определяется на сорте не событий/действий, а вариантов развития: *Dur(bv: BranchVar): UInteger*. Значение функции – целое неотрицательное число.

Act(bv: BranchVar): Event, *Poss(bv: BranchVar)*, *Enabled(s: Sit, bv: BranchVar, o: Object)* – функции и предикат, ранее определённые только для элементов сорта *Var*, теперь доопределяются и для вариантов развития.

Непосредственно применяемый исход для определённого момента времени (с начала исполнения события/действия) описывается термом на основе функции *Timevar(bv: BranchVar, UInteger): Var*.

Для выражения невозможности прерывания действия введём предикат *Blocking(e: Event)*.

Предикат *Busy(s: Sit, o: Object, bv: BranchVar, t: UInteger)* определяет состояние занятости объекта *o* в ситуации *s* исполнением варианта развития *bv* (на момент *t* относительно начала исполнения соответствующего события/действия).

Предикат *Forceadvance(e: Event)* задаёт факт того, что событие/действие требует продвижения времени, частично дублирует факт наличия у события/действия варианта с ненулевой продолжительностью.

Предикат *Restricts(a1: Event, o1: Object, a2: Event, o2: Object)* определяет пары действие-объект, которые взаимно исключают друг друга. Нужен для формирования совместимых списков применяемых действий.

Предикат *Valid(s: Sit, leo: EventObjList)* определяет корректность списка пар действие-объект в ситуации *s* в соответствии с требованиями продолжения исполнения ранее начатого действия и отсутствия взаимоисключающих действий.

2.2. Предметно-независимые аксиомы

Ниже представлен набор аксиом, не зависящих от предметной области и описывающих общие механизмы порождения и применения вариантов исходов. Аксиомы наследования вариантом исхода свойств варианта развития во времени (наследуется событие/действие, значение возможности):

$$\begin{aligned}
& Act(Realvar(bv, x)) = Act(bv), \\
& \neg Forceadvance(Act(bv)) \rightarrow Poss(Timevar(bv, 0)) = Poss(bv), \\
& \neg Forceadvance(Act(bv)) \rightarrow Dur(bv) = 0, \\
& Forceadvance(Act(bv)) \rightarrow Poss(Timevar(bv, 1)) = Poss(bv).
\end{aligned}$$

Заметим, что значение возможности наследуется только для вариантов исхода, соответствующим начальным моментам времени (0 для мгновенного и 1 для продолжительного события/действия).

Аксиома значения возможности для вариантов исхода – продолжений начатых действий (поскольку на момент продолжения, вариант развития уже был выбран, то возможность варианта исхода в дальнейшем принимается равной 1):

$$\begin{aligned}
& (Forceadvance(Act(bv))) \wedge (t > 1) \wedge \\
& \wedge (t < Dur(bv)) \rightarrow Poss(Timevar(bv, t)) = 1.
\end{aligned}$$

Аксиомы допустимости вариантов исхода в процессе выполнения действия (допустим стартовый вариант или вариант, соответствующий текущему времени выполнения):

$$\begin{aligned}
& Busy(s, o, bv, t) \wedge (t < Dur(bv)) \rightarrow Enabled(s, Timevar(bv, t), o), \\
& Enabled(s, bv, o) \wedge \neg Busy(s, o, bv, t) \rightarrow Enabled(s, Timevar(bv, 1), o).
\end{aligned}$$

Здесь вторая аксиома распространяет условие допустимости варианта развития во времени на его реализацию для первого шага исполнения.

Аксиомы допустимости действий в процессе выполнения (начатое, неоконченное действие допустимо):

$$\begin{aligned}
& Busy(s, o, bv, t) \wedge (t < Dur(bv)) \wedge \neg Holds(s, System, NeedsAdvance) \rightarrow \\
& \rightarrow Granted(s, Act(bv), o).
\end{aligned}$$

В зависимости от требований, предъявляемых предметной областью, данную аксиому можно переформулировать, считая допустимыми только начатые непрерываемые действия, тогда как для прерываемых проверять на каждом шаге допустимость продолжения, исхода из предметно заданных аксиом. Условие $\neg Holds(s, System, NeedsAdvance)$ позволяет выполнять продолжительное действие в контексте объекта не более одного раза для каждого момента времени. По сути, представленная выше аксиома переводит продолжительные события в разряд действий, поскольку при продолжении их исполнения, для них определён предикат *Granted*, что в соответствии с требованием однородности списков событий/действий включает соответствующие элементы в список исполняемых действий.

Аксиома симметричности ограничений:

$$Restricts(a_1, o_1, a_2, o_2) \leftrightarrow Restricts(a_2, o_2, a_1, o_1).$$

Аксиомы сохранения состояния занятости объекта действием в пределах момента времени:

$$\begin{aligned} & \text{Busy}(s, o, bv, t) \wedge (a \neq \text{TimeShift}) \wedge \text{Blocking}(\text{Act}(bv)) \rightarrow \\ & \quad \rightarrow \text{Busy}(\text{Result}(s, a, o_1), o, bv, t), \\ & \text{Busy}(s, o, bv, t) \wedge (a \neq \text{TimeShift}) \wedge \neg \text{Blocking}(\text{Act}(bv)) \wedge \\ & \quad \wedge \neg \text{Restricts}(a, o_1, \text{Act}(bv), o) \rightarrow \text{Busy}(\text{Result}(s, a, o_1), o, bv, t). \end{aligned}$$

Здесь, первая аксиома показывает, что в результате применения любого действия (кроме продвижения времени), сохраняем состояние занятости объектов непрерываемыми действиями. Для прерываемых же закладывается возможность замены состояния занятости объекта на занятость другим действием, исключаяющим прерываемое.

Аксиома переноса состояния занятости объекта действием при продвижении времени, с учётом продолжительности варианта:

$$\begin{aligned} & \text{Busy}(s, o, bv, t) \wedge (t < \text{Dur}(bv)) \rightarrow \\ & \quad \rightarrow \text{Busy}(\text{Result}(s, \text{TimeShift}, \text{System}), o, bv, t + 1). \end{aligned}$$

Аксиомы свойств продолжительных событий/действий (требуют продвижения времени, изменяют атрибут необходимости продвижения времени, устанавливают состояние занятости объекта действием):

$$\begin{aligned} & (\text{Dur}(bv) > 0) \rightarrow \text{Forceadvance}(\text{Act}(bv)), \\ & \text{Forceadvance}(\text{Act}(bv)) \rightarrow \text{Changes}(s, \text{Act}(bv), \text{System}, \text{NeedsAdvance}), \\ & \text{Forceadvance}(\text{Act}(v)) \rightarrow \text{Holds}(\text{Apply}(s, o, \text{Timevar}(bv, t)), \text{System}, \text{NeedsAdvance}), \\ & \text{Forceadvance}(\text{Act}(bv)) \rightarrow \text{Busy}(\text{Apply}(s, o, \text{Timevar}(bv, 1)), bv, 1). \end{aligned}$$

Аксиомы, описывающие событие *TimeShift* (возникает при установке параметра *NeedsAdvance*, сбрасывает его, продвигает время):

$$\begin{aligned} & \text{Holds}(s, \text{System}, \text{NeedsAdvance}) \rightarrow \text{Occurs}(s, \text{System}, \text{TimeShift}), \\ & \neg \text{Forceadvance}(\text{TimeShift}), \text{Act}(\text{Shift}) = \text{TimeShift}, \text{Poss}(\text{Shift}) = 1, \\ & \text{Value}(\text{Apply}(s, \text{System}, \text{Realvar}(\text{Shift}, 0)), \text{System}, \text{Time}) = \\ & \quad = \text{Value}(s, \text{System}, \text{Time}) + 1, \\ & \neg \text{Holds}(\text{Apply}(s, \text{System}, \text{Realvar}(\text{Shift}, 0)), \text{System}, \text{NeedsAdvance}). \end{aligned}$$

Аксиомы корректности списков событий/действий:

$$\begin{aligned} & \text{Valid}(s, leo) \leftrightarrow \\ & \left(\forall o \forall bv (\text{Busy}(s, o, bv, t) \wedge \text{Blocking}(\text{Act}(bv)) \rightarrow ((\text{Act}(bv), o) \in leo)) \wedge \right. \\ & \left. \leftrightarrow \left(\left((\text{Act}(bv), o) \in leo \right) \rightarrow \neg \exists (a, o_1) \left(\left((a, o_1) \in leo \right) \wedge \right. \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \left. \wedge \text{Restricts}(\text{Act}(bv), o, a_1, o_1) \right) \right) \right) \right), \end{aligned}$$

$$Valid(s, leo) \leftrightarrow \left(\forall o \forall bv \left(\left(Busy(s, o, bv, t) \wedge Blocking(Act(bv)) \rightarrow ((Act(bv), o) \in leo) \right) \wedge \right. \right. \\ \left. \left. \wedge \left(\left(Busy(s, o, bv, t) \wedge \neg Blocking(Act(bv)) \rightarrow ((Act(bv), o) \in leo) \right) \vee \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \vee \left(Restricts(a, o_1, Act(bv), o) \wedge ((a, o_1) \in leo) \right) \right) \right) \wedge \right. \\ \left. \left. \wedge \left(((Act(bv), o) \in leo) \rightarrow \neg \exists (a_1, o_1) \left(((a_1, o_1) \in leo) \wedge Restricts(Act(bv), o, a_1, o_1) \right) \right) \right) \right)$$

Иначе говоря, если есть непрерываемое событие/действие, выполняемое в контексте некоторого объекта, соответствующая пара «событие/действие–объект» должна присутствовать в списке. Для прерываемых действий условие сложнее – действие может быть заменено на другое, ограничивающее данное. Также в списке не должно присутствовать несовместимых пар «событие/действие–объект».

2.3. Предметно-зависимые аксиомы

Для каждого события/действия, подразумевающего продолжительное исполнение, задаём варианты реализации продвижения во времени сорта *BranchVar*. Можно задать варианты *BranchVar* и для мгновенных действий (например, в предыдущем разделе задан вариант *Shift* для события *TimeShift* с единственной реализацией *Realvar(Shift, 0)*).

Для каждого варианта реализации продвижения во времени, указываем явно событие/действие с помощью функции *Act()*. Для вариантов реализации продолжительных действий указываем продолжительность посредством функции *Dur()*. Если есть варианты развития *bv* некоторого события/действия *a* с ненулевой продолжительностью, то указывать явно *Forceadvance(a)* нет необходимости. С другой стороны, для вариантов развития (если они есть) мгновенных событий/действий нет необходимости указывать нулевую продолжительность. Достаточно указать $\neg Forceadvance(a)$.

Заметим, что в отличие от предыдущего уровня исчисления («чистого» ССИМИОД), варианты исходов действий могут задаваться не индивидуальными константами, а термами вида *Realvar(bv, t)*. Соответственно, аксиомы эффекта действия могут оперировать параметризованными вариантами и явно зависеть от времени выполнения.

Для каждого продолжительного события/действия, следует задать, прерываемое оно или нет (*Blocking(a)* или $\neg Blocking(a)$).

Для альтернативных пар действий обязательно нужно указать предикат *Restricts()*, чтобы исключить их одновременное применение.

Заключение

Представленный алфавит и набор аксиом задают второй уровень ситуационно-событийного исчисления со многими исходами и одновременными действиями – ССИМИОД2, учитывающий продолжительность вариантов развития событий/действий и возможность их прерывания. Типовая схема процесса формирования списков применяемых пар «действие–объект», «событие–объект», как продолжительных, так и мгновенных, может быть различной. Она зависит от наличия/отсутствия продолжительных событий или действий, допустимой длины цепочки срабатывающих событий, последовательности применения событий и действий.

В дальнейшем, планируется дополнение предложенного исчисления с точки зрения введения строгого порядка над элементами сортов событий/действий и объектов, что должно сократить возможное количество генерируемых списков пар «событие/действие–объект» и дать инструменты практического применения ССИМИОД2. Другим направлением последующих исследований является анализ предложенного исчисления с точки зрения полноты, непротиворечивости, эффективных процедур вывода, сложности цепочек вывода.

Список литературы

- [Зернов, 2016] Зернов М.М. Ситуационно-событийное исчисление со многими исходами и одновременными действиями // Тр. XV Нац. конф. по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2016). Смоленск, 2016. Т. 1.
- [De Giacomo et al., 2000] De Giacomo G., Lespérance Y., Levesque H.J. ConGolog, a concurrent programming language based on the situation calculus // Artificial Intelligence. 2000. Vol. 121. No. 1–2.
- [De Giacomo et al., 2016a] De Giacomo G. et al. Verifying ConGolog Programs on Bounded Situation Calculus Theories // AAAI. 2016.
- [De Giacomo et al., 2016b] De Giacomo G. et al. Agent planning programs // Artificial Intelligence. 2016. Vol. 231.
- [De Giacomo et al., 2016c] De Giacomo G. et al. Progression and verification of situation calculus agents with bounded beliefs // Studia Logica. 2016. Vol. 104. No. 4.
- [Lin, 2007] Lin F. Chapter: Situation calculus. In Lifschitz, V.; van Harmelen, F.; and Porter, F., eds., Handbook of Knowledge Representation. Elsevier. 2007.
- [McCarthy, 2002] McCarthy J. Actions and other events in situation calculus // In Proc. of the Eighth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR2002). 2002.
- [Mueller, 2007] Mueller E. Discrete Event Calculus with Branching Time // In Proc. of the 8th Int. Symposium on Logical Formalizations of Commonsense Reasoning. 2007.
- [Zernov, 2017] Zernov M. Situation Calculus for Multiple Action Representation // In Proc. of the 18th International Conference on Computer Systems and Technologies, CompSys-Tech'17, June 23-24, Ruse, Bulgaria, ACM International Conference Proceeding Series. ACM Inc., N.Y. USA. 2017. Vol. 1369.

УДК 004.89

КОНЦЕПЦИЯ ОБОЛОЧКИ ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ ВЕРИФИКАЦИИ ИНТУИТИВНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ¹

А.С. Клещёв (*kleshev@iacp.dvo.ru*)

В.А. Тимченко (*vadim@dvo.ru*)

Институт автоматки и процессов управления
ДВО РАН, Владивосток

Представлена концепция программной оболочки для интерактивных систем верификации интуитивных математических доказательств. Рассмотрена приближенная к математической практике конструирования доказательств формально-логическая система, которая может быть положена в основу такой оболочки, и представлены механизмы её расширения. Описаны языки для представления баз формализованных математических знаний и способов рассуждений, а также модель полных доказательств.

Ключевые слова: верификация интуитивных доказательств, логическое исчисление, база формализованных способов рассуждений, база математических знаний, модель доказательств

Введение

Верификация интуитивных доказательств теорем является одной из важнейших задач в математических исследованиях [Magis, 2015]. Доказательства, публикуемые в математической литературе, в теории доказательств получили название интуитивных. Правильным доказательством может считаться только полное доказательство, выполненное в рамках формальной системы, для которой справедливо утверждение о том, что если для математического утверждения может быть построено доказательство, то оно истинно [Мендельсон, 1976]. Однако в математической практике такие доказательства не строятся в силу их громоздкости. В 1994 году был опубликован QED-манифест [QED, 1994], в котором выдвинуты амбициоз-

¹ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты №№ 17-07-00299, 18-07-01079) и КПФИ «Дальний Восток» (проект 18-5-078).

ные цели – построение корпуса механически верифицированной математики, в том числе формализации математических доказательств, и проверки их правильности.

Перспективным направлением для обеспечения правильности интуитивных доказательств является разработка программных оболочек для создания *систем поддержки построения доказательств* (СППД) (PVS, Twelf, Coq, HOL Light, Isabelle/HOL, LCF и др.) [Maric, 2015; Asperti, 2009; Harrison et al., 2014]. В них предлагаются метаязыки для формализации математических знаний и дедуктивных систем. В качестве метаязыков обычно используются языки, основанные на функционально-императивной парадигме либо на некотором варианте логики предикатов высших порядков, или типизированном λ -исчислении с полиморфной системой зависимых типов, общепринятым синтаксисом арифметических, теоретико-множественных и, возможно, иных выражений. Достоинством разработанных СППД является то, что для используемых в них формальных систем справедливо утверждение о том, что истинность математического утверждения следует из возможности построения его доказательства. Многие из современных СППД успешно применялись для верификации доказательств сложных теорем [Maric, 2015].

Однако существующие СППД до сих пор не востребованы большинством математиков. Это подтвердил опубликованный в 2007 году пересмотренный манифест [Wiedijk, 2007], в котором сказано, что за время, прошедшее с момента опубликования исходного манифеста, не было сделано существенного продвижения в достижении его целей. Там же указывалась и одна из основных причин этого: формализованная математика совершенно непохожа на реальную. Основное препятствие к широкому использованию СППД состоит в том, что в них используются формальные системы, далекие от представлений математиков, выполняющих такую работу. Формализация теорем и их доказательств остается сложным процессом: по-прежнему существует «крутая кривая» обучения, отражающая сложности принятия математическим сообществом такого стиля работы с доказательствами [Maric, 2015].

В цикле работ [Гаврилова и др., 2006] для верификации математических доказательств была высказана идея приближения формальной модели, лежащей в основе СППД, к математической практике. В настоящей работе описываются концепция программной оболочки для систем верификации интуитивных математических доказательств, а также приближенная к математической практике конструирования доказательств формальная система и механизмы её расширения, которые могут быть положены в основу такой оболочки.

1. Концепция оболочки

Как известно, математический диалект и способы математических рассуждений не только не являются фиксированными, явно описанными, но и продолжают развиваться по мере развития математики. Поэтому нет никакой возможности построить такую фиксированную формальную систему, которую можно было бы положить в основу СППД, и «проекция» с языка математического диалекта на которую не была бы чрезвычайно громоздкой и сложно осуществимой для большинства математиков. Чтобы иметь возможность приближать формальные системы к математической практике, они должны быть расширяемыми. При этом возможность их расширять должны иметь не только разработчики СППД, но прежде всего пользователи таких систем – члены математического сообщества.

Одним из способов обеспечения такой возможности является разработка для них программной оболочки, которая позволяла бы создавать прикладные СППД, в основу которых уже положено *ядро* формальной системы, приближенной к математической практике, и предоставляла бы *механизмы расширения* этой системы. Расширяемыми и изменяемыми должны быть следующие компоненты формальных систем: *язык представления математических знаний*, на котором описываются аксиомы, теоремы, леммы, определения, и *множество формализованных способов рассуждений*, доступных математику при построении доказательств теорем. Для этого способы рассуждения должны быть представлены явно, а *язык представления формализованных способов рассуждений* также должен быть расширяемым.

Для обеспечения расширяемости формальных систем при их разработке используется подход, основанный на контекстно-зависимых грамматиках и онтологиях. Расширяемость достигается за счет того, что контекстно-зависимые грамматики абстрактного синтаксиса языков представления математических знаний и формализованных способов рассуждений имеют в СППД явное декларативное представление, специфицированное в соответствии с метамоделью [Gribova et al., 2015a; Gribova et al., 2015b; Грибова и др., 2016]. Благодаря этому, во-первых, способы рассуждений имеют в СППД явное декларативное представление, и, следовательно, пользователи могут изменять их множество, а также сами способы рассуждений; во-вторых, пользователи имеют возможность включать в грамматику языка представления математических знаний новые правила либо модифицировать существующие. Это же относится и к контекстным условиям.

Остальные разделы посвящены краткому описанию формальной системы, которая может быть положена в основу прикладных СППД (создаваемых с использованием оболочки) и механизмов её расширения. Как и всякая формально-логическая модель, описываемая формальная система

должна определять язык для представления математических знаний и согласованное с этим языком исчисление, в котором должны строиться правильные полные доказательства. Определение исчисления включает в себя определение методов доказательства математических утверждений; способов рассуждений, доступных математику в процессе конструирования доказательств теорем, и языка для их представления; модели полных доказательств.

2. Язык представления математических знаний

Математическое утверждение имеет вид: $(v_1: t_1) \dots (v_n: t_n).f$. Здесь f – математическая формула, содержащая вхождения предметных переменных v_1, \dots, v_n , а $(v_i: t_i)$ ($i = 0, \dots, n$) – описание предметной переменной v_i , t_i – математический терм, задающий область возможных значений переменной v_i .

Выделяются следующие типы формул: равенство и неравенство термов; арифметические отношения над числовыми термами; теоретико-множественные отношения над термами; формулы с пропозициональными связками; кванторные формулы; аппликация предиката. Выделяются следующие типы термов: арифметические термы; различные виды интервалов, а также множеств, которые они образуют; кванторные термы; термы-операции над множествами, а также обозначения некоторых фиксированных множеств; термы, связанные с отображениями; условный терм, моделирующий конструкцию: «если f_1 , то t_1 , ... если f_n , то t_n ».

Расширение языка представления математических утверждений обеспечивается добавлением новых видов термов и формул. Оно состоит в добавлении новой конструкции в грамматику языка, описании абстрактного синтаксиса этой новой конструкции, добавлении нужных правил в текстовую грамматику языка, а также, возможно, описании связанных с новой конструкцией контекстных условий.

Расширение базы математических знаний состоит в добавлении новых математических знаний – определений, аксиом, теорем и лемм в существующие в базе разделы математики; а также в создании новых разделов/подразделов математики и наполнении их соответствующими математическими знаниями.

3. Методы доказательств

Исчисление, в рамках которого строятся доказательства, включает методы доказательства *целей*, основанные на трёх правилах. *Цель* представляет собой пару: *математическое утверждение* и, возможно пустой, *список предположений* – множество математических утверждений, из справедли-

ливости которых следует справедливость данного утверждения. Под *справедливым утверждением* будем понимать математическую аксиому, определение, доказанную теорему/лемму, либо *способ рассуждения* (см. раздел 4).

1. Правило доказательства импликации (естественного вывода).

Позволяет свести доказательство цели, *математическое утверждение* которой имеет форму импликации $f_1 \& \dots \& f_k \Rightarrow f$, а *список предположений* есть p_1, \dots, p_n ($n \geq 0$), к доказательству цели, *математическое утверждение* которой есть заключение этой импликации – f , а *список предположений* есть $p_1, \dots, p_n, f_1, \dots, f_k$.

2. **Правило унификации.** Если φ справедливое утверждение, и существует подстановка θ вместо переменных, входящих в φ , такая, что результат применения этой подстановки к φ совпадает с *математическим утверждением* f доказываемой цели или синтаксически эквивалентен f , то f справедливо. *Список предположений* цели является пустым.

3. **Modus ponens (правило отделения)**, используемое для *декомпозиции цели, декомпозиции предположения* цели, или для *вывода*.

3.1. **Декомпозиция цели.** Если требуется доказать цель, *список предположений* которой есть p_1, \dots, p_n , ($n \geq 0$), а *математическое утверждение* f унифицируемо с заключением справедливого утверждения, имеющего вид $\varphi_1 \& \dots \& \varphi_m \Rightarrow \varphi$, и θ – унификатор f и φ , то это доказательство сводится к доказательству целей, *математические утверждения* f_1, \dots, f_m которых являются соответственно результатами применения θ к утверждениям в условии этой импликации $f_1 = \varphi_1\theta, \dots, f_m = \varphi_m\theta$, а *список предположений* каждой цели есть p_1, \dots, p_n .

3.2. **Декомпозиция предположения.** Если требуется доказать цель, *математическое утверждение* которой есть f , а *список предположений* есть $p_1, \dots, p_i, \dots, p_n$ ($n \geq 1$), и предположение p_i унифицируемо с правой частью равносильности φ справедливого утверждения, имеющего вид $\varphi_1 \mid \dots \mid \varphi_m \Leftrightarrow \varphi$ ($\varphi_1 \vee \dots \vee \varphi_m \Leftrightarrow \varphi$), ($m \geq 2$), а θ – унификатор p_i и φ , то это доказательство сводится к доказательству m целей, у которых *математическое утверждение* есть f , а *списки предположений* суть $p_1, \dots, pp_1, \dots, p_n$, где pp_1 является результатом применения θ к φ_1 ; \dots ; $p_1, \dots, pp_m, \dots, p_n$, где pp_m является результатом применения θ к φ_m .

3.3. **Вывод**, представляющий собой последовательность *шагов вывода*. Шаг вывода состоит в следующем. Пусть математическое утверждение f_i ($i = 1, \dots, m$) является аксиомой, либо определением, либо доказанной теоремой, либо утверждением из списка предположений доказываемой цели, либо результатом одного из предыдущих шагов вывода. Тогда если утверждение $f_1 \& \dots \& f_m$ унифицируемо с условием справедливого утверждения,

имеющего вид $\varphi_1 \& \dots \& \varphi_m \Rightarrow \varphi$, а θ – унификатор $f_1 \& \dots \& f_m$ и $\varphi_1 \& \dots \& \varphi_m$, то верно утверждение f , являющееся результатом применения θ к φ (*результат шага вывода*).

Цель считается доказанной, если результатом последнего шага вывода является утверждение, совпадающее с *математическим утверждением* цели, или синтаксически эквивалентное ему. В случае *декомпозиции цели* (3.1) и в *выводе* (3.3) варианты применения *Modus ponens* могут быть обобщены на случай, когда импликация заменена равносильностью.

4. Формализованные способы рассуждений

Способы рассуждений, используемые в методах доказательств, делятся на *два класса*: с опорой на пропозициональные тавтологии, лежащие в основе логических рассуждений; с опорой на математические принципы и утверждения о синтаксических преобразованиях математических выражений, свойствах логических и нелогических кванторов. Эти способы рассуждений представлены явно пропозициональными формулами, являющимися тавтологиями, и метаматематическими утверждениями соответственно. Метаматематические утверждения считаются правильными, если их достоверность установлена на основе интуитивного или конвенционального критерия. *Метаматематическое утверждение* имеет вид: $(v_1: t_1) \dots (v_n: t_n) t_1 \dots t_k f_1 \dots f_s i_1 \dots i_p r_1 \dots r_q f$. Здесь f – математическая формула, содержащая вхождения предметных переменных v_1, \dots, v_n , а также вхождения синтаксических переменных t_1, \dots, t_k типа t , синтаксических переменных f_1, \dots, f_s типа f , синтаксических переменных i_1, \dots, i_p типа i и синтаксических переменных r_1, \dots, r_q типа r . При этом $(v_i: t_i)$ ($i = 0, \dots, n$) – описание предметной переменной v_i , t_i – математический терм, задающий область возможных значений предметной переменной v_i ; $t_1 \dots t_k$ – описания синтаксических переменных типа t ($k \geq 0$), значениями которых являются термы; $f_1 \dots f_s$ – описания синтаксических переменных типа f ($s \geq 0$), значениями которых являются формулы; $i_1 \dots i_p$ – описания синтаксических переменных типа i ($p \geq 0$), значениями которых являются целочисленные константы; $r_1 \dots r_q$ – описания синтаксических переменных типа r ($q \geq 0$), значениями которых являются вещественные константы; где $k + s + p + q > 0$.

Метаязык получается расширением конструкций «формула» и «терм» этого языка. Конструкция «формула» расширяется добавлением двух альтернатив: «синтаксическая переменная типа f » и «модифицированная синтаксическая переменная типа f ». Конструкция «терм» расширяется добавлением четырех альтернатив: «синтаксическая переменная типа i », «синтаксическая переменная типа r », «синтаксическая переменная типа t »

и «модифицированная синтаксическая переменная типа t ». Модифицированная синтаксическая переменная кроме названия содержит модификатор. Модификатор состоит из элементов модификатора, каждый из которых может быть термом или формулой. Значением такой синтаксической переменной является синтаксическая конструкция, соответствующая типу синтаксической переменной, но содержащая формальные параметры. Каждому элементу модификатора соответствует свой формальный параметр, который может входить в значение синтаксической переменной один или более раз. Элементы модификаторов с одним порядковым номером в разных вхождениях модифицированной синтаксической переменной в одно и то же метаматематическое утверждение соответствуют одному и тому же формальному параметру. Сами элементы модификатора являются фактическими параметрами. Значением вхождения модифицированной синтаксической переменной в метаматематическое утверждение является значение этой синтаксической переменной, в котором все формальные параметры заменены фактическими.

Определение метаязыка как *надстройки* над языком представления математических утверждений является достаточным условием для того, чтобы метаязык *расширялся автоматически* при расширении языка представления математических знаний. Это справедливо в силу способа определения конструкций «формула» и «терм» метаязыка – через одноимённые конструкции языка представления математических знаний, которые расширены соответствующими синтаксическими переменными. Таким образом, расширение этих двух языков происходит *одновременно*.

База формализованных способов рассуждений состоит из множества способов рассуждений, моделируемых пропозициональными тавтологиями, и множества способов рассуждений, моделируемых метаматематическими утверждениями. *Расширение* базы формализованных способов рассуждений состоит в расширении этих множеств. При этом новые пропозициональные формулы включаются в соответствующее множество только в случае успешной автоматической проверки их общезначимости.

5. Модель полных доказательств

Полное доказательство является синтаксической структурой, которая представляет собой множество связанных определенным образом *целей*. Первой целью является доказываемая *теорема/лемма*, у которой список предположений отсутствует. С каждой целью связан *метод* её *доказательства*. Множество допустимых методов доказательства цели является собственным подмножеством множества методов, описанных в разделе 3. Число методов в нём может варьироваться от трех до пяти – в зависимости

от синтаксической формы утверждения цели (имеет ли оно форму импликации или нет) и наличия или отсутствия у неё предположений. Синтаксическая структура каждого метода доказательства основана на его семантике (см. раздел 3). В случае использования правила *Modus ponens* для *декомпозиции цели* или *вывода*, учитывается вид *справедливого утверждения* – импликация или равносильность, и правила выбора значений для посылок.

Заключение

В работе представлена концепция программной оболочки для систем верификации интуитивных математических доказательств, рассмотрены приближенная к математической практике конструирования доказательств формально-логическая система, которая может быть положена в основу такой оболочки, и механизмы её расширения. Описаны языки для представления баз формализованных математических знаний и способов рассуждений, а также модель полных доказательств. Язык представления способов рассуждений состоит из двух подязыков: языка представления пропозициональных тавтологий и метаязыка.

Средства расширения имеет только язык представления математических знаний. Метаязык расширяется автоматически при его расширении. Расширяемость языка представления математических знаний обеспечивается расширяемостью множества определений, позволяющих вводить новые термины для обозначения определяемых понятий, а также расширяемостью его грамматики. Расширяемость грамматики достигается благодаря средствам, позволяющим описать синтаксис новых конструкций языка, а также, при необходимости, контекстные условия. Исчисление, в рамках которого строятся доказательства, представлено явно и является расширяемым.

Заметим, что для формальной системы с расширяемым исчислением справедливость теоремы о следствии истинности математического утверждения из его доказуемости не гарантируется. Эта проблема может быть адресована специалистам по математической логике, задачей которых является верификация предлагаемых математиками способов рассуждений на метаязыке. В результате среди метаматематических утверждений может быть выделен класс аксиом, а остальные классифицированы, как требующие доказательства, либо как неверные.

Полученные в ходе исследований результаты могут быть использованы в проекте по разработке QED-системы и в проектах управляемых интерактивных СППД, являющихся приближениями к этому проекту.

Список литературы

- [Гаврилова и др., 2006] Гаврилова Т.Л., Клещёв А.С. Внутренняя модель математической практики для систем автоматизированного конструирования доказательств теорем // Проблемы управления, 2006, № 4, Ч. 1; № 5, Ч. 2; № 6, Ч. 3.
- [Грибова и др., 2016] Грибова В.В., Клещев А.С., Москаленко Ф.М., Тимченко В.А., Федорищев Л.А., Шалфеева Е.А. Платформа для разработки облачных интеллектуальных сервисов // XV Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2016. Труды конференции. Т.1. – Смоленск: Универсум, 2016.
- [Мендельсон, 1976] Мендельсон Э. Введение в математическую логику. – М.: Наука, 1976.
- [Asperti, 2009] Asperti A. A Survey on Interactive Theorem Proving. 2009. – <http://www.cs.unibo.it/~asperti/SLIDES/itp.pdf>.
- [Gribova et al., 2015a] Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M., Timchenko V.A. A Two-level Model of Information Units with Complex Structure that Correspond to the Questioning Metaphor // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2015. Vol. 49. No. 5.
- [Gribova et al., 2015b] Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M., Timchenko V.A. A Model for Generation of Directed Graphs of Information by the Directed Graph of Metainformation for a Two-Level Model of Information Units with a Complex Structure // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2015. Vol. 49, No. 6.
- [Harrison et al., 2014] Harrison J., Urban J., Wiedijk F. History of Interactive Theorem Proving // In Jörg Siekmann (ed.), Handbook of the History of Logic. 2014. Vol. 9: Computational Logic. Elsevier. 2014.
- [Maric, 2015] Maric F. A Survey of Interactive Theorem Proving // Zbornik Radova. 2015. 18(26).
- [QED, 1994] The QED Manifesto // Automated Deduction, Springer-Verlag, Lecture Notes in Artificial Intelligence. 1994. Vol. 814. – <http://www.cs.ru.nl/~freek/qed/qed.html>.
- [Wiedijk, 2007] Wiedijk F. The QED Manifesto Revisited // Studies in Logic, Grammar and Rhetoric. 2007. Vol. 10. – <http://mizar.org/trybulec65/8.pdf>.

УДК 004.83

ПРЕСУППОЗИЦИИ В РАССУЖДЕНИЯХ И ИХ СВЯЗЬ С АНОМАЛИЯМИ БАЗ ЗНАНИЙ¹

Б.А. Кулик (*ba-kulik@yandex.ru*)
Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург

А.Я. Фридман (*fridman@iimm.ru*)
Институт информатики и математического
моделирования ФИЦ КНЦ РАН,
Апатиты

Описывается новый подход к логическому анализу пресуппозиции, которая рассматривается не как постуловие, а как предусловие основного утверждения (ассерции). Чтобы избежать возможного парадокса, предложено добавить в логическую модель пресуппозиции новую переменную, значениями которой являются возможные причины истинности либо ложности ассерции. Показана связь пресуппозиции с аномалией противоречия в базах знаний.

Ключевые слова: пресуппозиция, ассерция, рассуждения, парадокс, логический анализ, аномалия противоречия

Введение

Понятие пресуппозиции (английское *presupposition* – предположение) весьма часто встречается в литературе по логике и философии [Strawson, 1952; Fraassen, 1968; Beaver, 1995; Черноскутов, 2005], лингвистике [Артунова, 1982; Звезинцев, 1976], литературоведению [Зверева, 2014], когнитивистике [Lakoff, 1982], нейролингвистическому программированию (НЛП) [Бэндлер и др., 2000]. Ранее в отечественной литературе по языкознанию пресуппозиция именовалась «презумпцией» [Падучева, 1977]. Существует много различных определений этого понятия. Остановимся на следующем.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 16-29-04424, 16-29-12901, 18-07-00132, 18-01-00076).

Пресуппозиция – это утверждение, которое подразумевается как истинное при актуализации основного утверждения или вопроса, при этом отрицание (или ложность) основного утверждения не нарушает истинности пресуппозиции. Еще одной особенностью пресуппозиции оказывается то, что предположение о ее ложности влечет потерю смысла основного утверждения.

Например, в предложении «Иван Иванович вернулся в семью» подразумевается, что Иван Иванович когда-то ушёл из семьи, – это и есть пресуппозиция. Ясно, что отрицание основного утверждения («Иван Иванович не вернулся в семью») не подвергает сомнению истинность пресуппозиции. Если предположить, что пресуппозиция ложна (т.е. Иван Иванович до сего времени не уходил из семьи), то становится ясным, что факт возвращения (или невозвращения) Ивана Ивановича в семью в данном случае не имеет смысла.

С точки зрения предложенного выше определения, далеко не всякая истинная предпосылка является пресуппозицией. Рассмотрим два предложения: (а) «Петр купил смартфон в магазине» и (б) «У Петра было достаточно денег для покупки смартфона». Ясно, что для (а) предложение (б) является истинной предпосылкой, но если рассмотреть отрицание (а), то (б) уже не является безусловно истинным утверждением, так как одной из возможных причин отказа от покупки может быть отсутствие у Петра в тот момент достаточной суммы для оплаты.

Часто встречающаяся неявная выраженность пресуппозиции, в результате чего некоторые утверждения воспринимаются на уровне подсознания, используется специалистами по НЛП для формирования скрытых установок у людей, другими словами, для манипуляции сознанием [Бэндлер и др., 2000]. Весьма эффективно используются пресуппозиции в рекламе [Гребенкин, 2000], а также в полемике для формулировки «каверзных» вопросов, в которых косвенно утверждается провинность оппонента. Например, «Ты продолжаешь бить своего отца?» или «Когда ты вернешь украденное?».

В искусственном интеллекте (ИИ) понятие пресуппозиции подробно исследовалось Э.В. Поповым [Попов, 1982]. Один из важных выводов его исследований в области общения с ЭВМ на естественном языке состоит в том, что пренебрежение пресуппозициями может исказить смысл текста при автоматическом переводе. На важность анализа пресуппозиций при моделировании рассуждений обратил внимание Д.А. Поспелов [Поспелов, 1989]. Следует отметить, что в современной литературе по ИИ о пресуппозициях практически не упоминается. Этому термина, в частности, нет в таких представительных монографиях по ИИ, как [Russel et al., 2003; Thaise et al., 1988 и др.].

Далее будем так же, как и в [Падучева, 1977; Beaver, 1995], называть основное утверждение *ассерцией*.

1. Логический анализ пресуппозиций

В монографии [Поспелов, 1989] отмечено, что проблемы связи высказанных и невысказанных фактов волновали еще средневековых логиков. Однако лингвисты считают, что одним из первых, кто привлек внимание многих ученых к невысказанным утверждениям в логическом анализе, был Г. Фреге. Он предложил различать то, что явно выражается в высказывании, и то, что предполагается, а также рассматривать в качестве пресуппозиций (того, что сейчас так называется) утверждения о существовании предмета референции. Например, в предложении «Кеплер умер в нищете» предполагается, что имя «Кеплер» означает существование человека с фамилией Кеплер [Фреге, 1977].

Подробный логический анализ пресуппозиций содержится в работах П. Стросона [Strawson, 1952] и Б. ван Фрассена [Fraassen, 1968]. Стросон определяет пресуппозицию следующим образом: предложение P есть пресуппозиция предложения S , если истинность P является необходимым условием того, чтобы S имело истинностное значение (т.е. может быть либо истинным, либо ложным). Если же P ложно, то S ни истинно, ни ложно.

Ван Фрассен рассматривает связь, которая возникает между пресуппозицией и импликацией. В качестве одного из возможных вариантов определения пресуппозиции он предлагает такую конструкцию:

P – пресуппозиция предложения S , если и только если:

- (а) если S истинно, то P истинно;
- (б) если (не- S) истинно, то P истинно.

Это соотношение можно выразить в виде формул исчисления высказываний [Наумова, 1998]:

P – пресуппозиция S , если $(S \supset P)$ и $(\neg S \supset P)$.

Однако такая трактовка пресуппозиции вызывает сомнения. Во-первых, как отмечено в [Beaver, 1995], конъюнкция условий пресуппозиции, выраженная формулой $(S \supset P) \wedge (\neg S \supset P)$, эквивалентна формуле P , т.е. при такой интерпретации ассерция S оказывается фиктивной логической переменной. Во-вторых, многочисленные примеры пресуппозиций показывают, что по смыслу анализируемых предложений пресуппозиция обычно выполняет роль предусловия ассерции, но не наоборот. Как правило, события, выраженные в пресуппозиции, предшествуют событиям, описанным в ассерции S , и поэтому представление S в качестве предусловия (или антецедента) некорректно.

Нередко поиск пресуппозиции P по заданной ассерции S рассматривается как результат логического анализа, напоминающего вывод следствия. Например, представляется корректным следующее рассуждение: «из того, что Джон продолжает бить своего отца (S), следует, что Джон и раньше бил своего отца (P)». Однако при строгом подходе оказывается, что речь в данном случае идет не о дедуктивном выводе P из S , а о реконструкции предшествующего события.

С середины 80-х годов некоторые лингвисты и философы пришли к выводу о том, что логический анализ пресуппозиции *не может* адекватно объяснить этот феномен, так как пресуппозиция представляет собой не логическое, а прагматическое явление [Черноскутов, 2005]. Поскольку доказательства невозможности адекватного логического анализа пресуппозиции не приводятся, позволим себе не согласиться с этим мнением и попробуем предложить новый подход к логическому анализу пресуппозиции. Сначала рассмотрим предложение (S) «Антон опоздал в школу». Ясно, что пресуппозицией для него является предложение (P) «Антон направлялся в школу». Предложение (P) истинно и в том случае, если Антон не опоздал.

Если считать пресуппозицию предусловием, то при формальном подходе возникает парадокс. В самом деле, формула $(P \supset S) \wedge (P \supset \neg S)$ равносильна формуле $\neg P$, т.е. подтверждается безусловная ложность пресуппозиции. Хотя неформальный анализ всех примеров пресуппозиции показывает, что парадокса на самом деле нет. Чтобы разобраться в проблеме, рассмотрим более внимательно примеры пресуппозиций. Пусть этим примером будет «Антон опоздал в школу». Ясно, что событие «Антон направлялся в школу» предшествует опозданию (или не опозданию) Антона в школу.

Чтобы объяснить пресуппозицию как предусловие в рамках классической логики, в рассуждение требуется добавить какой-то новый фактор. Ясно, что Антон, направляясь в школу, мог опоздать по разным причинам (проспал, встретил друзей и пообщался с ними, помогал перейти дорогу старушке и т.д.). В то же время, если бы этих мешающих факторов не было, то Антон не опоздал бы в школу. Отсюда ясно, что для обеспечения корректности пресуппозиции как предпосылки основного предложения необходимо ввести, по крайней мере, один новый фактор (атрибут, переменную). В данном примере таким фактором может быть некоторая логическая переменная R – наличие или отсутствие причин для опоздания в школу. И, очевидно, без нее невозможно обосновать некоторые «странности» пресуппозиции.

С учетом этого предложим новое логическое определение пресуппозиции. Пусть S предложение, а P – его пресуппозиция. Введем новый атрибут

R , который назовем *переключателем* (relay) *ассерции*. Тогда в рамках исчисления высказываний получим:

Определение 1. P есть *пресуппозиция* S , если существует параметр (атрибут) R такой, что $(P \wedge R) \supset S$ и $(P \wedge \neg R) \supset \neg S$.

Анализ показывает, что в формуле $((P \wedge R) \supset S) \wedge ((P \wedge \neg R) \supset \neg S)$ фиктивных переменных нет, т.е. все переменные, включающие основное предложение (S), пресуппозицию (P) и переключатель (R), значимы. Кроме того, данная формула не инициирует парадокс, так как она истинна не только в тех случаях, когда P ложно, но и в тех, когда P истинно.

Рассмотрим применимость этого определения на другом примере. Для предложения «Алексей не прошёл по конкурсу в институт» пресуппозицию можно сформулировать как предложение «Алексей поступал в институт». Если мы отрицаем исходное предложение, то истинность пресуппозиции не изменяется. А для того, чтобы объяснить, что способствовало тому, что Алексей прошёл (или не прошёл) по конкурсу, необходим еще хотя бы один атрибут, характеризующий причину прохождения (или не прохождения) по конкурсу (например, уровень подготовки, способности Алексея).

В то же время предложенный подход не объясняет еще одной «странности» пресуппозиции: если пресуппозиция ложна или отрицается, то содержание ассерции и ее отрицания теряет смысл. Например, для ассерции «Иванов выздоровел» пресуппозицией является предложение «Иванов до настоящего времени болел». Если отрицать пресуппозицию, то не имеют смысла ни ассерция, ни ее отрицание (Иванов не выздоровел). То же самое выявляется и при анализе многих других примеров пресуппозиции.

Считается, что объяснение этого феномена выходит за рамки двузначной логики, т.е. здесь в качестве инструмента анализа необходимо использовать неклассическую (трехзначную) логику [Наумова, 1998]. Однако объяснение возможно и в рамках классической логики: для этого достаточно предположить, что число значений некоторых логических переменных может быть более двух, т.е. логическая модель пресуппозиции выражается с помощью средств исчисления предикатов.

Пусть даны значения логических переменных: $P = \{0, 1\}$, $R = \{0, 1\}$, $S = \{a, b, c\}$. Тогда можно дать следующее определение пресуппозиции.

Определение 2. P есть *пресуппозиция* S , если выполняются следующие условия:

- (1) если $P = 1$ и $R = 1$, то $S = a$;
- (2) если $P = 1$ и $R = 0$, то $S = b$;
- (3) если $P = 0$, то $S = c$.

Условие (3) моделирует «потерю смысла» ассерции при ложности пресуппозиции. Так, если Иванов *не болел* ($P = 0$), то в настоящее время он *не выздоровел* ($S \neq a$), *не продолжает болеть* ($S \neq b$), а просто *продолжает*

быть здоровым ($S = c$), а, может быть, и заболел ($S = c_1$), чего мы ему, разумеется, не желаем. По этой же схеме легко анализируются практически все примеры пресуппозиций.

2. Связь пресуппозиции с аномалией противоречия

Аномалии баз знаний (БЗ) рассматриваются во многих публикациях, например, в [Preece, 1994; Harmelen, 1994; Felfernig et al., 2004; Рыбина и др., 2007; Vaumeister et al., 2010]. Первые результаты по разработке методов распознавания и элиминации аномалий БЗ были связаны с работами по верификации баз знаний [Nguyen et al., 1987]. Различают аномалии, связанные с нарушениями целостности (ошибки в описании типов и значений атрибутов) и с нарушениями согласованности (ошибки в самих правилах). Рассмотрим вкратце некоторые типы аномалий второго типа.

Аномалия дублирования распознается, когда два правила тождественны и отличаются лишь порядком переменных. *Аномалия частичного включения* определяется, когда два правила имеют одинаковый консеквент, но при этом антецедент одного правила есть подмножество антецедента другого правила, или, наоборот, антецеденты правил одинаковы, а консеквенты связаны отношением включения.

Исследователями выделяются несколько видов *аномалии несовместимости*. Рассмотрим два из них, а именно несовместимость антецедента и аномалию противоречия [Vaumeister et al., 2010].

Правило r_p обычно имеет структуру $B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_n \Rightarrow A$. Оно содержит *несовместимый антецедент*, если в антецеденте существует хотя бы одна пара несовместимых атомов B_i и B_j . Это означает, что $B_i = C_i(x)$, $B_j = C_j(x)$ и $C_i(x) \subseteq \overline{C_j(x)}$, т.е. данные атомы содержат одну и ту же переменную и при этом не пересекаются.

Аномалия противоречия для двух правил r_p и r_q распознается, когда каждому атому B_{ip} антецедента правила r_p соответствует атом B_{iq} антецедента правила r_q такой, что B_{ip} влечет B_{iq} , причем консеквенты этих правил противоречат друг другу. Частный случай противоречивых правил – правила с противоречивыми консеквентами, у которых антецеденты совпадают. Например, в базе знаний робота могут встретиться следующие два правила:

r_p : если впереди препятствие, и цель за препятствием, то нужно обойти препятствие справа;

r_q : если впереди препятствие, и цель за препятствием, то нужно обойти препятствие слева.

Ясно, что правила противоречат друг другу, хотя оба выполнимы. Можно считать их аномалией противоречия и внести в БЗ соответствующие коррективы (например, удалить одно из правил). Но можно представить,

что в данном случае речь идет не об аномалии, а о ситуации, сходной с пресуппозицией. Тогда корректировка БЗ будет заключаться не в удалении правил, а в нахождении дополнительного атрибута (переключателя ассерции – см. определения 1 и 2). Значениями такого атрибута, в частности, может быть список и местоположение других препятствий, находящихся справа или слева от основного препятствия.

Заключение

Чтобы объяснить пресуппозицию как предусловие в рамках классической логики, предложено добавить в рассуждение новые факторы, формализующие наличие или отсутствие причин для истинности или ложности ассерции. Для моделирования «потери смысла» ассерции при ложности пресуппозиции предлагается вместо модели исчисления высказываний использовать модель исчисления предикатов, в которой логическая переменная, соответствующая ассерции, имеет более двух значений. Показана связь пресуппозиции с аномалией противоречия в базах знаний.

Список литературы

- [Арутюнова, 1982] Арутюнова Н.Д. Лингвистические проблемы референции // Новое в зарубежной лингвистике. Вып. XIII. Логика и лингвистика (проблемы референции и). – М.: Радуга, 1982.
- [Бэндлер и др., 2000] Бэндлер Р., Гриндер Д. Паттерны гипнотических техник Милтона Эриксона. – Сыктывкар: Флинта, 2000.
- [Гребенкин, 2000] Гребенкин Ю.Ю. Психотехнологии в рекламе: Учеб. пособие. – Новосибирск: РИФ-плюс, 2000.
- [Звегинцев, 1976] Звегинцев В.А. Предложение и его отношение к языку и речи. – М.: Изд-во Московского университета, 1976.
- [Зверева, 2014] Зверева Н.Ю. Пресуппозиции вопроса Отелло «Ты перед сном молилась, Дездемона?» // Артикульт, 2014, 16(4).
- [Наумова, 1998] Наумова Л.А. Пресуппозиции в логике и лингвистике // Философия: в поисках онтологии: Сборник трудов Самарской гуманитарной академии, 1998, Вып. 5.
- [Падучева, 1977] Падучева Е.В. Понятие презумпции в лингвистической семантике // Семиотика и информатика, 1977, № 8.
- [Попов, 1982] Попов Э.В. Общение с ЭВМ на естественном языке. – М.: Наука, 1982.
- [Поспелов, 1989] Поспелов Д.А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. – М.: Радио и связь, 1989.
- [Рыбина и др., 2007] Рыбина Г.В., Смирнов В.В. Методы и алгоритмы верификации баз знаний в интегрированных экспертных системах // Известия РАН. Теория и системы управления, 2007, № 4.
- [Фреге, 1977] Фреге Г. Смысл и денотат // Семиотика и информатика, 1977, № 8.

- [**Черноскутов, 2005**] Черноскутов Ю.Ю. Контекст и логические теории пресуппозиции // Логико-философские штудии, 2005, Вып. 3.
- [**Baumeister et al., 2010**] Baumeister J., Seipel D. Anomalies in ontologies with rules // Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web. 2010. 8(1).
- [**Beaver, 1995**] Beaver D. Presupposition and Assertion in Dynamic Semantics. PhD Dissertation, University of Edinburgh. 1995.
- [**Felfernig et al., 2004**] Felfernig A., Friedrich G., Jannach D., Stumptner M. Consistency-based diagnosis of configuration knowledge bases // AI Journal. 2004. 152(2).
- [**Fraassen, 1968**] Fraassen B. van. Presupposition, implication and self-reference // Journal of Philosophy. 1968. Vol. 65. No. 5.
- [**Harmelen, 1994**] Harmelen F. Applying rule-base anomalies to KADS inference structures // Decision Support Systems. 1998. Vol.21. No. 4.
- [**Lakoff, 1982**] Lakoff G. Women, Fire and Dangerous Things. Chicago, IL: The University of Chicago Press. 1987.
- [**Nguyen et al., 1987**] Nguyen T.A., Perkins W.A., Laffey T.J., Pecora D. Knowledge Base Verification // AI Magazine. 1987. Vol. 8. No. 2.
- [**Preece, 1994**] Preece A.D. Validation of Knowledge-Based Systems: The State-of-the-Art in North America //Journal of Communication and Cognition – Artificial Intelligence. 1994. Vol. 1. No. 4.
- [**Russel et al., 2003**] Russel S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 2nd ed. Prentice Hall. 2003.
- [**Strawson, 1952**] Strawson P. Introduction to Logical Theory. London. 1952.
- [**Thayse et al., 1988**] Thayse A., Gribomont P., Hulin G. et al. Approche logique de l'intelligence artificielle, vol.1. De la logique classique a la programmation logique. Paris. 1988.

ПРИЛОЖЕНИЯ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ПРОПОЗИЦИОНАЛЬНОЙ ЛОГИКИ В ЗАДАЧАХ ВЕРИФИКАЦИИ ЛОГИЧЕСКОГО СЛЕДОВАНИЯ

Ю.М. Сметанин (*gms1234gms@rambler.ru*)
Удмуртский государственный университет, Ижевск

Рассматриваются приложения неклассической многозначной логики L_{S_2} с областью интерпретации в множествах неотрицательных целых чисел. Семантика ее правильно построенных формул определяется моделью в форме алгебраической системы. Элементы носителя этой алгебраической системы однозначно сопоставляются с формальными контекстами для семейства модельных множеств (признаков). Установлено, что для логики предикатов первого порядка с одно и двуместными предикатами верификацию логического следования в семантическом смысле можно проводить, используя L_{S_2} и соответствия Галуа релевантные двуместным предикатам.

Ключевые слова: конститuentы, формальный контекст, логическое следование в семантическом смысле, алгебраическая онтология, соответствия Галуа

Введение

В работе показано, что для некоторых случаев, когда постановка задач верификации рассуждений на естественном языке использует понятие соответствия, можно значительно уменьшить сложность логического вывода. Для этого нужно использовать исчисление конститuentных множеств, построенное в алгебраической системе (0.1) и неклассическую многозначную логику L_{S_2} [Сметанин, 2017].

$$\langle B(\tilde{X}_n), W_F, W_R \rangle. \quad (0.1)$$

В (0.1) операциями являются операции алгебры множеств, а отношениями строгое включения и равенство множеств. Опорное множество является семейством множеств, которые можно построить из

номеров конститuent модельных множеств $\tilde{X}_n = X_1, X_2, \dots, X_n \subseteq U$, $U = \{0, 1, \dots, 2^n - 1\}$.

В работе предлагается постановка задач верификации рассуждений с использованием объемных соотношений и соответствий между модельными множествами. На примерах показано, что для логики предикатов первого порядка с одно и двуместными предикатами верификацию логического следования можно проводить, используя соответствия Галуа.

1. Исчисление конститuentных множеств

Атомарные суждения (1.1) логики L_{S_2} выражают объемные отношения множеств в универсуме U , семантика которых определена как:

$$NOB_s = \langle A(X, Y), Eq(X, Y), IO(X, Y), X \subset U, X = U \rangle. \quad (1.1)$$

$$A(X, Y) \equiv (X \subset Y) \cdot (X \subset U) \cdot (X' \subset U) \cdot (Y \subset U) \cdot (Y' \subset U). \quad (1.2)$$

$$Eq(X, Y) \equiv (X = Y) \cdot (X \subset U) \cdot (X' \subset U) \cdot (Y \subset U) \cdot (Y' \subset U). \quad (1.3)$$

$$IO(X, Y) \equiv (X \cdot Y \subset U) \cdot (X \cdot Y' \subset U) \cdot (X' \cdot Y \subset U) \cdot (X' \cdot Y' \subset U). \quad (1.4)$$

Здесь множество $X \cdot Y'$ – пересечение X и дополнения Y' до универсума. Вместо X и Y можно подставить любые правильно построенные формулы (ППФ) $F_1(\tilde{X}_n)$, $F_2(\tilde{X}_n)$ алгебры множеств.

В логике используются три логических операции: отрицание, дизъюнкция и конъюнкция. Из атомарных суждений (1.1) можно составить конъюнктивные формулы (КФ). Остальные правильно построенные формулы L_{S_2} являются неконъюнктивными формулами (НКФ). Показано, что любая НКФ может быть представлена как дизъюнкция КФ, являющихся попарно противоречивыми.

Алгебраическая система (0.1) определяет дискретный аналог модельных схем В.А. Бочарова и В.И. Маркина, которые можно задать диаграммами Венна. Дискретная модельная схема $I_n = \langle U, X_1, X_2, \dots, X_n \rangle$ называется алгебраической онтологией (А-онтологией). Она, с точностью до нумерации модельных множеств, представляет алгебраическую систему (0.1) смотри рис. 1.

Единицей А-онтологии $I_n = \langle U, X_1, X_2, \dots, X_n \rangle$ называется множество номеров ее непустых конститuent, обозначение – $M(I_n)$.

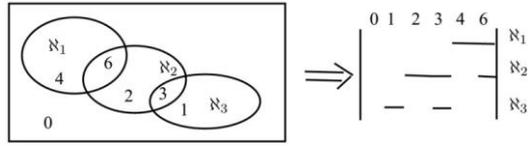


Рис. 1 Переход от диаграммы Венна к А-онтологии

А-онтология $I = \langle U, X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0 \rangle$ называется канонической, если $U = \{0, 1, \dots, 2^n - 1\}$. Все конститuentы канонической А-онтологии есть непустые множества.

А-онтология по своему строению является формальным контекстом [Ganter, 1999]. Рис. 2 иллюстрирует неаристотелевское строение понятия, смысловое содержание которого всегда выявляется на фоне контекста. Например, тигры – хищные млекопитающие, не живущие в воде и не приспособленные к жизни в условиях Крайнего Севера»:

$$T \subset X \cap M \cap B' \cap C' \equiv A(T, X \cdot M \cdot B' \cdot C')$$

Контекст понятия можно изменять.

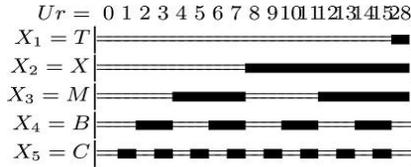


Рис. 2 Понятие «тигры-Т» в формальном контексте А-онтологии

Список всех атомных логических отношений (1.1) между модельными множествами, для заданной А-онтологии I_n , будем называть **полным бинарным инвариантом** $BIN(I_n)$. Конъюнкцию (КФ), составленную из бинарных отношений входящих в $BIN(I_n)$, обозначим $FBIN(I_n)$. Для сокращения в конъюнкции бинарных отношений составляющих $FBIN(I_n)$ не будем указывать $IO(X_i, X_j)$ – отношения независимости пары модельных множеств. Установлено, что каждому $BIN(I_n)$, соответствует не менее одной А-онтологии. **Максимальной** среди них называется та, которая имеет единицу с наибольшим числом номеров непустых конститuent. При этом добавление к единице максимальной А-онтологии любого не входящего в нее номера выводит эту А-онтологию из данного $BIN(I_n)$ [Сметанин, 2010, 2017]. Единица задает семантическое

значение конъюнктивной ППФ, которая определяется бинарным инвариантом А-онтологии. Значением НКФ является семейство А-онтологий. Доказано, что модельные множества \tilde{X}_n А-онтологии $I = \langle U, X_1, X_2, \dots, X_n \rangle$ полностью определяются ее единицей $M(I_n) = U$ по формуле $X_i = U \cdot X_i^0$.

Логическое содержание максимальной А-онтологии выражается ее $FBIN(I_n)$. Логическое содержание не максимальной А-онтологии с данным $BIN(I_n)$ выражается конъюнкцией суждений ее $BIN(I_n)$ с суждениями NOB_S , выражающими пустоту конъюнктуент, которые не входят в данную А-онтологию по сравнению с максимальной.

Например, бинарные инварианты у А-онтологий рис. 3 совпадают.

$$FBIN = A(X_1, X_2) \cdot IO(X_1, X_3) \cdot A(X_1, X_4) \cdot A(X_2, X_3) \cdot IO(X_2, X_3) \cdot A(X_3, X_4).$$

Здесь один BIN определяет две А-онтологии, одна из которых максимальная.

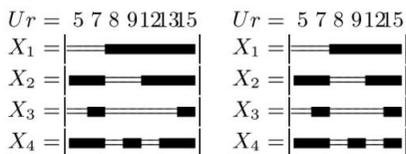


Рис.3. Две А-онтологии с одинаковым $FBIN(I_4)$

КФ для правой А-онтологии выражена в виде КФ (1.5).

$$F(\tilde{X}_4) = A(X_1, X_2) \cdot A(X_1, X_4) \cdot A(X_2, X_3) \cdot A(X_3, X_4) \cdot (K(13))' = U \quad (1.5)$$

Последним элементом конъюнкции является утверждение о пустоте конъюнктуенты с номером 13. $(X_1 + X_2 + X_3 + X_4) = U$. Формула алгебры множеств, двойственная к конъюнктуенте, названа дизъюнктуентой и имеет естественную нумерацию (инверсию номера конъюнктуенты). Семантическим значением КФ является множество натуральных чисел либо пустое множество. В качестве семантического значения НКФ принимается семейство множеств из натуральных чисел либо пустое множество [Сметанин, 2017]. В работе [Smetanin, 2016] введено релевантное (непарадоксальное) логическое следование (\models_N) между ППФ L_{S_2} . Единица А-онтологии I_n позволяет выразить ее логическое содержание в виде атомарного суждения $F(\tilde{X}_n) = M(I_n)$ называемого далее МЛ-уравнением, здесь $F(\tilde{X}_n)$ есть ППФ алгебры множеств равносильная совершенной нормальной форме Кантора SNFK. Она построена по номерам конъюнктуент из единицы – $M(I_n)$.

Например, максимальная А-онтология (рис. 3) представляется как МЛ-уравнения с левой частью в форме $SNFK$:

$$\underbrace{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4}_{5} + \underbrace{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4}_{7} + \underbrace{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4}_{8} + \underbrace{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4}_{9} + \underbrace{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4}_{12} + \underbrace{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4}_{13} + \underbrace{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4}_{15} = U,$$

либо равносильной ей ППФ $-X_1 \cdot X_3 + X_2 \cdot X_4 = U$.

Вычислять семантические значения КФ и НКФ позволяет М-алгоритм [Сметанин, 2010, 2017], реализованный программно.

Он сопоставляет А-онтологию $I(Q)$ конъюнкции Q суждений NOB_S . Доказано, что А-онтология, получаемая по М-алгоритму для КФ, является **максимальной** по числу номеров непустых конститuent.

Теорема 1. Имеет место функциональная полнота атомарных суждений (1.1), то есть любая А-онтология может быть выражена КФ в L_{S_2} .

Рассмотрим совершенную нормальную форму Кантора

$$SNFK(\tilde{X}_n) = \bigcup_{i \in M(I_n) \subset \{0, 1, 2, \dots, 2^n - 1\}} \mathbf{K}(i),$$

построенную по единице $M(I_n)$ неканонической А-онтологии I_n . Все ППФ алгебры множеств $F_i(\tilde{X}_n)$ такие, что

$$F_i(\tilde{X}_n) \equiv SNFK(\tilde{X}_n), \quad i = \overline{1, m} \quad (1.6)$$

образуют класс эквивалентности. Из них можно составить m МЛ-уравнений вида $F_i(\tilde{X}_n) = U$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$. Класс эквивалентности из левых частей называется **общим решением**, определяющим все равносильные следствия любого МЛ-уравнения из (1.6). **Частными решениями** называются его нетождественные следствия (МЛ-уравнения), которые не равносильны исходному и несут только часть его логического содержания. Логическое содержание можно выразить различными способами. Применим способ Порцекко. Для установления логического следования. А-онтологии I_n можно сопоставить МЛ-уравнение $SNFK(M(I_n)) = U$. Выразим равносильное ему МЛ-уравнение через нуль $N(I_n) = \{0, 1, \dots, 2^n - 1\} \setminus M(I_n)$, т.е. через дизъюнкцию пустых конститuent.

$M(I_n) = U^0 \setminus N(I_n)$ можно представить в виде КФ суждений (1.1)

$$(D(i_1) = U)(D(i_2) = U) \dots (D(i_k) = U). \quad (1.7)$$

Здесь $\{i_1, i_2, \dots, i_k\} = N(I_n)$, $i_j = 2^n - 1 - i_j$; $j = \overline{1, k}$, j -й элемент конъюнкции (1.7) выражает множество $U \setminus \{i_j\}$ или пустоту конститuent

$K(i_j)$. Конъюнкция (1.7) равносильна утверждению $\left(\bigcap_{i \in N(I_n)} D(i')\right) = U$, где $i' = 2^n - i - 1$. Левая часть равенства выражает единицу А-онтологии.

$$M(I_n) = \bigcap_{i \in N(I_n)} D(i').$$

Назовем ее канонической формой логического содержания А-онтологии $I_n - \text{Log}(I_n)$.

Теорема 2. Логическое содержание А-онтологии $I_2 - \text{Log}(I_2)$ является частью логического содержания А-онтологии $I_1 - \text{Log}(I_1)$, тогда и только тогда, когда их единицы (объемы универсумов) находятся в соотношении $M(I_1) \subseteq M(I_2)$. Отношение \subset имеет место, если и только если $(\text{Log}(I_1) \vDash_N \text{Log}(I_2)) \wedge (\text{Log}(I_2) \not\vDash \text{Log}(I_1))$.

Утверждение теоремы 2 [Smetanin, 2015] следует из сравнения логических содержаний I_1 и I_2 , представленных в каноническом виде.

Теорема 2 позволяет проверять, является ли данное МЛ-уравнение частным решением другого МЛ-уравнения в случае совпадения у них наборов модельных множеств. Уравнения с разными наборами приводят к уравнениям с одинаковыми наборами модельных множеств.

Реализована программа верификации для 22 модельных множеств. Проводятся эксперименты по распараллеливанию алгоритма [Сметанин, 2016, 2017] и увеличению числа модельных множеств.

2. Примеры верификации логического следования

1. Доказать, что $A \equiv p \cdot (p \Rightarrow q) \cdot (s \Rightarrow t) \cdot (t \Rightarrow w) \Rightarrow w$. Обозначим через U, P, Q, S, T, W универсум множества, сопоставленные $1, p, q, s, w$. Пусть $F_1(p, q, s, t, w) = p \cdot (p \Rightarrow q) \cdot (s \Rightarrow t) \cdot (t \Rightarrow w)$ есть посылка, а заключение есть $F_2(p, q, s, t, w) = w$. Верифицируем $F_1 \vDash_N F_2$.

Исключим импликацию $F_1(p, q, s, t, w) \equiv p \cdot (p' + q) \cdot (s' + t) \cdot (t' + w)$. Проверим имеет ли место $F_1 = 1 \vDash_N F_2 = 1$. Для этого перейдем к МЛ-уравнениям, которые являются ППФ логики L_{S_2} и найдем их единицы $P \cdot (P' + Q) \cdot (S' + T) \cdot (T' + W) = U$ и $(W = U)$, и применим теорему 2:

$$M(P \cdot (P' + Q) \cdot (S' + T) \cdot (T' + W) = U) = \{24, 25, 27, 31\} \subseteq \\ \{1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31\} = M(W = U).$$

Отсюда заключаем, что следования нет. Также видим, что \models_N будет иметь место, если добавить к посылке утверждение о пустоте конstituенты $K(24)$.

2. Проблема Гилмора (Gilmorproblem). Пусть требуется доказать логическое следование:

$$\forall x \exists y \left[\underbrace{[\{F(y) \rightarrow G(y)\} \leftrightarrow F(x)]}_{1} \cdot \underbrace{[\{F(y) \rightarrow H(y)\} \leftrightarrow G(x)]}_{2} \cdot \right. \\ \left. \underbrace{[\{F(y) \rightarrow G(y)\} \rightarrow Y(y)] \leftrightarrow H(x)}_{3} \right] \models_N \forall z \{F(z) \cdot G(z) \cdot H(z)\}.$$

Избавимся от импликации и эквиваленции

$$\forall x \exists y \left[[(F(y)' + G(y)) \cdot F(x) + F(y) \cdot G(y)' \cdot F(x)'] \cdot \right. \\ \left. [(F(y)' + H(y)) \cdot G(x) + F(y) \cdot H(y)' \cdot G(x)'] \cdot \right. \\ \left. [[(F(y)' + G(y)) \cdot H(y) + F(y) \cdot G(y)' \cdot H(x)']] = 1 \right] \models_N \\ \forall z \{F(z) \cdot G(z) \cdot H(z) = 1\}.$$

Подготовительная работа для представления исходного утверждения в виде конъюнктивной формулы логики L_{S_2} проделана. Для ее получения нужно заменить предикаты одноименными модельными множествами F, G, H и ввести еще одно непустое, одно- или многоэлементное модельное множество Y , существование которого предопределено квантором существования. Конъюнкция, дизъюнкция и отрицание между одноместными предикатами заменяется пересечением объединением и дополнением до универсума между сопоставленными им модельными множествами. Равенство единице заменяется на равенство универсуму

$$(Y \subseteq U) \cdot \left([(Y \cdot F' + Y \cdot G) \cdot F + Y \cdot F \cdot G' \cdot F'] \cdot [(Y \cdot F' + Y \cdot H) \cdot G + Y \cdot F \cdot H' \cdot G'] \cdot \right. \\ \left. [(Y \cdot F' + Y \cdot G) \cdot Y \cdot H + Y \cdot F \cdot Y \cdot G' \cdot H'] = U \right) \models_N \{F \cdot G \cdot H\} = U.$$

В результате преобразований $(Y \subseteq U) \cdot (Y \cdot G \cdot F \cdot H = U) \models_N (F \cdot G \cdot H = U)$. Единица посылки $M(F \cdot G \cdot G \cdot Y = U) = \{13\} \subset \{13, 15\} = M(F \cdot G \cdot G = U)$ включена в единицу заключения в случае $Y \subset U$ и совпадает с ней в случае $Y = U$.

3. Доказать, что в общем универсуме

$$\forall x \exists y F(x, y), \forall x \exists y G(x, y), \forall x \exists y (F(x, y) + G(x, y)) \rightarrow \\ \forall z (F(y, z) + G(y, z) \rightarrow H(x, z)) \models_N \forall x \exists y H(x, y).$$

Перепишем в терминах соответствий и избавимся от одной импликации в третьей посылке. Множества Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 являются непустыми подмножествами универсума U .

$$\begin{aligned} & \exists Y_1 (F(U, Y_1) \neq \emptyset) \cdot (D_F(U) = U), \\ & \exists Y_2 (G(U, Y_2) \neq \emptyset) \cdot (D_G(U) = U), \\ & \exists Y_3 \underbrace{(F(U, Y_3) + G(U, Y_3) \neq \emptyset)}_A \cdot \underbrace{(F(Y_3, U) + G(Y_3, U) = \emptyset)}_B \rightarrow \\ & (H(U, U) \neq \emptyset) \cdot (D_H(U) = U) \vDash_N \\ & \exists Y_4 (H(U, Y_4) \neq \emptyset) \cdot (D_H(U) = U), \end{aligned}$$

где F, G, H – соответствия, D_F, D_G, D_H – их области определения. Для доказательства указываются множества Y_i , для которых истинность посылок влечет истинность следствия. Также рассматривается решение задачи о паровом катке и другие примеры, в которых следование устанавливается с помощью релевантных двуместным предикатам соответствий и свойств соответствий Галуа [Сметанин, 2017]

Заключение

В работе рассмотрены приложения использования неклассической многозначной логики для верификации логического следования и принципиальная возможность сравнения логических содержаний формальных понятий, принадлежащих различным контекстам. В связи с этим важно увеличить число модельных множеств в программе, реализующей М-алгоритм. Это необходимо для вычисления объема формального контекста по его логическому описанию. В [Сметанин, 2016] указаны способы эффективного распараллеливания вычислений.

Список литературы

- [Сметанин, 2010] Сметанин Ю.М. Алгоритм решения полисиллогизмов в ортогональном базисе посредством исчисления конститuentных множеств // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки, 2010, Вып. 4.
- [Сметанин, 2016] Сметанин Ю.М. Непарадоксальное логическое следование и проблема решения МЛ-уравнений // Программные системы: теория и приложения, 2016, 7:1(28).
- [Сметанин, 2017] Сметанин Ю. М. Верификация логического следования в неклассической многозначной логике // Известия Института математики и информатики УдГУ, 2017, Вып. 2 (50).
- [Ganter, 1999] Ganter B., Wille R. Formal concept analysis: Mathematical foundations. Springer, Berlin. 1999.
- [Smetanin 2015] Smetanin Iu. Syllogistical system on the basis of the propositional multivalued logic // 2015 International Conference “Stability and Control Processes” in Memory of V.I. Zubov (SCP), St. Petersburg. 2015.

СЕКЦИЯ 9 | НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ И
МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

УДК 519.712.2

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОГО
АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ
ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ¹**

Л.А. Гладков (*leo_gladkov@mail.ru*)

Южный федеральный университет, Таганрог

Н.В. Гладкова (*nadyusha.gladkova77@mail.ru*)

Южный федеральный университет, Таганрог

С.Н. Лейба (*lejba.sergej@mail.ru*)

Южный федеральный университет, Таганрог

Предложен гибридный алгоритм решения оптимизационных задач автоматизированного проектирования, проиллюстрированный на примере размещения и трассировки фрагментов схем ЭВА. Приведена постановка задачи, ограничения и критерий оценки качества получаемых решений. Разработан модифицированный оператор миграции для межпопуляционного обмена информацией. Предложена схема организации параллельного процесса поиска. Выполнена программная реализация предложенного алгоритма. Представлено краткое описание проведенных вычислительных экспериментов, подтверждающих эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: биоинспирированные алгоритмы, нейронная сеть, гибридные методы, параллельные вычисления

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-01-00627).

Введение

Многие оптимизационные задачи, решаемые в процессе конструкторского этапа автоматизированного проектирования электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА) требуют огромных затрат времени и вычислительных ресурсов из-за перебора большого числа вариантов. Поэтому на практике для решения такого рода задач разрабатываются различные метаэвристические алгоритмы, позволяющие находить близкие к оптимальным (квазиоптимальные) решения [Shervani, 1995], [Charles et al., 2009].

Описано большое число модификаций эволюционных алгоритмов для решения задач конструкторского этапа проектирования [Cohoon et al., 2003], [Гладков и др., 2009]. Как правило, такие алгоритмы достаточно успешно справляются с решением задачи нахождения квазиоптимального решения за полиномиальное время. Однако большинство упомянутых выше алгоритмов имеют проблемы с преждевременной сходимостью процесса поиска. В данной статье предлагается гибридный подход к решению рассматриваемых оптимизационных задач на основе интеграции различных подходов, таких как, эволюционные алгоритмы поиска, искусственные нейронные сети, нечеткие модели управления параметрами алгоритма и механизмы распараллеливания вычислений [Гладков, 2000].

1. Постановка задачи

Наиболее сложными и ответственными задачами конструкторского этапа проектирования с точки зрения качества будущих изделий являются задачи размещения и трассировки. Эти задачи тесно взаимосвязаны друг с другом. Поэтому представляет практический интерес разработка интегрированных методов, позволяющих решать эти задач в едином цикле с учетом взаимных ограничений и текущих результатов [Гладков, 2011].

Пусть задано множество размещаемых элементов E :

$$E = \{e_i / i = 1, \dots, N\},$$

где e_i – размещаемый элемент, N – количество элементов; и множество соединяющих элементы цепей:

$$U = \{u_h / h = 1, \dots, L\},$$

где u_h – цепь, L – количество цепей.

Необходимо найти вариант размещения элементов на монтажном пространстве

$$V = \{(x_i, y_i) / i = 1, \dots, N\},$$

где (x_i, y_i) - координаты верхнего левого угла установочной площади элемента размещения i , такие, чтобы суммарная площадь перекрытия размещенных элементов была равна нулю, а сумма значений остальных критериев минимальной.

Для каждой цепи необходимо найти список позиций коммутационного поля, через которые она проходит:

$$W_h = \{(x_q, y_q) / i = 1, \dots, Q\},$$

где Q – количество позиций, через которые проходит h -я цепь.

2. Описание алгоритма

При кодировании решений множество позиций представляется в виде регулярной структуры (решетки). Каждая позиция p_i имеет координаты x_i, y_i . Позиции нумеруются по возрастанию x_i в строке слева направо, а строки упорядочиваются по возрастанию координаты y_i сверху вниз.

Каждый элемент имеет базовую точку O^{δ_i} и оси координат $O^{\delta_i}X^{\delta_i}, O^{\delta_i}Y^{\delta_i}$, относительно которых задается контурное описание элемента e_i . Базовой точкой является нижний левый угол элемента. Контурное описание имеет прямоугольную форму. Будем считать, что элемент e_i назначен в позицию p_j , если его базовая точка O^{δ_i} совмещена с точкой коммутационного поля, имеющей координаты x_j, y_j . Точки пересечения пунктирных линий соответствуют посадочным позициям на коммутационном поле.

Каждое решение представляется в виде хромосомы H_i . Порядковый номер гена в хромосоме соответствует номеру размещаемого элемента. Значение гена соответствует номеру позиции на коммутационном поле. Число генов в хромосоме равно количеству размещаемых элементов.

При расчете значения ЦФ размещения (рис. 1) вычисляется нормированная оценка суммы штрафа за перекрытие площадей размещаемых элементов, оценки длин межсоединений, показателя трассируемости, а также оценки тепловой и электромагнитной совместимости элементов

$$F_p = k_1S + k_2L + k_3T + k_4J + k_5Q,$$

где S – суммарная площадь перекрытия элементов, L – оценка длин межсоединений, T – показатель трассируемости, J – суммарное электромагнитное воздействие элементов друг на друга, Q – суммарное тепловое воздействие элементов друг на друга, k_1, \dots, k_5 – коэффициенты влияния каждой составляющей функции принадлежности на общую оценку.

Размер штрафа за перекрытие площадей размещаемых элементов зависит от суммарной площади пересечения всех элементов. При этом учитывается минимально допустимое расстояние между элементами. Для оценки длин межсоединений используется полупериметр описывающего прямоугольника цепи.

При решении задачи трассировки показателем качества решения является процент непротрассированных соединений. Дополнительным критерием качества трассировки является суммарная площадь пересечения областей описывающих прямоугольников всех цепей.

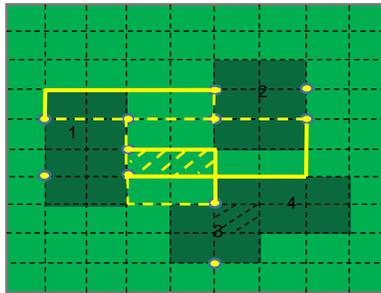


Рис. 1. Пример определения качества размещения

Для совместного решения задач размещения и трассировки используется параллельный многопопуляционный генетический алгоритм [Alba et al., 2002], [Zhongyang et al., 2006]. Он предполагает параллельное выполнение эволюционных процессов на нескольких популяциях. Для обмена особями используются островная и буферная модели параллельного генетического алгоритма.

В островной модели синхронизация асинхронных процессов осуществляется в точках миграции. Оператор миграции применяется для обмена особями между популяциями. Отбор особей для миграции выполняется из некоторого количества хромосом популяции, имеющих наилучшее значение целевой функции (ЦФ) размещения.

Для каждого варианта размещения, описываемого хромосомой, выполняется трассировка с помощью волнового алгоритма. Затем, из одной популяции в другую копируется некоторое количество хромосом с наилучшим значением данного показателя. При этом из популяций удаляется такое же количество хромосом с худшим значением показателя. На рис. 2 представлена схема модели параллельного генетического алгоритма, выполняемого на 2-х популяциях. На практике количество популяций может быть значительно больше.

В буферной модели обмен особями между популяциями осуществляется через общий промежуточный буфер хромосом. Обмен выполняется в точках миграции. К популяции, которая достигла точки миграции, применяется оператор миграции.

После выбора метода кодирования решений и задания критериев оценки качества получаемых решений построим биоинспирированный алгоритм поиска на основе модифицированных генетических операторов.

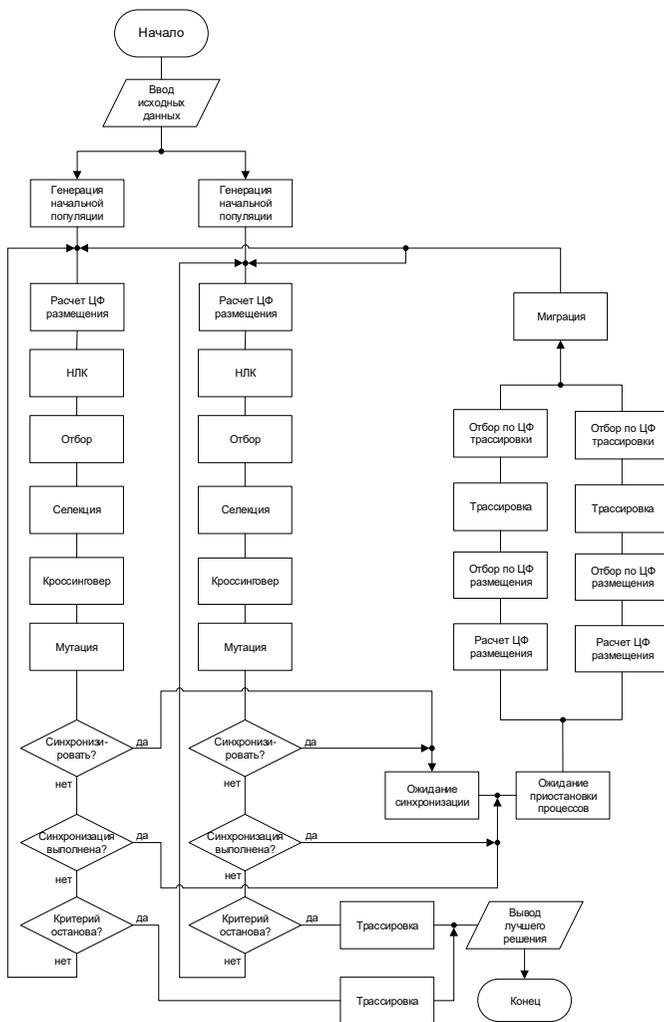


Рис. 2. Структурная схема островной модели алгоритма размещения

Для создания начальной популяции используется метод «дробовика» [Гладков и др., 2010]. Он подразумевает случайный выбор альтернатив из всей области решений данной задачи. После подсчета значений ЦФ для выбора решений применяется оператор селекции на основе метода «рулетки». Также в алгоритме используется модифицированный одноточечный оператор кроссингвера и многоточечный оператор мутации.

Развитие гибридных подходов и систем, основанных на интеграции различных научных направлений, дает основания полагать, что при организации параллельной структуры вычислений и построении схемы процесса эволюции, весьма перспективным является использование принципов построения многоагентных систем (МАС) [Тарасов, 2002].

Эволюционное моделирование и многоагентные методы тесно взаимосвязаны. С одной стороны, применение принципов эволюционного развития позволяет решать задачи адаптации МАС к изменениям внешней среды. С другой стороны – эволюция может использоваться в качестве движущей силы в процессе его развития, являться механизмом и обеспечивать мотивацию для достижения поставленных целей.

Можно выделить некоторые параллели (соответствия) между базовыми понятиями эволюционного моделирования и теории МАС (табл. 1).

Табл. 1

Эволюционное моделирование	Теория МАС
Ген	Свойство агента
Хромосома	Набор свойств
Особь (решение)	Агент
Семья (2 родителя и 1 потомок)	Коллектив агентов
Популяция	Эволюционирующая МАС

Также можно предположить, что принципы организации МАС могут быть с успехом использованы для распараллеливания вычислений.

Для повышения качества получаемых решений в схему поиска включается нечёткий логический контроллер, регулирующий значения параметров основных эволюционных операторов [Michael et al., 1993], [Herrera et al., 1996]. Для оценки текущего состояния популяции могут использоваться, например, разнообразие генотипа популяции, скорость роста среднего значения функции пригодности [Ярушкина и др., 2007]. Выходными параметрами являются вероятности выполнения кроссинговера, мутации и миграции соответственно – $Pc(t)$, $\Delta Pm(t)$, $\Delta Ps(t)$ [Гладков, 2006]:

$$Pc(t) \in [0, 1]; Pm(t) \in [0, 1]; Ps(t) \in [0, 1].$$

Завершающий этап в процессе проектирования модуля нечеткого управления – это определение формы представления нечетких множеств A_i^k , 1, ..., n; k = 1, ..., N. Например, это может быть функция Гаусса

$$\mu_{A_i^k}(x) = \exp\left(-\frac{(x_i - \bar{x}_i^k)^2}{\sigma_i^k}\right),$$

где \bar{x}_i^k – это центр, а σ_i^k – ширина кривой Гаусса.

После объединения всех элементов функция для модуля нечеткого управления приобретает окончательный вид:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{y}^k \left(\prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k}\right)^2\right)\right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k}\right)^2\right)\right)}.$$

Каждый элемент этой формулы можно задать в форме функционального блока (сумма, произведение, функция Гаусса), что позволяет создать многослойную нейронную сеть. В нашем случае нейронная сеть будет содержать 4 слоя. Каждый элемент слоя 1 реализует функцию принадлежности нечеткого множества A_i^k , $1, \dots, n$; $k = 1, \dots, N$. В этот слой поступают входные сигналы \bar{x}_i , а на его выходе формируются значения функции принадлежности для этих сигналов. На выходе слоя 1 формируются значения функции принадлежности нечетким множествам. Конфигурация связей слоя 2 соответствует базе правил, а мультипликаторы – блоку вывода. Применение мультипликаторов в качестве узлов слоя 2 обусловлено тем, что в нечетких операциях используется операция умножения. Количество элементов этого слоя равно числу правил, хранимых в базе. Слои 3 и 4 реализуют функции блока дефазсификации [Гладков и др., 2015].

В работе блока нечёткого управления используется 6 функций принадлежности для множеств A^k и 2 функции для множеств B^k . При этом:

- $k_j[i]$ – эквивалентны параметрам y^k и интерпретируются как центры функций принадлежности нечетких множеств B^k ;
- $f_p[i]x$ и $f_p[i]y$ интерпретируются, соответственно, как центр и ширина функцией Гаусса для оценки степени принадлежности входных данных \bar{x}_i , к соответствующим нечетким множествам A_i^k и соответствуют параметрам x_i^k и σ_i^k в модуле нечёткого управления;
- a – соответствует выходному значению модуля управления \bar{y} .

В процессе работы блока вычисляются 24 функции принадлежности для множеств A_i^k и 6 функций для множеств B^k .

3. Результаты экспериментов

Для анализа эффективности разрабатываемых алгоритмов используются графики изменения среднего и минимального значения целевой функции размещения. На каждой итерации рассчитывается средние значения целевой функции всех популяций, в которых запущен эволюционный процесс. Также используются графики среднего и минимального значения целевой функции трассировки, значения которой рассчитываются в точках миграции.

Для анализа работы нечёткого логического контроллера используются графики изменения входных и выходных параметров контроллера (рис. 3).

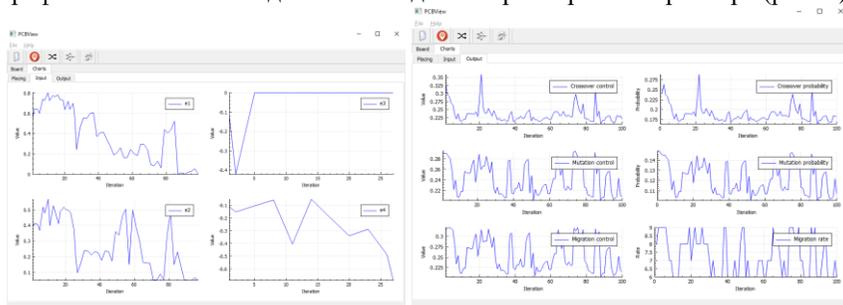


Рис. 3. Графики изменения выходных параметров нечеткого контроллера

В результате использования блока обучения были определены оптимальные параметры. Обучение проводилось на основе статистической информации о зависимости параметров НЛК и эффективности алгоритма размещения.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод о том, что для получения наилучшего решения задач размещения и трассировки необходимо использовать 4 потока параллельного генетического алгоритма. Дальнейшее увеличение количества потоков негативно отражается на результате решения задач.

Список литературы

- [Гладков, 2000] Гладков Л.А. О некоторых подходах к построению гибридных интеллектуальных систем для решения графовых задач // Новости искусственного интеллекта, 2000, № 3.
- [Гладков, 2006] Гладков Л.А. Решение задач поиска и оптимизации решений на основе нечетких генетических алгоритмов и многоагентных подходов // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР». – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. № 8(63).
- [Гладков и др., 2009] Гладков Л.А., Курейчик В.М., Курейчик В.В., Сороколетов П.В. Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009.
- [Гладков и др., 2010] Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010.
- [Гладков, 2011] Гладков Л.А. Интегрированный алгоритм решения задач размещения и трассировки на основе нечетких генетических методов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2011, № 7.
- [Гладков и др., 2015] Гладков Л.А. Гладкова Н.В., Лейба С.Н. Размещение элементов схем ЭВА на основе гибридных интеллектуальных методов. // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР». – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – № 4 (165).

- [**Тарасов, 2002**] Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002.
- [**Ярушкина и др., 2007**] Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / Под ред. Н.Г. Ярушкиной. – М.: Физматлит, 2007.
- [**Alba et al., 2002**] Alba E., Tomassini M. Parallelism and evolutionary algorithms // IEEE T. Evolut. Comput. 2002. Vol. 6.
- [**Charles et al., 2009**] Charles J. Alpert, Dinesh P. Mehta, Sachin S. Sapatnekar. Handbook of algorithms for physical design automation. CRC Press, NY, USA, 2009.
- [**Cohon et al., 2003**] Cohoon J.P., Karro J., Lienig J. Evolutionary Algorithms for the Physical Design of VLSI Circuits. Advances in Evolutionary Computing: Theory and Applications, Ghosh, A., Tsutsui, S. (eds.) Springer Verlag, London, 2003.
- [**Herrera etc, 1996**] Herrera F., Lozano M. Adaptation of genetic algorithm parameters based on fuzzy logic controllers / In: F. Herrera, J.L. Verdegay (eds.) Genetic Algorithms and Soft Computing, Physica-Verlag, Heidelberg, 1996.
- [**Michael et al., 1993**] Michael A., Takagi H. Dynamic control of genetic algorithms using fuzzy logic techniques. Proc. of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. Morgan Kaufmann, 1993.
- [**Shervani, 1995**] Shervani N. Algorithms for VLSI physical design automation. USA, Kluwer Academy Publisher, 1995.
- [**Zhongyang et al., 2006**] Zhongyang X., Zhang Y., Zhang L., Niu S. A parallel classification algorithm based on hybrid genetic algorithm // Proc. of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China. 2006.

УДК 004.896

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД СТОХАСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ МОДЕЛЕЙ ЭВОЛЮЦИИ И РОЕВОГО (СТАЙНОГО) ПОВЕДЕНИЯ ЖИВОТНЫХ В АФФИННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ ПОИСКА¹

Б.К. Лебедев (*lebedev.b.k@gmail.com*)

В.Б. Лебедев (*lebvlad@rambler.ru*)

О.Б. Лебедев (*lebedev.ob@mail.ru*)

Южный федеральный университет, Таганрог

В работе описывается модифицированная парадигма роя частиц, обеспечивающая, в отличие от канонического метода, возможность использования в аффинном пространстве позиций с целочисленными значениями параметров. Рассмотрены механизмы перемещения частиц в аффинном пространстве для уменьшения веса аффинных связей. Разработанные структуры позиций (хромосом) ориентированы на интеграцию роевого интеллекта и генетической эволюции.

Ключевые слова: рой частиц, генетическая эволюция, аффинное пространство, целочисленные параметры, интеграция

Введение

Метод роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) является методом стохастической оптимизации в чем-то схожим с эволюционными алгоритмами. Этот метод моделирует не эволюцию, а ройное и стайное поведение животных [Clerc, 2006]. В отличие от популяционных методов PSO работает с одной статической популяцией, члены которой постепенно улучшаются с появлением информации о пространстве поиска. Данный метод представляет собой вид *направленной мутации (directed mutation)*. Решения в PSO мутируют в направлении наилучших найденных решений. Частицы никогда не умирают (т.к. нет селекции).

Рассмотрим каноническую парадигму метода PSO, предложенную Джеймсом Кеннеди (James Kennedy) и Расселом Эберхартом (Russell

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00737).

Eberhart) [Kennedy et al., 2006]. Многомерное, вещественное, метрическое пространство поиска населяется роем частиц $P = \{p_i | i=1, 2, \dots, n\}$ [Карпенко А.П., 2014]. Каждая частица p_i размещается в позиции x_i , связана и может взаимодействовать со всеми частицами роя, она тяготеет к лучшему решению роя. Процесс поиска решений итерационный. На каждой итерации вычисляются приспособленности частиц и при необходимости обновляется информация о наилучших найденных позициях. Каждая частица перемещается в новую позицию. Новая позиция определяется как:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), \quad (0.1)$$

где $v_i(t+1)$ – скорость перемещения частицы из позиции $x_i(t)$ в позицию $x_i(t+1)$. Начальное (стартовое) состояние определяется, как $x_i(0)$, $v_i(0)$.

Приведенная формула представлена в векторной форме. Для отдельного измерения j пространства поиска формула примет вид:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (0.2)$$

где $x_{ij}(t)$ – позиция частицы p_i в измерении j , $v_{ij}(t+1)$ – скорость частицы p_i при измерении j .

Введем обозначения:

$x_i(t)$ – текущая позиция частицы, $f_i(t)$ значение целевой функции частицы p_i в позиции $x_i(t)$;

$x_i^*(t)$ – лучшая позиция частицы p_i , которую она посещала с начала первой итерации, $f_i^*(t)$ – значение целевой функции частицы p_i в этой позиции (лучшее значение с момента старта);

$x^*(t)$ – позиция частицы роя с лучшим значением целевой функции $f^*(t)$ среди частиц роя в момент времени t .

Тогда скорость частицы p_i на шаге $(t+1)$ в измерении j вычисляется как:

$$v_{ij}(t+1) = w \cdot v_{ij}(t) + k_1 \cdot \text{rnd}(0, 1) \cdot (x_{ij}^*(t) - x_{ij}(t)) + k_2 \cdot \text{rnd}(0, 1) \cdot (x_j(t) - x_{ij}(t)), \quad (0.3)$$

где $\text{rnd}(0, 1)$ – случайное число в интервале $(0, 1)$, (w, k_1, k_2) – коэффициенты.

По аналогии с эволюционными стратегиями, рой частиц можно трактовать как популяцию, а частицу как индивида (хромосому). Это дает возможность построения гибридной структуры поиска решения, основанную на интеграции генетического поиска с методами роя частиц [Wang, 2009]. В гибридных алгоритмах преимущества одного алгоритма могут компенсировать недостатки другого. Связующим звеном такого подхода является структура данных, описывающая в виде хромосомы решение задачи [Raidl, 2006]. Положение частицы в пространстве поиска является эквивалентом генотипа в эволюционных алгоритмах. Если в качестве частицы используется хромосома, то число параметров, определяющих положение частицы в пространстве решений должно быть равно числу генов в хромосоме. Значение каждого гена откладывается на соответствующей оси пространства ре-

шений. В этом случае возникают некоторые требования к структуре хромосомы, значениям генов и пространству поиска. Предлагается композитная архитектура многоагентной системы бионического поиска на основе роевого интеллекта и генетической эволюции [Blum et al., 2003]. Первый и наиболее простой подход к гибридизации заключается в следующем. С начала поиск решения осуществляется генетическим алгоритмом [Лебедев и др., 2017а]. Затем на основе популяции, полученной на последней итерации генетического поиска, формируется популяция для роевого алгоритма. В формируемую популяцию включаются лучшие, но отличные друг от друга хромосомы. При необходимости полученная популяция доукомплектовывается новыми индивидами. После этого дальнейший поиск решения осуществляется роевым алгоритмом.

При втором подходе метод роя частиц используется в процессе генетического поиска и играет роль, аналогичную генетическим операторам. В этом случае на каждой итерации генетического алгоритма синтез новых хромосом с одной стороны осуществляется с помощью кроссинговера и мутации, а с другой стороны с помощью операторов направленной мутации метода роя частиц.

1. Принципы кодирования списков, содержащих фиксированные суммы элементов

Каноническая парадигма роя частиц предусматривает использование вещественных значений параметров в многомерных, вещественных, метрических пространствах. Однако в большинстве генетических алгоритмов гены в хромосомах имеют целочисленные значения. В свою очередь, хромосомы являются некоторыми интерпретациями решений, которые трансформируются в решения путем декодирования хромосом.

Анализ существующих методов и алгоритмов показал, что в качестве структуры данных, несущих информацию о решении, чаще всего используются списки, фактически являющимися интерпретациями решений.

Данное представление удобно для его использования в различных метаэвристиках (генетические алгоритмы, муравьиные алгоритмы), поскольку они как раз и работают с последовательностями, кодирующими решения. На списки, используемые в качестве интерпретаций решений, в зависимости от специфики задачи, накладываются ограничения.

Рассмотрим принципы кодирования списков, содержащих фиксированные суммы элементов. Подобные списки лежат в основе интерпретаций решений в задачах покрытия [Лебедев и др., 2011], упаковки размещения, в распределительных задачах [Sha et al., 2006], [Лебедев и др., 2017б] и в ряде других задач [Кулинич, 2011].

Общее решение таких задач представляется в виде вектора $Y = \{y_l / l = 1, 2, 3, \dots, n\}$ с целочисленными значениями элементов, удовлетворяющего ограничению:

$$\sum_{l=1}^n y_l = b.$$

Списку соответствует хромосома $H = \{h_l / l = 1, \dots, n-1\}$, представляющая собой совокупность $(n-1)$ генов h_l , целочисленные значения которых могут изменяться в пределах диапазона, определяемого параметром b :

$$0 \leq h_l \leq b, h_l \in H.$$

Значения генов в пределах H являются опорными точками внутри отрезка $[0, b]$ длиной b , разбивающими его на интервалы. Длина интервала, определенного, как $(h_{l+1} - h_l)$, $h_{l+1} \in H$ и $h_l \in H$, и есть величина соответствующего элемента y_l вектора Y (рис. 1). На рис. 1 хромосома $H = \langle 8, 12, 16, 25 \rangle$ для $b = 30$, $n = 5$ соответствует список $Y = \langle 8, 4, 4, 9, 5 \rangle$. Ниже приведены аналитические выражения для определения значений y_i по хромосоме H :

$$y_1 = h_1; y_i = h_i - h_{i-1} \text{ для } i = 2, \dots, n-1; y_n = b - h_{n-1}. \quad (1.1)$$

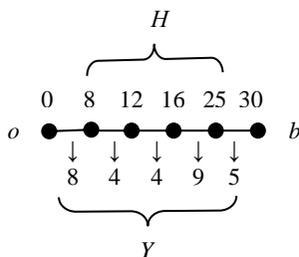


Рис. 1. Декодирование хромосомы

При первом способе кодирования сначала от хромосомы H переходят к хромосоме H^* путем упорядочения генов по возрастанию их значений H . Затем можно воспользоваться аналитическими выражениями (1.1), применимыми к H .

При втором способе кодирования на значения генов накладываются дополнительные ограничения, заключающиеся в том, что в пределах H гены имеют значения, упорядоченные по возрастанию, то есть, если $h_{i-1} \in H$ и $h_i \in H$, то $h_i \geq h_{i-1}$.

Основными генетическими операторами являются кроссинговер и мутация, при этом используется два типа кроссинговера. В работе предлагается

подход к построению модифицированной парадигмы роя частиц, обеспечивающей возможность одновременного использования хромосом с целочисленными значениями параметров в генетическом алгоритме и в алгоритме на основе роя частиц.

2. Механизмы перемещения частиц в аффинном пространстве

В работе предлагается подход к построению модифицированной парадигмы роя частиц, обеспечивающей возможность одновременного использования хромосом с целочисленными значениями параметров в генетическом алгоритме и в алгоритме на основе роя частиц.

Пусть имеется линейное векторное пространство (ЛВП), элементами которого являются n -мерные точки. Каждым любым двум точкам p и q этого пространства однозначным образом сопоставим единственную упорядоченную пару этих точек, которую в дальнейшем будем называть геометрическим вектором (вектором), $p, q \in V(p, q)$ – геометрический вектор (упорядоченная пара).

Совокупность всех точек ЛВП, дополненную геометрическими векторами, называют точечно-векторным или аффинным пространством. Аффинное пространство является n -мерным, если соответствующее ЛВП также является n -мерным. Для любых точек M, N и P выполнимо равенство: $\overline{MN} + \overline{NP} = \overline{MP}$.

Аффинно-релаксационная модель (АРМ) роя частиц – это граф вершины которого соответствуют позициям роя частиц, а дуги соответствуют аффинным связям между позициями (точками) в аффинном пространстве. Аффинность – мера близости двух агентов (частиц). На каждой итерации каждый агент p_i переходит в аффинном пространстве в новое состояние (позицию), при котором вес аффинной связи между агентом p_i и базовым (лучшим) агентом p^* уменьшается. Переход агента p_i из $x_i(t)$ в новую позицию $x_i(t+1)$ осуществляется с помощью релаксационной процедуры, зависящей от вида структуры данных (хромосомы): вектор, матрица, дерево и их совокупности, являющейся интерпретацией решений.

Лучшие частицы с точки зрения целевой функции объявляются «центром притяжения». Векторы перемещения всех частиц в аффинном пространстве устремляются к этим центрам.

Переход возможен с учетом степени близости к одному базовому элементу либо к группе соседних элементов и с учетом вероятности перехода в новое состояние.

Для того, чтобы избежать при описании популяции (роя) путаницы будем далее каждую хромосому, описывающую i -е решение популяции обозначать как $H_i(t) = \{h_{il} / l = 1, 2, \dots, n-1\}$. Причем каждая $H_i(t)$ имеет описанную выше структуру. В нашем случае позиция $x_i(t)$ соответствует решению,

задаваемому хромосомой $H_i(t)$, т.е. $x_i(t) = H_i(t)$. Аналогично $x_i^*(t) = H_i^*(t) = \{h_{il}^* | l=1, 2, \dots, n-1\}$, $x^*(t) = H^*(t) = \{h_{il}^* | l=1, 2, \dots, n-1\}$. Число осей в пространстве решений равно числу n генов в хромосомах $H_i(t)$, $H_i^*(t)$, $H_i^*(t)$. Точками отсчета на каждой оси l являются целочисленные значения генов.

В работе скорость $v_i(t+1)$ рассматривается как средство изменения решения. В отличие от канонического метода роя частиц, в нашем случае скорость $v_i(t+1)$ не может быть представленной в виде аналитического выражения. В качестве аналога скорости $v_i(t+1)$ выступает оператор направленной мутации (ОНМ), суть которого заключается в изменения целочисленных значений генов в хромосоме $H_i(t)$. Перемещение частицы p_i в новую позицию означает переход от хромосомы $H_i(t)$ к новой – $H_i(t+1)$ с новыми целочисленными значениями генов h_{il} , полученными после применения ОНМ.

В качестве оценки степени близости между позициями $x_i(t)$ и $x_z(t)$ будем использовать величину S_{iz} расстояния между хромосомами $H_i(t)$ и $H_z(t)$:

$$S_{iz} = \sum_{l=1}^{n-1} |h_{il} - h_{zl}|. \quad (2.1)$$

Целью перемещения хромосомы $H_i(t)$ в направлении хромосомы $H_z(t)$ является сокращении расстояния между ними.

Суть *процедуры перемещения*, реализуемой ОНМ, заключается в изменения разности между значениями каждой пары генов (h_{il}, h_{zl}) двух хромосом, $l = 1, 2, \dots, n-1$.

Перемещение частицы из позиции $H_i(t)$ в позицию $H_i(t+1)$ под воздействием притяжения к позиции $H_z(t)$ осуществляется путем применения ОНМ к $H_i(t)$ следующим образом. Последовательно просматриваются (начиная с 1-го) локусы хромосом $H_i(t)$ и $H_z(t)$, и сравниваются соответствующие им гены. Если в ходе последовательного просмотра локусов в текущем локусе l выпадает с вероятностью P событие «мутация», то ген $h_{il}(t) \in H_i(t)$ мутирует.

Вероятность мутации P зависит от расстояния $S_{iz}(t)$ между позициями, и определяется следующим образом:

$$P = \alpha \cdot S_{iz}(t) / (n-1), \quad (2.2)$$

где α – коэффициент, $(n-1)$ – длина хромосомы. Таким образом, чем больше расстояния $S_{iz}(t)$ между позициями $H_i(t)$ и $H_z(t)$, тем больше вероятность, что значением $g_{il}(t)$ будет изменено.

Мутации генов выполняются по следующим правилам.

Простой лотереей $L(y_1, p, y_2)$ назовем вероятностное событие, имеющее два возможных исхода y_1 и y_2 , вероятности наступления которых обозначим соответственно через p и $(1-p)$. Другими словами, с вероятностью p лотерея $L(y_1, p, y_2) = y_1$, а с вероятностью $(1-p)$ лотерея $L(y_1, p, y_2) = y_2$,

Ожидаемая (или средняя) цена лотереи определяется по формуле $py_1 + (1-p)y_2$. Как указывалось выше, позиции задаются хромосомами. Позициям $x_i(t)$, $x^*(t)$, $x^c_i(t)$, $x^c_i(t)$ соответствуют следующие хромосомы $H_i(t) = \{h_{il}(t) / l=1, 2, \dots, n-1\}$, $H^*(t) = \{h^*_{il}(t) / l=1, 2, \dots, n-1\}$, $H^c_i(t) = \{h^c_{il}(t) / l=1, 2, \dots, n-1\}$.

Значения генов новой позиции определяется как:

$$h_{il}(t+1) = h_{il}(t) + L(\text{sgn}[(h_{iz}(t) - h_{il}(t))], P, 0), l = 1, 2, \dots, n-1, \quad (2.3)$$

где $\text{sgn}[y]$ – функция знака числа:

$$\text{sgn}(y) = 1, \text{ если } y > 0; \text{sgn}(y) = 0, \text{ если } y = 0; \text{sgn}(y) = -1, \text{ если } y < 0.$$

Пример. Пусть $H_z(t) = \langle 5, 8, 17, 20 \rangle$, $H_i(t) = \langle 4, 10, 15, 22 \rangle$. С учетом (7) $S_{iz}(t) = /5-4/+8-10/+17-15/+20-22/=7$.

Примем $P = 1$, тогда в соответствии с правилами направленной мутации

$$H_i(t+1) = \langle 5, 9, 16, 21 \rangle, \quad S_{iz}(t+1) = /5-5/+8-9/+17-16/+20-21/ = 3.$$

Расстояние между позициями H_i и H_z сократилось с 7 до 3.

Для учета одновременного тяготения частицы p_i к позициям $x^*(t)$ и $x^c_i(t)$ формируется виртуальный центр (позиция) притяжения $x^c_i(t) = H^c_i(t)$ частицы p_i . Формирование *виртуальной позиции* $x^c_i(t)$ осуществляется путем применения процедуры *виртуального* перемещения из позиции $x^*_{i1}(t)$ в виртуальную позицию $x^c_{i1}(t)$ по направлению к позиции $x^*(t)$.

Значения генов виртуальной позиции $x^c_i(t)$ определяются как:

$$h^c_{il}(t) = h^*_{il}(t) + L(\text{sgn}[(h^*_{iz}(t) - h^*_{il}(t))], P, 0), l = 1, 2, \dots, n-1.$$

После определения центра притяжения $x^c_i(t)$ частица $x_i(t)$ с помощью процедуры перемещения перемещается в направлении *виртуальной позиции* $x^c_i(t)$ из позиции $x_i(t)$ в позицию $x_i(t+1)$.

$$h_{il}(t+1) = h_{il}(t) + L(\text{sgn}[(h^c_{il}(t) - h_{il}(t))], P, 0), l = 1, 2, \dots, n-1.$$

После перемещения частицы p_i в новую позицию $x_i(t+1)$ виртуальная позиция $x^c_i(t)$ исключается.

Локальная цель перемещения частицы p_i достижение ею позиции с наилучшим значением целевой функции. Глобальная цель роя частиц – формирование оптимального решения задачи.

Заключение

Предложена композитная архитектура многоагентной системы бионического поиска на основе интеграции роевого интеллекта и генетической эволюции. Связующим звеном такого подхода является единая структура данных, описывающая решение задачи в виде хромосомы. Ключевая проблема, которая была решена в данной работе, связана с разработкой струк-

туры аффинного пространства позиций, позволяющей отображать и осуществлять поиск интерпретаций решений с целочисленными значениями параметров. В отличие от канонического метода роя частиц, для уменьшения веса аффинных связей, путем перемещения частицы p_i в новую позицию аффинного пространства решений разработан оператор направленной мутации, суть которого заключается в изменения целочисленных значений генов в хромосоме. Разработаны новые структуры хромосом для представления решений.

На основе рассмотренной парадигмы разработана программа планирования ПГА. Для проведения экспериментов программы ПГА была использована процедура синтеза контрольных примеров с известным оптимумом $F_{\text{опт}}$ по аналогии с известным методом AFEKO – Floorplanning Examples with Known Optimal area [Cong et al., 2004]. Оценкой качества служит величина $F_{\text{опт}}/F$ – «степень качества», где F – оценка полученного решения. Исследования показали, что число итераций, при которых алгоритм находил лучшее решение, лежит в пределах 110–130. Алгоритм сходится в среднем на 125 итерации. В результате проведенных исследований установлено, что качество решений у гибридного алгоритма на 10–15% лучше качества решений генетического и роевого алгоритмов по отдельности. Эксперименты показали, что увеличение популяции более 100 нецелесообразно, так как это не приводит к заметному изменению качества. Вероятность получения глобального оптимума составила 0,96. В среднем запуск программы обеспечивает нахождения решения, отличающегося от оптимального менее, чем на 2%. Временная сложность алгоритма при фиксированных значениях M и T лежит в пределах $O(n)$. Общая оценка временной сложности лежит в пределах $O(n^2)$ – $O(n^3)$.

Список литературы

- [Карпенко А.П., 2014] Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [Кулинич А.А., 2011] Кулинич А.А. Модель командного поведения агентов в качественной семиотической среде. Ч. 2. Модели и алгоритмы формирования и функционирования команд агентов // Искусственный интеллект и принятие решений, 2018, № 1.
- [Лебедев и др., 2011] Лебедев Б.К., Лебедев В.Б. Покрытие методом роя частиц // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», 2011.
- [Лебедев и др., 2017а] Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедев В.Б. Гибридизация роевого интеллекта и генетической эволюции на примере размещения // Программные продукты, системы и алгоритмы, 2017, № 4.

- [**Лебедев и др., 2017б**] Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.М. Распределение ресурсов на основе гибридных моделей роевого интеллекта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2017, Т. 17, № 6.
- [**Blum et al., 2003**] Blum C., Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison // ACM computing surveys. 2003. No. 35.
- [**Clerc, 2006**] Clerc M. Particle Swarm Optimization // ISTE, London, UK. 2006.
- [**Cong et al., 2004**] Cong J., Nataneli G., Romesis M., Shinnerl. J. An Area-Optimality Study of Floorplanning // Proc. of the International Symposium on Physical Design, Phoenix, AZ, 2004.
- [**Kennedy et al., 2006**] Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization // In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. 1995.
- [**Raidl, 2006**] Raidl G.R. A Unified View on Hybrid Metaheuristics // In: Lecture Notes in Computer Science. 2006.
- [**Sha et al., 2006**] Sha D.Y., Yu Ch. A hybrid particle swarm optimization for job shop scheduling problem // Computers & Industrial Engineering. 2006.
- [**Wang, 2009**] Wang X. Hybrid nature-inspired computation method for optimization // Doctoral Dissertation. Helsinki University of Technology, TKK Dissertations, Espoo. 2009.

УДК 004.832.32

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА МЕТОДОВ ВЫВОДА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО ЗНАЧЕНИЯ ИСТИННОСТИ В СИСТЕМАХ СО МНОГИМИ НЕЧЕТКИМИ ВХОДАМИ¹

В.Г. Синюк (*vgsinuk@mail.ru*)

В.М. Поляков (*p_v_m@mail.ru*)

М.В. Панченко (*panchenko.maks@gmail.com*)

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

В статье предложен подход к сравнительному анализу методов вывода для систем со многими нечеткими входами с применением нечеткого значения истинности. Сформулированы критерии эффективности и приведены доказательства их выполнение для некоторых нечетких импликаций логических систем и систем типа Мамдани. Доказательства приведены для любых t -норм, принимаемых в обобщенном правиле *modus ponens*.

Ключевые слова: нечеткое значение истинности, критерии эффективности, методы нечеткого вывода

Введение

Предложенный в [Куценко и др. 2015; Sinuk et al. 2016] метод вывода на основе нечеткого значения истинности осуществляет реализацию систем MISO-структуры с нечеткими входами, имеющую полиномиальную вычислительную сложность. В то же время он сохраняет нечеткое отношение между фактом и посылкой, чего нет в упрощенной версии [Mamdani et al. 1975], когда эта связь уменьшается до скалярного значения и нечеткость теряется.

Полиномиальная вычислительная сложность позволяет применять данный метод в очень сложных экспертных системах, таких как приложения в

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-07-00487).

биологии, геномике и медицине, использующие базы правил с несколькими сотнями посылок [Kudlacik, 2010].

Этот подход также делает возможным проведение сравнительного анализа методов, определяемых нечеткими импликациями различных логических систем [Рутковский, 2010], для систем со многими нечеткими входами, соответственно, как это выполнено для систем с одним входом [Fukami et al. 1980; Алиев и др. 1991].

Решению данной задачи посвящена данная статья.

1. Метод вывода на основе нечеткого значения истинности

Как известно, частным случаем композиционного правила вывода является обобщенное правило *modus ponens*, которое описывается соотношением [Рутковский, 2010]:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in X} \left\{ \mu_{A'}(x) * \overset{T}{I}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \right\}, \quad (1.1)$$

где $\mu_{A'}(x)$, $\mu_A(x)$, $\mu_{B'}(x)$, $\mu_B(x)$ – функции принадлежности, $*$ – t -норма, представляющая пересечение нечеткого факта A' и нечеткой импликации I . Аргументами импликации являются нечеткая посылка A и заключение B . Нечеткие множества для посылки и факта описываются на пространстве рассуждений X , и на Y для заключения и результата вывода B' .

Рассмотрим соотношение (1.1), используя правило истинностной модификации [Zadeh, 1975] можно записать:

$$\mu_{A'}(x) = \tau_{A/A'}(\mu_A(x)),$$

где $\tau_{A/A'}(\cdot)$ – нечеткое значение истинности A относительно A' , которое рассматривается как достоверное и определяется на основании принципа обобщения [Дюбуа и др. 1990]

$$\tau_{A/A'}(v) = \sup_{\substack{\mu_{A'}(x)=v \\ x \in X}} \{ \mu_A(x) \}, \quad v \in [0, 1].$$

Перейдем от переменной x к переменной v , обозначив $v = \mu_A(x)$. Получим

$$\mu_{A'}(x) = \tau_{A/A'}(\mu_A(x)) = \tau_{A/A'}(v).$$

Тогда (1.1) можно записать в следующем виде:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0, 1]} \left\{ \tau_{A/A'}(v) * \overset{T}{I}(v, \mu_B(y)) \right\}. \quad (1.2)$$

Рассмотрим систему с n входами $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]$ и одним выходом. Взаимосвязь входов и выхода описывается в виде:

$$\text{Если } x_1 \text{ есть } A_1 \text{ и } x_2 \text{ есть } A_2 \text{ и } \dots \text{ и } x_n \text{ есть } A_n, \text{ то } y \text{ есть } B, \quad (1.3)$$

где

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n, \quad y \in Y \text{ и } \mathbf{A} = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n \subseteq \mathbf{X},$$

$B \in Y$ являются нечеткими множествами.

Для обобщения (1.2) для систем с n входами с учетом их независимости, и учитывая [1, 2], что нечеткое значение истинности антецедента правила (1.3) A относительно факта A' , где $A' = A'_1 \times A'_2 \times \dots \times A'_n \subseteq \mathbf{X}$ или x_1 есть A'_1 и x_2 есть A'_2 и \dots и x_n есть A'_n определяется:

$$\tau_{A/A'}(v) = \tilde{T}_{i=1,n} \tau_{A_i/A'_i}(v_i), \quad (1.4)$$

где \tilde{T} – расширенная по принципу обобщения n -местная t -норма.

С учетом (1.4) вывод B' на основе нечеткого значения истинности для систем с n входами (1.2) примет вид:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ \tau_{A/A'}(v)^T * I(v, \mu_B(y)) \right\}. \quad (1.5)$$

2. Анализ эффективности методов нечеткого вывода

Для данного анализа были предложены критерии [Fukami et al. 1980; Алиев и др. 1991]. Смысл данных критериев заключается в том, что они дают возможность проверить насколько тот и иной метод вывода удовлетворяет человеческой интуиции при приближенных рассуждениях.

Представим импликацию в (1.5) в вербальном изложении:

Если v есть "истинно", то y есть B .

Учитывая выше указанные критерии интуитивных отношений между суждениями и заключениями обобщенного нечеткого правила modus ponens на основе нечеткого значения истинности имеют вид:

Критерий 1:

Если v есть "истинно", то y есть B
 v есть "истинно"

 y есть B

Критерий 2-а:

Если v есть "истинно", то y есть B
 v есть "очень истинно"

 y есть очень B

Критерий 2-b:

*Если v есть "истинно", то y есть B
 v есть "очень истинно"

 y есть B*

Критерий 3:

*Если v есть "истинно", то y есть B
 v есть "почти истинно"

 y есть почти B*

Критерий 4-a:

*Если v есть "истинно", то y есть B
 v есть "ложно"

 y есть неизвестно*

Критерий 4-b:

*Если v есть "истинно", то y есть B
 v есть "ложно"

 y есть не B*

Докажем выполнение этих критериев, когда в качестве импликации используется модель Мамдани, т.е.

$$I(v, \mu_B(y)) = v T \mu_B(y).$$

Тогда (1.5) при $\tau_{A/A'}(v) = v^\alpha$ ($\alpha > 0$) примет вид

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ v^\alpha * (v T \mu_B(y)) \right\} = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ (v^\alpha T v) T \mu_B(y) \right\}.$$

Учитывая свойство ассоциативности t -нормы и следуя, что $\sup_{v \in [0,1]} \{v^\alpha T v\} = 1$, получим $\mu_{B'}(y) = \mu_B(y)$, т.е. выполняются критерии 1, 2-b.

Критерий 3 не выполняется.

Рассмотрим критерий 4. В этом случае $\tau_{A/A'}(v) = 1 - v$. Тогда

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ (1-v)^T * (v T \mu_B(y)) \right\} = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ (1-v) T v \right\} T \mu_B(y). \quad (2.1)$$

Рассмотрим (2.1) для разных t -норм.

Если $T = \min(a, b)$, то

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \min \left(\sup_{v \in [0,1]} \{ \min(1-v, v) \}, \mu_B(y) \right) = \min(0,5; \mu_B(y)) = \\ &= \begin{cases} 0,5 & \mu_B(y) \geq 0,5 \\ \mu_B(y) & \mu_B(y) < 0,5 \end{cases} \end{aligned}$$

Если $T = a \cdot b$, то

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \{ (1-v) \cdot v \} \cdot \mu_B(y) = 0,25 \mu_B(y).$$

Если $T = \max(a+b-1, 0)$, то

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \max \left\{ \sup_{v \in [0,1]} \{ \max((1-v) + v - 1, 0) \} + \mu_B(y) - 1, 0 \right\} = \\ &= \max \{ \mu_B(y) - 1, 0 \} = 0. \end{aligned}$$

То есть критерии 4-а и 4-б не выполняются. Рассмотрим, как выполняются критерии, если используется импликация Геделя, т.е.:

$$I(v, \mu_B(y)) = v \xrightarrow{g} \mu_B(y) = \begin{cases} 1 & \text{если } v \leq \mu_B(y) \\ \mu_B(y) & \text{если } v > \mu_B(y) \end{cases}.$$

В этом случае (1.5) примет вид

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ \tau_{A/A'}(v) * \left[v \xrightarrow{g} \mu_B(y) \right] \right\}. \quad (2.2)$$

Обозначим $\mu_\tau(v) = v$. Отметим, что имеют место следующие условия:

$$\{ \mu_\tau(v) \mid v \in [0, 1] \} \supseteq \{ \mu_B(y) \mid y \in Y \}; \quad (2.3)$$

$$\exists v \in [0, 1] \quad \mu_\tau(v) = 0; \quad \exists v' \in [0, 1] \quad \mu_\tau(v') = 1; \quad (2.4)$$

$$\exists y \in Y \quad \mu_B(y) = 0; \quad \exists y' \in Y \quad \mu_B(y') = 1. \quad (2.5)$$

Для проверки критериев 1, 2, 3 определим $\tau_{A/A'}(v) = v^\alpha$ ($\alpha > 0$). Тогда

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ v^\alpha * \left[v \xrightarrow{g} \mu_B(y) \right] \right\}. \quad (2.6)$$

Выделим для $v \in [0, 1]$ два подмножества v_1 и v_2 из $[0, 1]$, которые удовлетворяют следующим условиям:

$$v_1 \cup v_2 = [0, 1]; \quad v_1 \cap v_2 = \emptyset; \quad (2.7)$$

$$v_1 = \{ v \mid \mu_\tau(v) \leq \mu_B(y) \}; \quad (2.8)$$

$$v_2 = \{v \mid \mu_\tau(v) > \mu_B(y)\}. \quad (2.9)$$

Тогда (2.6) примет вид:

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \sup_{v \in v_1} \{v^\alpha T 1\} \vee \sup_{v \in v_2} \{v^\alpha T \mu_B(y)\} = \text{на основании (2.8) и (2.9)} \\ &= \mu_B(y)^\alpha \vee \sup_{v \in v_2} \{v^\alpha T \mu_B(y)\} = \text{на основании (2.3) и (2.8)} \\ &= \mu_B(y)^\alpha \vee (1 T \mu_B(y)) = \mu_B(y)^\alpha \vee \mu_B(y) = \text{на основании (2.4) и (2.9)} \\ &= \begin{cases} \mu_B(y)^\alpha & \text{если } \alpha \leq 1 \\ \mu_B(y) & \text{если } \alpha > 1 \end{cases}, \end{aligned}$$

где \vee – одна из реализаций t -конормы – max, т.е. удовлетворяются критерии 1, 2-а и 3. Рассмотрим 4-й критерий, т.е. $\tau_{A/A'}(v) = 1 - v$. Тогда:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ (1-v)^T * \left[v \xrightarrow[g]{} \mu_B(y) \right] \right\}.$$

Учитывая (2.4) существует $v = 0$, т.е. $\mu_{B'}(y) = 1$, т.е. неизвестно. Таким образом, выполняется критерий 4-а.

Рассмотрим критерии когда импликация представляется в виде [Алиев и др. 1991].

$$\dot{I}(v, \mu_B(y)) = \left[v \xrightarrow[p]{} \mu_B(y) \right] T \left[(1-v) \xrightarrow[g]{} (1 - \mu_B(y)) \right],$$

где $\xrightarrow[p]{} \mu_B(y)$ импликация Решера, которая определяется:

$$v \xrightarrow[p]{} \mu_B(y) = \begin{cases} 1 & \text{если } v \leq \mu_B(y) \\ 0 & \text{если } v > \mu_B(y) \end{cases}.$$

Учитывая данную импликацию (1.5) примет вид:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ \tau_{A/A'}(v)^T * \left[v \xrightarrow[p]{} \mu_B(y) \right] T \left[(1-v) \xrightarrow[g]{} (1 - \mu_B(y)) \right] \right\}. \quad (2.10)$$

Для $v \in [0,1]$ найдутся такие подмножества v_1 , v_2 и v_3 , которые удовлетворяют следующим условиям:

$$\begin{aligned} v_1 \cup v_2 \cup v_3 &= [0,1]; & v_i \cap v_j &= \emptyset \quad i, j = \overline{1,3} \quad i \neq j; \\ \forall v \in v_1 & \mu_\tau(v) < \mu_B(y); \\ \forall v \in v_2 & \mu_\tau(v) = \mu_B(y); \\ \forall v \in v_3 & \mu_\tau(v) > \mu_B(y). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Рассмотрим когда $\tau_{A/A'}(v) = v^\alpha$ ($\alpha > 0$), учитывая (2.11)

$$(2.10) = \sup_{v \in V_1} \{v^\alpha T(1 - \mu_B(y))\} \vee \sup_{v \in V_2} \{v^\alpha\}. \quad (2.12)$$

Но так как $\exists v \in v_1 : \mu_\tau(v) = 0$:

$$(2.12) = \sup_{v \in V_2} \{v^\alpha\} = \mu_B(y)^\alpha \text{ на основании (2.3) и (2.11).}$$

Т.е. выполняются критерии 1, 2-а и 3. Рассмотрим 4-й критерий, когда $\tau_{A/A'}(v) = 1 - v$ (2.10) имеет вид:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ (1-v)^T * \left[v \xrightarrow{p} \mu_B(y) \right] T \left[(1-v) \xrightarrow{g} (1 - \mu_B(y)) \right] \right\}.$$

С учетом (2.11):

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \sup_{v \in V_1} \{ (1-v)T(1 - \mu_B(y)) \} \vee \sup_{v \in V_2} \{ (1-v)T1 \} \vee \sup_{v \in V_3} \{ (1-v)T0 \} = \\ &= (1 - \mu_B(y)) \vee (1 - \mu_B(y)) = 1 - \mu_B(y). \end{aligned}$$

Таким образом, критерий 4-а выполняется.

Заключение

В работе для метода вывода на основе нечеткой степени истинности выведены критерии эффективности, которые дают возможность провести классификацию нечетких импликаций различных логических систем и систем типа Мамдани в отношении удовлетворения человеческой интуиции. Достоинством этого результата является то, что его можно распространить для систем MISO-структуры с нечеткими входами. Проведены доказательства выполнения приведенных критериев для некоторых нечетких импликаций при любых t -нормах, применяемых при композиции обобщенного правила modus ponens. Методика доказательства может быть использована и для остальных наиболее распространенных в нечетком выводе импликаций.

Список литературы

- [Алиев и др. 1991] Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедов Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [Дюбуа и др. 1990] Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике. – М.: Радио и связь, 1990.
- [Куценко и др. 2015] Куценко Д.А., Синюк В. Г. Методы вывода для систем со многими нечеткими входами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2015, № 3.
- [Рутковский, 2010] Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010.

- [Fukami et al. 1980]** Fukami S., Mizumoto M., Tanaka K. Some considerations of fuzzy conditional inference // Fuzzy sets and Systems. 1980. No. 4.
- [Kudlacik, 2010]** Kudlacik P. Advantages of Approximate Reasoning Based on a Fuzzy Truth Value // J. Medical Informatics & Technologies. 2010. Vol. 16.
- [Mamdani et al. 1975]** Mamdani E.H., Assilan S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 20(2).
- [Sinuk et al. 2016]** Sinuk V.G., Polyakov V.M., Kutsenko D.A. New Fuzzy Truth Value Based Inference Methods for Non-singleton MISO Rule-Based Systems // Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI '16), Springer. 2016. Vol. 2.
- [Zadeh, 1975]** Zadeh L.A. Fuzzy logic and approximate reasoning // Synthese 30. 1975.

СЕКЦИЯ 10 | НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МЕТОДЫ И
НЕЙРОИНФОРМАТИКА

УДК 004.932.7:004.4:004.021

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ
СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ ОДНОВРЕМЕННОГО
КАРТИРОВАНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ
ПО ВИДЕОПОТОКУ¹**

А.В. Боковой (*bokovoy@isa.ru*)
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН,
Российский университет дружбы народов, Москва

К.С. Яковлев (*yakovlev@isa.ru*)
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН,
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва

В работе исследуется применение сверточных нейронных сетей для задачи одновременного картирования и локализации робототехнических систем по видеопотоку с единственной камеры. Предлагается программная архитектура системы картирования и локализации беспилотного летательного аппарата с использованием открытого программного обеспечения Robot Operating System.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, картирование, локализация, единственная камера, робототехника

¹ Работа выполнена при поддержке Программы РУДН «5-100» и при частичной поддержке РФФИ (проект №17-29-07053).

Введение

В настоящее время задача повышения степени автономности мобильных робототехнических систем стоит весьма остро. В эффективном решении этой задачи заинтересованы как научные коллективы из разных стран [Афанасьев и др., 2015; Nex et al., 2014; Dierks et al., 2010], так и коммерческие организации [Candiago et al., 2015] и государственные структуры [Мотиенко и др., 2015]. Для успешного решения задачи необходима разработка эффективных методов и алгоритмов автономной навигации [Боковой, 2018], в том числе, методов одновременного картирования и локализации по видеопотоку (vSLAM, от англ. vision-based simultaneous localization and mapping [Lin et al., 2016]). Подобные методы особенно актуальны в контексте разработки перспективных компактных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), так как последние не могут в силу конструктивных ограничений оснащаться лазерными дальномерами, которые обычно используются при картировании наземными роботами. Более того, зачастую компактные БПЛА не могут обеспечить обработку (в режиме реального времени) стерео видеопотока, поэтому необходимо решение задачи одновременного картирования и локализации по видеопотоку единственной камеры (monocular vSLAM) [Celik et al., 2013].

Классический подход к решению задачи vSLAM включает в себя использование особенностей изображений (SIFT, SURF и т.д.) для восстановления расстояний от камеры до выделенных особенностей на нескольких изображениях с последующим нанесением на карту. Среди основных недостатков таких методов можно выделить невозможность определения точных расстояний (используются лишь относительные величины) и неустойчивая работа при повороте камеры без движения. Именно на устранение этих недостатков направлена данная работа.

В работе предлагается рассмотреть возможность применения аппарата сверточных нейронных сетей (Convolutional Neural Networks – CNN) для выделения глубины с единственного изображения, с последующим нанесением этих глубин на карту (в контексте одновременного картирования и локализации по видеопотоку для автономной или автоматической навигации малого БПЛА). Приводится краткий обзор существующих решений, а также описывается программная архитектура предлагаемой системы картирования и локализации.

1. Обзор современных методов картирования и локализации по видеопотоку

Методы одновременного картирования и локализации по видеопотоку можно разделить на 3 основные группы:

- 1) методы, основанные на особенностях изображений (feature-based methods);
- 2) методы, использующие градиенты областей изображений (semi-dense methods);
- 3) методы, использующие всю информацию на изображении (dense methods).

У каждой из групп есть свои преимущества и недостатки. Feature-based методы [Klein et al., 2007; Mur-Artal et al., 2017] используют особенности изображений, которые обладают свойствами инвариантности и устойчивости к искажениям на изображениях. Используя полученные на каждом изображении особенности, составляется карта неизвестной местности. Поскольку операции выделения и сравнения особенностей обычно не являются ресурсозатратными, feature-based методы могут применяться для картирования и локализации в реальном времени. При этом высокое качество обрабатываемого видеопотока обычно не требуется. Основными недостатками применения подобных методов являются разрежённость и малая детализированность получаемых карт.

Dense методы [Greene et al., 2016] используют всю информацию на изображениях для восстановления карты глубины и построения карты местности. Эта группа методов позволяет строить высокодетализированные и точные карты, но отличается медленной обработкой каждого кадра (без ускорения на графическом процессоре). Также, искажения, которые могут присутствовать на изображениях могут существенно снизить качество построенной карты.

Semi-dense методы [Engel et al., 2014; Engel et al., 2018] используют часть информации, полученной на изображении. Как правило, это – наиболее контрастные области. Карта строится из пикселей и соответствующих им глубин. Semi-dense методы можно рассматривать как компромисс между dense и feature-based методами по скорости работы, детализированности карты и устойчивости к искажениям на изображениях.

Для использования методов одновременного картирования и локализации по видеопотоку в реальном времени на малых беспилотных летательных аппаратах, как правило, используются feature-based и semi-dense методы. Детализированность карт, полученных этими методами, может быть недостаточной для задач автономной навигации БПЛА, в частности, для задачи планирования траекторий [Андрейчук и др., 2017].

2. Восстановление карты глубины с помощью сверточных нейронных сетей

Проблемы низкой детализированности карт, а также масштабирования и устойчивости работы при повороте камеры без движения, можно решить, если для восстановления глубины изображения, полученного с единственной камеры, использовать не сравнение особенностей/пикселей/ контрастных областей с предыдущими изображениями, а использовать сверточные нейронные сети. Восстановление глубины из единственного изображения позволит добавить к каждому изображению на видеопотоке соответствующую карту глубины, т.е. в качестве входных данных для алгоритма vSLAM будут поступать RGB-D изображения.



Рис. 1. Исходное изображение (слева) и восстановленная карта глубины (справа). Яркость пикселей на изображении справа означают расстояния до соответствующих объектов (ярче – дальше)

Таким образом, дополнив RGB изображения с камеры соответствующей картой глубины, можно рассматривать поставленную задачу одновременного картирования и локализации по видеопотоку, полученному с единственной камеры как задачу RGB-D vSLAM [Kerl et al., 2013]. Использование RGB-D изображений позволит существенно повысить детализированность карт без потери точности и времени, по сравнению с dense методами [Mur-Artal et al., 2017]. Озвученный подход уже предлагался в работах, посвященных реконструкции карты глубины по единственному изображению, семантической разметке и нахождению замыкания траекторий [Garg et al., 2016; Dong et al., 2016]. Однако существующие на данный момент работы в области vSLAM с использованием нейронных сетей [Tateno et al., 2017] не предоставляют возможности повторить результаты и проверить их в реальных условиях эксплуатации робототехнических систем.

В общем случае, сверточная нейронная сеть представляет собой набор скрытых слоев: свертки (convolutional layer), субдискретизации (pooling

layer), полносвязных (fully connected network) и ряда других. Слой свертки используется для выделения карт особенностей изображений (feature maps) посредством применения операции свертки. Веса соответствующих фильтров при этом вычисляются во время обучения. Слой субдискретизации уменьшает размер карты особенностей, полученной на шаге свертки. Уменьшение размера обусловлено тем, что если на шаге свертки уже был получен набор особенностей изображения, то уменьшение карт изображения не даст потери информации для последующих слоев. Операции субдискретизации позволяет существенно снизить объем вычислений и памяти, необходимой для обработки карт особенностей. Полносвязные слои сети используются, когда необходимо комбинировать полученные признаки (например, для классификации объектов).

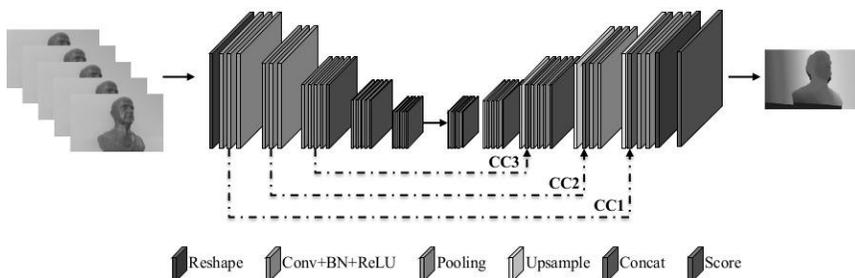


Рис. 2. Архитектура сети Deep Depth From Focus Net (DDFFNet)

Описанная выше архитектура является стереотипной для задачи классификации изображений, но для задачи выделения глубины из изображения необходима модификация архитектуры нейронной сети путем добавления дополнительных операций развертки (deconvolution) и повышения дискретизации (upsampling), обратных тем, что применяются на этапах свертки и субдискретизации [Hazirbas et al., 2017]. В результате, на выходе нейронной сети получается не набор (комбинация) признаков, а карта весов, которую можно интерпретировать, как карту глубины. Таким образом, изображение и восстановленную из него карту глубины можно использовать как входные данные для алгоритмов vSLAM.

3. Архитектура программной системы картирования и локализации с использованием сверточных нейронных сетей

Для реализации системы одновременного картирования и локализации по видеопотоку для малых БПЛА, предлагается использовать широко применяемый для робототехнических систем фреймворк Robot Operating

System (ROS). Фреймворк предоставляет внутренний механизм взаимодействия отдельных узлов (nodes) посредством специальных каналов для передачи данных (topics). Узлы исполняются независимо друг от друга, и каждый из них выполняет отдельную задачу. Существует большое количество готовых открытых решений для выполнения широкого круга исследовательских задач, в частности, для решения задачи vSLAM. Одним из таких решений является RTABMAP [Labbe et al., 2014]. RTABMAP представляет из себя узел ROS, который принимает на вход видеопоток (или набор изображений) и набор карт глубин для каждого изображения. На выходе получается карта местности, в которой производилась съемка, в виде облака точек и набор позиций камеры в полученной карте.

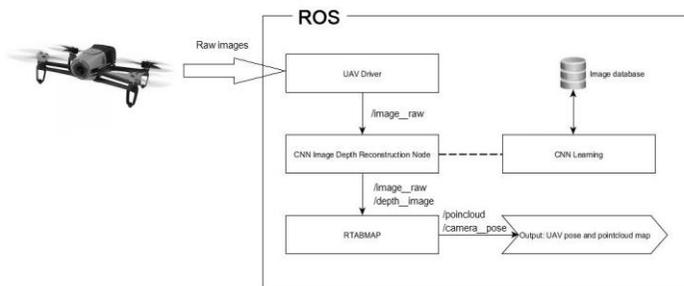


Рис 3. Архитектура предлагаемой программной системы

Для реализации системы необходимо разработать узел, отвечающий за реконструкцию глубины с помощью изображения, полученного с единственной камеры и предусмотреть возможность обучения узла. Для ускорения процесса обучение проводится на отдельном вычислителе, а полученные веса используются в алгоритме, который запущен на рабочей станции. Программную реализацию сверточной нейронной сети предлагается разрабатывать с использованием открытой библиотеки Caffe [Jia et al., 2014], которая обеспечивает возможность обработки изображений и обучение сети на графическом процессоре, что повысит скорость работы алгоритмов обучения и выделения глубин изображений.

Работу системы предлагается организовать следующим образом: от БПЛА по беспроводному каналу поступает последовательность цветных изображений (видеопоток), полученных с камеры в реальном времени. Узел “UAV Driver” принимает изображение и преобразует его в формат sensor_msgs/Image и передает его через «топик» image_raw следующему узлу. “CNN Image Depth Reconstruction Node” использует полученные на этапе обучения веса сверточной нейронной сети (подробнее об этом – ниже) для вос-

становления карты глубины изображения. Полученная карта глубины передается через «топик» `depth_image` следующему узлу “RATVMAP”, который проводит картирование и локализацию с использованием изображения и его карты глубины. На выходе системы – восстановленная карта (облако точек) `pointcloud` и позиция камеры в полученной карте `camera_pose`.

Для обучения сети будет применен подход обучения с учителем (supervised learning) с использованием набора открытых данных, полученных как с единственных камер, так и с RGB-D датчиков. Основным условием является наличие изображения и соответствующей ему карты глубины или возможность эту карту глубины извлечь из карты местности (путем сопоставления позиции камеры и карты). На текущий момент, была обучена экспериментальная архитектура нейронной сети (рис. 2) на 30000 изображений из NYU Dataset v2. Удалось добиться уменьшения среднеквадратичной ошибки (RMSE) до 0,832 на тестовой выборке (2500 изображений), что сопоставимо с современными методами. Для увеличения точности работы сети предлагается увеличить обучающую выборку, составив ее из нескольких открытых коллекций данных. Сам процесс обучения будет проходить на рабочей станции для сокращения времени на обработку изображений. В качестве основных коллекций планируется использовать SUN RGB-D, ICL-NUIM RGB-D Benchmark Dataset, TUM RGB-D SLAM Dataset, Malaga Dataset 2009 и др. Общее количество изображений с соответствующими картами глубины – более 1 млн.

4. Дальнейшие исследования

В качестве основного направления для дальнейших работ в области применения сверточных нейронных сетей для задачи одновременного картирования и локализации по видеопотоку, полученному с единственной камеры сложной робототехнической системы, будут теоретически и экспериментально исследованы распространённые архитектуры нейронных сетей, а также программно реализована предлагаемая система vSLAM. Работоспособность системы будет проверена на реальном малом беспилотном летательном аппарате Parrot Bebop.

Заключение

В работе рассмотрена архитектура сверточных нейронных сетей, применимых для решения задачи vSLAM по видеопотоку, полученному с единственной камеры. Приведена программная архитектура будущей системы с учетом современных средств для работы с робототехническими устройствами и нейронными сетями. Выделены основные направления дальнейшей работы.

Список литературы

- [Андрейчук и др., 2017] Андрейчук А.А., Яковлев К.С. Планирование траектории на плоскости с учетом размера агента (мобильного робота, беспилотного транспортного средства) // IV Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2017), 2017.
- [Афанасьев и др., 2015] Афанасьев И.М., Сагитов А.Г., Данилов И.Ю., Магид Е.А. Навигация гетерогенной группы роботов (БПЛА и БНР) через лабиринт в 3D симуляторе Gazebo методом вероятностной дорожной карты // II Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта», 2015.
- [Боковой, 2018] Боковой А.В. Программная реализация системы построения траектории для обеспечения автономной навигации колесного мобильного робота // Информатика, управление и системный анализ: Труды V Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. Ростов-на-Дону: Мини-Тайп, 2018.
- [Мотиенко и др., 2015] Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2015, № 3.
- [Candiago et al., 2015] Candiago S. et al. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. No. 4.
- [Celik et al., 2013] Çelik K., Somani A. K. Monocular vision SLAM for indoor aerial vehicles // Journal of electrical and computer engineering. 2013. Vol. 2013.
- [Dierks et al., 2010] Dierks T., Jagannathan S. Output feedback control of a quadrotor UAV using neural networks // IEEE transactions on neural networks. 2010. Vol. 21. No. 1.
- [Dong et al., 2016] Dong J. et al. VL-SLAM: Real-Time Visual-Inertial Navigation and Semantic Mapping // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Live Demo. 2016.
- [Engel et al., 2014] Engel J., Schöps T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM // European Conference on Computer Vision. – Springer, Cham, 2014.
- [Engel et al., 2018] Engel J., Koltun V., Cremers D. Direct sparse odometry // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2018. Vol. 40. No. 3.
- [Garg et al., 2016] Garg R. et al. Unsupervised CNN for single view depth estimation: Geometry to the rescue // European Conference on Computer Vision. – Springer, Cham, 2016.
- [Greene et al., 2016] Greene W.N. et al. Multi-level mapping: Real-time dense monocular SLAM // Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on. IEEE, 2016.
- [Hazirbas et al., 2017] Hazirbas C., Leal-Taixé L., Cremers D. Deep Depth From Focus // arXiv preprint arXiv: 1704.01085. 2017.
- [Jia et al., 2014] Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding // Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia. – ACM, 2014.

- [Kerl et al., 2013]** Kerl C., Sturm J., Cremers D. Dense visual SLAM for RGB-D cameras // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2013.
- [Klein et al., 2007]** Klein G., Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces // Mixed and Augmented Reality, 2007. ISMAR 2007. 6th IEEE and ACM International Symposium on. IEEE, 2007.
- [Labbe et al., 2014]** Labbé M., Michaud F. Online global loop closure detection for large-scale multi-session graph-based slam // Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2014.
- [LeCun et al., 1998]** LeCun Y. et al. Gradient-based learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE. 1998. Vol. 86. No. 11.
- [Lin et al., 2016]** Lin B. et al. Video-based 3D reconstruction, laparoscope localization and deformation recovery for abdominal minimally invasive surgery: a survey // The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 2016. Vol. 12. No. 2.
- [Mur-Artal et al., 2017]** Mur-Artal R., Tardós J. D. Orb-slam2: An open-source slam system for monocular, stereo, and RGB-D cameras // IEEE Transactions on Robotics. 2017. Vol. 33. No. 5.
- [Nex et al., 2014]** Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review // Applied geomatics. 2014. Vol. 6. No. 1.
- [Tateno et al., 2017]** CNN-SLAM: Real-time dense monocular SLAM with learned depth prediction // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. Vol. 2.

УДК 004.932.1

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРАКТАЛЬНОЙ СУБДИСКРЕТИЗАЦИИ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А.А. Брынза (*wolf_93_21@mail.ru*)
М.О. Корлякова (*mkorlyakova@yandex.ru*)
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга

В данной статье рассматривается возможность снижения размерности изображений с помощью теории фрактальных кривых. Дано описание кривых, называемых фракталами. Проведены эксперименты и выполнена оценка результатов замены слоя субдискретизации на описание фрагмента изображения через фрактальную траекторию. Сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: сверточные сети, фрактальные кривые, снижение размерности изображений, распознавание образов

Введение

Современные системы управления все чаще используют методы машинного обучения. Особенно это заметно на примере систем технического зрения, которые позволяют внедрять системы управления в средах, ориентированных на присутствие человека и взаимодействие с ним. Повсеместное внедрение систем технического зрения в робототехнику позволяет решать задачи, связанные с пространственной ориентацией и построения сетки пересечений [Павловский и др., 2016]. Основой такого активного развития стали технологии глубинного обучения и реализующие их свёрточные и генеративные нейронные сети [Хайкин, 2006; Tim et., 2016; Ian Goodfellow et., 2014]. Однако для этих систем характерно большое время обучения и необходимость предъявления огромных обучающих выборок. Поэтому свёрточные слои не исключают предварительной минимизации обучающей выборки или записи образца при предобработке данных, составляющих обучающую выборку.

Существующие методы снижения сложности задачи классификации, например, метод главных компонент [Jolliffe, 2002], методы дескриптив-

ного описания изображений (SURF, SIFT, ORB и др.) [Rublee et., 2011], минимизации выборочной константы Липшица [Царегородцев, 2003] требуют дополнительных вычислительных затрат. Цели этих процедур состоят в уменьшении размера изображений без потери информации. С другой стороны, процедуры субдискретизации признаков в глубинных сетях тоже стремятся обеспечить сжатие и выделение существенных частей модели. Рассмотрим подход к снижению размерности изображений на основе фрактальных кривых, позволяющий заменить этап субдискретизации карт признаков для повышения скорости обучения и классификации в свёрточных нейронных сетях.

1. Структура свёрточной нейронной сети

Свёрточная нейронная сеть (СНС) реализует следующие этапы обработки изображений при решении задач распознавания образов [LeCun et al., 1995]:

- свертка исходного изображения объекта при помощи нескольких небольших фильтров;
- субдискретизация (объединение) полученных на предыдущем шаге ключевых признаков;
- повтор предыдущих шагов (свертки, а затем субдискретизации) до тех пор, пока на выходе не получится достаточное количество признаков исходного изображения;
- использование модели полносвязного слоя для получения решения конкретной задачи.

Таким образом, СНС благодаря своей архитектуре в основном используется для решения сложных графических задач распознавания и классификации изображений.

Свёрточная нейронная сеть имеет ряд значительных преимуществ, благодаря которым она обходит по вычислительной мощности ранее предложенные нейросетевые алгоритмы распознавания [LeCun et al., 1995]:

- инвариантность к поворотам;
- инвариантность к неравномерному распределению света;
- низкая чувствительность к сдвигам.

Рассмотрим особенности СНС на примере классической задачи распознавания рукописных символов, в различных условиях освещённости и ориентации. Проведем анализ взаимосвязи точности классификации обученной сети, от ее структуры и объема. Общая схема сети приведена на рис. 1. Опишем основные составляющие этой схемы.

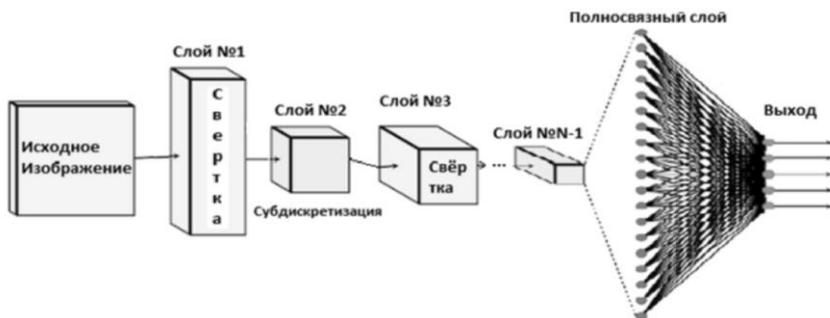


Рис. 1. Общий вид структуры СНС

В слое свертки пиксели, находящиеся близко друг к другу, теснее «взаимодействуют» при формировании интересующего нас признака, чем пиксели, расположенные в противоположных «углах». Кроме того, если в процессе классификации изображения небольшая черта считается очень важной, не будет иметь значения, на каком участке изображения эта черта обнаружена.

Используется понятие оператора свертки следующего вида:

$$(I \cdot K)_{xy} = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w K_{ij} \times I_{x+i-1, y+j-1},$$

где I – двумерное изображение и K – ядро свертки.

Для решения задачи распознавания, анализируются матрицы свертки различной размерности. Вычисляем свернутое изображение $I \cdot K$, накладывая ядро на изображение всеми возможными способами и записывая сумму произведений элементов исходного изображения и ядра. Генерация ядра проводится случайным образом для получения наиболее разнообразного набора карт признаков.

Процесс субдискретизации описан в [Vivek et al.,2012], реализуется в слое подвыборки и заключается в получении на его входе отдельных фрагментов изображения (обычно 2×2) и их агрегировании. Существует несколько способов агрегации, наиболее часто используемый вариант заключается в выборе максимального значения из всех пикселей.

Полносвязный слой выводит N -мерный вектор (N – число классов) для определения нужного класса. Работа организуется путем обращения к выходу предыдущего слоя (карты признаков) и определения свойств, которые наиболее характерны для определенного класса.

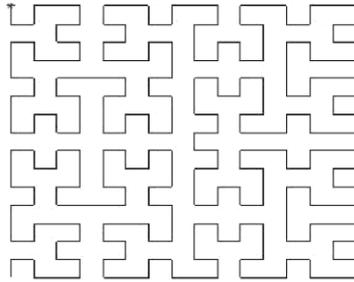


Рис. 4. Кривая Гильберта 4го порядка

После шага свёртки для полученной карты признаков определяется порядок фрактальной кривой, и проводится её построение. Порядок кривой зависит от размера карты признаков. Экспериментально установлено, что наиболее подходящими являются следующие порядки в соответствии с размером изображения (Im_w – размер изображения):

- при $Im_w < 7$ – кривая 2-го порядка;
- при $Im_w > 7$ и $Im_w < 17$ – кривая 3-го порядка;
- при $Im_w > 16$ и $Im_w < 33$ – кривая 4-го порядка;
- при $Im_w > 32$ – кривая 5-го порядка.

На выходе СНС используется последовательность слоёв свёрток для субдискретизации единственного признака с наибольшей мощностью, поэтому нет необходимости в получении схожих карт на каждом шаге.



Рис. 5. Вид анализируемого фрагмента, подаваемого на вход СНС



Рис. 6. Вид фрагментов, полученных после 1-го слоя субдискретизации

Рассмотрим вид фрагментов, получаемых после аналогичных процедур свёртки, но с использованием рассмотренного выше метода обхода фрагментов. Полученные пиксели объединяются в вектора (рис. 7). При несоответствии базовой размерности отсутствующие пиксели «зачерняются».

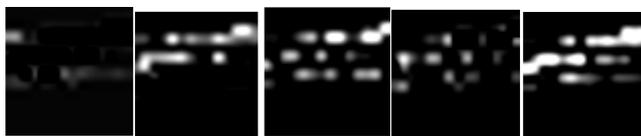


Рис. 7. Вид фрагментов, полученных после 1-го слоя субдискретизации, с использованием обхода по фрактальной кривой

3. Проведение экспериментов. Оценка полученных результатов

Для оценки полученных результатов решим классическую задачу распознавания рукописных цифр. За основу используем выборку MNIST [Лекун, 2018]. Проведем несколько операций обучения сети, с использованием 5000 и 20000 фрагментов, разбитых на 10 классов. Оценим скорость обучения и точность классификации полученных сетей. Обучение производится без переноса вычислительной нагрузки на GPU.

Результаты качества классификации и временные затраты на обучение приведены в табл. 1.

Табл. 1.

Размер обучающей выборки	Метод снижения размерности	Число тестовых фрагментов	Точность классификации, %	Время обучения
5000	Слой субдискретизации	1000	69,7	1 ч 8 мин
20000			71,2	4 ч 42 мин
5000	Обход по кривой Гильберта		48,1	49 мин
20000			52,8	3 ч 21 мин

Исходя из полученных результатов, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что снижение размерности изображений в СНС путём замены слоя субдискретизации, приводит к снижению точности классификации, однако при этом наблюдается значительное снижение времени, необходимого на обучение сети. При этом увеличение размера обучающей выборки позволяет сократить разрыв в точности классификации.

Заключение

В результате исследований можно сделать вывод, что для модели на основе фрактальных кривых в СНС не удастся повысить точность работы по сравнению с базовой моделью. Однако время обучения снижается, что позволяет рассчитывать на возможность применения в задачах распознавания с меньшими требованиями к ошибкам оценки.

Список литературы

- [Аминов, 1987] Аминов Ю.А. Дифференциальная геометрия и топология кривых. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
- [Брынза и др., 2017] Брынза А.А., Корлякова М.О. Применение фрактальных кривых для описания изображений при решении задачи классификации в нейронных сетях // Международная научно-техническая конференция Нейроинформатика-2017, 2017.
- [Васильева, 2015] Васильева М.В. Исследование мира фракталов // Научное сообщество студентов XXI столетия. технические науки: сб. ст. по мат. XXIX Международ. студ. науч.-практ. конф., 2015, № 2(28).
- [Ильин и др., 1985] Ильин В.А., Садовничий В.А., Сендов Б.Х. Математический анализ / Под ред. А. Н. Тихонова. – 2-е изд., перераб. – М.: МГУ, 1985.
- [Лекун, 2018] Лекун Я., База данных MNIST. – <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/index.html>.
- [Павловский и др., 2016] Павловский В.Е., Смолин В.С., Алисейчик А.П., Орлов И.А. Интеллектуальные технологии управления поведением робота-манипулятора манГо // Сб. тр. XV Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием, КИИ-2016, 2016.
- [Хайкин, 2006] Хайкин С., Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006.
- [Царегородцев, 2003] Царегородцев В.Г. Оптимизация предобработки данных: константа Липшица обучающей выборки и свойства обученных нейронных сетей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2003, № 7.
- [Goodfellow et., 2014] Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Generative adversarial nets // In NIPS, 2014. – <https://arxiv.org/pdf/1406.2661.pdf>.
- [Jolliffe, 2002] Jolliffe I. Principal Component Analysis, Series: Springer Series in Statistics, 2nd ed., Springer, NY, XXIX. 2002.
- [LeCun et al., 1995] LeCun Y., Bengio Y. Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series // The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. 1995. Vol. 3361. No. 10.
- [Rublee et., 2011] Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF // In Proc. of the Int. Conf. on Computer Vision. 2011.
- [Salimans et., 2016] Salimans T., Goodfellow I., Zaremba W., Cheung V., Radford A., Chen X. Improved Techniques for Training GANs (Submitted on 10 Jun 2016). – <https://arxiv.org/pdf/1606.03498.pdf>.
- [Vivek et al., 2012] Vivek S., Navdeep S. Artificial Neural Networks Based Optical Character Recognition // An International Journal (SIPIJ). 2012. Vol. 3, No. 5.

УДК 004.09

МЕТОД И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ О МАССЕ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А.С. Войцицкая (*voitsitskay@mail.ru*)

В.С. Луферов (*lyferov@yandex.ru*)

Я.А. Федулов (*fedulov_a@mail.ru*)

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск

В работе предлагается метод, позволяющий измерить массу жидких веществ различного типа с применением искусственных нейронных сетей. Применение метода и разработанной информационно-измерительной системы позволит повысить точность измерения массы жидких веществ при использовании резервуаров разной формы и углов наклона, с учетом различных внутренних и внешних факторов.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, тарирование резервуара, измерение массы жидкого вещества, гидростатическое давление и угол наклона

Введение

В настоящее время применяется большое количество методов и систем измерения массы различных веществ (твердого и жидкого состава) [Зоря и др., 2004; Секацкий и др., 2007], однако, традиционные подходы к решению этих задач обладают рядом существенных ограничений. Широко используемыми устройствами измерения массы жидких веществ являются: системы на основе поплавков [Дивин и др., 2012], тензодатчики [Мехеда, 2011], расходомеры [Кремлевский, 2002]. Методы измерения массы жидкостей, применяющие эти устройства, используются в различных отраслях (промышленность, сельское хозяйство, хранение и перекачка химических веществ). Для повышения точности результатов измерения дополнительно должны быть учтены изменяющиеся особенности окружающей среды (температура, влажность, давление). Кроме того, одной из наиболее труднореализуемых

на практике задачами измерения является учет наклона, габаритов и конфигурации емкостей, в которые помещены жидкие вещества, наличие внутренних шнеков, а также учет ограничений, связанных с особыми свойствами некоторых жидких веществ (опасны для жизни человека, фракционное деление, вязкость, плотность). Вязкость жидкостей в ряде случаев также не позволяют использовать типовые методы измерения массы.

Методы измерения, основывающиеся на только показателях объема и плотности, не применимы на производствах, поскольку эти параметры зависят от температуры, а масса вещества остается постоянной при изменяющихся внешних условиях.

Как правило, большинство из применяемых методов используется только для измерения массы определенного типа жидкости в фиксированных условиях измерения, без гибкой настройки под изменяющиеся внутренние и внешние факторы. Перенастройка же измерительных систем в данном случае приводит к дополнительным затратам на оборудование, расходам на освоение и обучение персонала.

В статье представлен разработанный метод измерения массы жидких веществ на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), реализуемый в рамках созданной информационно-измерительной системы (ИИС), позволяющий гибко адаптировать систему к реальным условиям с учетом изменяющихся внешних и внутренних факторов.

1. Информационно измерительная система и разработанный метод с применением искусственных нейронных сетей

На рис. 1 представлена схема процесса измерения массы жидкого вещества в предварительно тарированном резервуаре с установленными датчиками (атмосферного, относительного и гидростатического давления, температуры, влажности). Элементами схемы являются: усилитель значения тока, аналого-цифровые преобразователи, ИНС и устройство индикации, которые позволяют провести измерение массы жидкого вещества без непосредственного использования устройств взвешивания.

Для осуществления измерения массы необходимо подготовить систему, используя этапы: во-первых, тарирования емкости, в которой предполагается осуществление измерения массы жидкости; во-вторых, непосредственного измерения массы жидкого вещества.

Разработанная информационно-измерительная система состоит из следующих элементов: датчик гидростатического давления (ДД); датчик атмосферного давления (P_{atm}); датчик относительного давления (P_{rel}); температура окружающей среды (T_{amb}); датчик влажности (Hum); усилитель значения тока (далее УС); аналого-цифровой преобразователь (АЦП); искусственная нейронная сеть; устройство индикации (УИ).

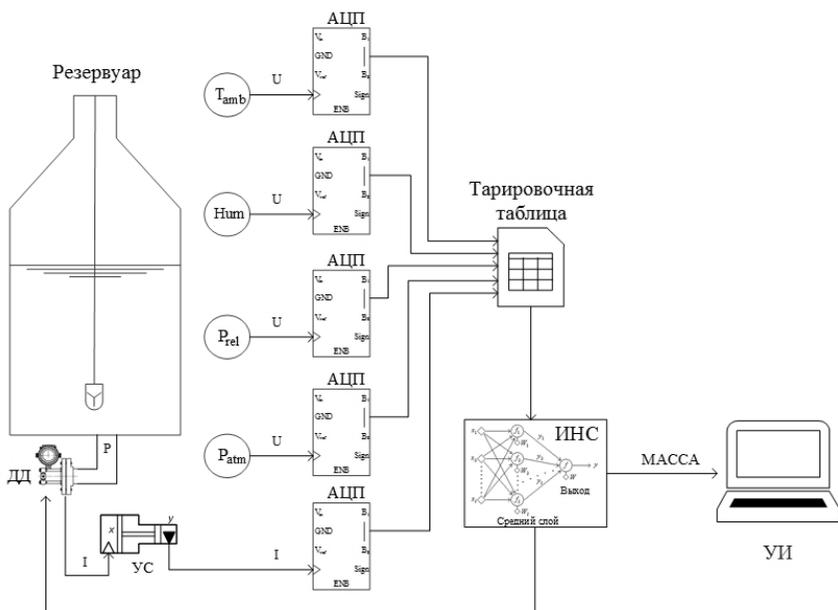


Рис. 7. Схема процесса измерения массы жидкого вещества

Предлагаемый метод измерения массы жидкого вещества включает в себя рассмотренные ниже этапы.

Этап 1. Тарирование резервуара.

Определяется минимальное значения массы жидкого вещества, соответствующее константному значению датчика давления (на границе чувствительности). Далее определяется показатель давления для соответствующего значения массы вещества. Затем проводится заполнение резервуара определенными минимальными порциями и фиксируются соответствующие значения с датчика давления.

Процесс тарирования по каждому значению необходимо выполнять до заполнения резервуара. В итоге будет сформирована тарировочная таблица. Одновременно с тарированием также осуществляется фиксация: h – высоты «столба» жидкости, t – температуры и φ – влажности окружающей среды, P_{rel} – относительного давления паров внутри резервуара и P_{atm} – атмосферного давления.

Полученные значения величин являются входными параметрами для создаваемой ИНС. Для тарирования можно использовать как жидкость, измерение массы которой будет проводиться, так и, например, в случае неизменных внутренних и внешних факторов, обычной воды.

Этап 2. Обучение ИНС. Необходимо установить состояния, измерение массы вещества при которых вводится погрешность, то есть найти начальные значения X и вычисленные данные Y .

$$Y^n = f(X^n), n = 1, \dots, N, \quad (0.1)$$

где X^n – вектор, значениями которого являются значения масс тарируемого жидкого вещества; Y^n – вектор, значениями которого являются данные реальных масс жидкого вещества, N – число значений тарирующей таблицы.

Обучение ИНС выполняется по заполненной на предыдущем этапе тарирующей таблице. Эта ИНС может быть обучена как одновременно с формированием отдельных обучающих примеров из тарирующей таблицы, так и по итогу заполнения этой таблицы для всех значений.

Для обучения ИНС целесообразно использовать типовой алгоритм обратного распространения ошибки.

Этап 3. Измерение массы жидкого вещества [Войцицкая, 2017]. Резервуар заполняется жидким веществом. С датчика в ИИС на вход ИНС поступает значение давления, а также значения дополнительных параметров (h – высота «столба» залитого вещества; φ – влажность и T_{oc} – температура окружающей среды; P_{atm} – атмосферное давление).

Шаг 1. ДД преобразует измеренную физическую величину – гидростатического давления (P) в электрический сигнал, готовый для передачи на достаточно большие расстояния – ток (I). Датчики с низкой стоимостью, небольшими габаритными размерами, имеют маленькое энергопотребление.

Шаг 2. Значение I преобразуется в напряжение (U), необходимое для АЦП. Важно использовать усилитель тока перед подачей аналогового сигнала на АЦП, так как уменьшается зашумленность сигнала, что требуется при использовании удаленного датчика давления. Усилитель тока оптимизирует сигнал с использованием фильтрации и помогает сохранить высокое быстродействие.

Шаг 3. С использованием ИНС определяется значение массы (по давлению). При измерении других жидкостей данная информационно-измерительная система позволяет оперативно настраиваться на другой тип жидкости с заданной точностью, за счет первоначального обучения.

На выходе ИНС формируется точное или обобщенное значение выходного параметра (массы жидкого вещества).

Шаг 4. Вывод на устройство индикации значения массы жидкого вещества.

2. Оценка точности измерений массы жидкого вещества с учетом формы и расположения резервуара

В реальных условиях промышленного измерения массы жидких веществ сложно установить резервуар идеально ровно.

Традиционные методы измерения массы жидкого вещества, в условиях неидеально установленного резервуара (наклона на малый угол), геометрически-сложной формы и наличия внутренних неровностей (шнека), зачастую отображают искаженное и недостаточно точное значение массы измеряемого вещества.

Метод, взятый за основу для сравнения [Скворцов и др., 2013], при указанных ограничениях выдает ошибочные значения давления, при этом искажение будет наименьшим при расположении датчика давления по центру дна резервуара. Установив датчик ближе к стороне завала, он дает завышенные данные, так как на него давит больший столб жидкого вещества, в случае же его установки дальше от стороны наклона, на него действует меньший столб жидкости и, соответственно, показатели давления меньше реальных.

Предлагаемый метод позволяет осуществлять измерения значений гидростатического давления независимо от места расположения измерительных датчиков, от внутренних составных частей и неровностей, так как осуществляется предварительная тарировка выбранного для заполнения резервуара и используется обученная ИНС.

В работе представлены сравнительные данные по величине искажений при измерении массы жидкости методом прототипом и предлагаемым методом в сравнении с эталонным значением массы, при различных углах наклона резервуара в вертикальной плоскости.

Из рис. 2 видно, что столб жидкости неравномерно давит на площадь дна резервуара. Далее в табл. 1 и табл. 2 представлены ошибки при наклоне резервуара в диапазоне $\alpha = 5 \div 20^\circ$. Диапазон выбран исходя из реальных условий наклона. На рис. 2 представлены следующие элементы: А – датчик атмосферного давления, О – датчик относительного давления, Т – датчик температуры, В – датчик влажности, ДД – датчик гидростатического давления, P_0 – давление паров внутри резервуара, $P_{ж}$ – давление жидкости.

Среднее значение ошибки при угле наклона резервуара $\alpha = 10^\circ$ метода измерения массы, используемого в прототипе равно 3,97%, для разработанного метода – 0,59%.

На рис. 3 представлен график зависимости средней ошибки измерения массы для предлагаемого способа и прототипа относительно эталонной массы жидкости в диапазоне отклонения резервуара ($0-20^\circ$).

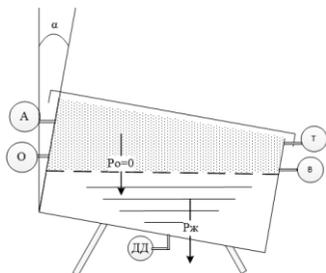


Рис. 8. Наклонный резервуар

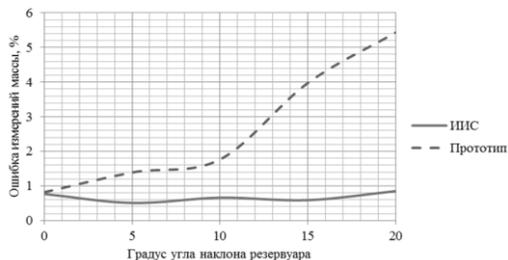


Рис. 9. Зависимость средней ошибки измерений массы от угла наклона резервуара

Табл. 1.

Масса эталонная, т	Прототип	ИИС
20	19,56686	19,86
30	29,616	30,1305
45	44,425	44,8335
60	59,287	59,862
100	98,962	100,435

Среднее значение ошибки при угле наклона резервуара $\alpha = 5^\circ$ метода измерения массы, используемого в прототипе равно 1,39%, для разработанного метода – 0,51%.

Табл. 2.

Масса эталонная, т	Прототип	ИИС
20	18,91878	19,88
30	29,209	29,82
45	42,988	44,816
60	57,491	60,312
100	96,83408	100,49

Заключение

Разработанный метод измерения жидкого вещества с использованием ИИС позволяет измерять различные по химическому составу жидкие вещества под воздействием различных факторов. Использование предложенного метода и системы позволяет повысить точность измерения массы жидких веществ по сравнению с традиционными методами вне зависимости от углов наклона, размеров и форм резервуаров, а также от других внутренних и внешних факторов.

Список литературы

- [Войцицкая, 2017] Войцицкая А.С. Способ измерения массы жидких веществ на основе искусственных нейронных сетей // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности, 2017, Т. 2, № 1.
- [Дивин и др., 2012] Дивин А.Г., Пономарев С.В., Мозгова Г.В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012.
- [Зоря и др., 2004], Зоря Е.И., Зенин В.И. Ресурсосберегающий сервис нефтепродуктообеспечения. – М.: Нефть и газ, 2004.
- [Кремлевский, 2002] Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Книга 1. – СПб.: Политехника, 2002.
- [Мехеда, 2011] Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011.
- [Секацкий и др., 2007], Секацкий, В. С., Мерзликина Н.В. Методы и средства измерений и контроля: Учебное пособие. – Красноярск: ИПЦ СФУ, 2007.
- [Скворцов и др., 2013] Скворцов Б.В., Борминский С.А., Солнцева А.В., Блинов Д.И. Способ измерения с использованием калибровочной таблицы // Патент РФ № 2497085. Оpubл. 27.09.2013.

УДК 004.932.72'1

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТА ИНТЕРЕСА В ВИДЕОСИГНАЛЕ

Д.А. Гаврилов (*gavrilov.da@mipt.ru*)
Московский физико-технический институт, Москва

Представлен алгоритм обнаружения и сопровождения объектов на последовательности видеок кадров на основе полносверточных нейронных сетей. Проведен анализ существующих современных решений по созданию полносверточных нейронных сетей. На основе проведенного анализа выбрано собственное решение, предполагающее создание нейронной сети на основе архитектуры Resception. Представлено описание функции потерь, определена важность выбора наиболее подходящей функции потерь при обучении нейронной сети. Приведены результаты экспериментов для разработанного алгоритма.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, детектирование, локализация, слежение

Введение

Одним из современных методов решения задач обнаружения объектов на изображениях является использование искусственных нейронных сетей. К их преимуществам относится быстрота и высокая эффективность работы, а также возможность обучения на изображениях, размещенных в открытых архивах.

Обрабатываемые изображения, как правило, содержат различные шумовые помехи, а объекты интереса на последовательности изображений могут менять пространственное положение, угол поворота или масштаб видимости. Классические нейронные сети, например, многослойный персептрон, достаточно чувствительны к наличию искажений и шумовых помех. Для качественной обработки изображений необходимо увеличивать размер нейронной сети, количество слоев, нейронов, межнейронных связей, а это, в свою очередь, может приводить к усложнению структуры сети, увеличению времени ее работы, повышению ресурсоемкости и вычислительной сложности процесса обучения.

Сверточные нейронные сети (СНС) обладают достаточно высокой инвариантностью к изменениям масштаба, поворотам, смещениям объектов, а также другим искажениям исходных изображений, поэтому их применение предпочтительно для решения задач обработки изображений.

Целью работы является разработка алгоритмов обнаружения и сопоставления объектов на последовательности видеок кадров на основе СНС.

1. Сверточные и полносверточные нейронные сети

Простые СНС – это сети, содержащие несколько сверточных слоёв. Сверточные слои в таких нейронных сетях были разработаны в результате исследования зрительной коры головного мозга, которая отвечает за преобразование в полезную информацию визуальных образов, передаваемых в мозг посредством зрительного восприятия. Искусственно созданная нейронная сеть состоит из большого числа связанных между собой элементов обработки информации. Обучение нейронной сети строится на процессе запоминания каких-либо примеров или образцов. Особенностью СНС является наличие чередующихся слоев типа «свертка–субдискретизация», которые являются основными элементами обучения сети. Операция свертки подразумевает поэлементное умножение каждого фрагмента входного изображения на небольшую матрицу весов или ядро с последующим суммированием, Полученная сумма представляет собой карту признаков [Воробьев и др., 2017].

Полносвёрточные нейронные сети (ПСНС) – тип нейронных сетей, в результате работы которых появляется сегментированное изображение оригинала, на котором объекты интереса выделены определенным образом. В основе работы ПСНС лежит свёртка изображения. Ключевыми слоями здесь являются свёрточные слои, в которых указывается количество выходов со слоя, ядро свёртки, его шаг, размеры, отступ.

Применение ПСНС необходимо для решения задач, в которых требуется определить форму и местоположение объекта интереса или ряда таких объектов. Решение задач такого уровня проблематично при использовании простых СНС.

Для решения задачи детектирования, локализации и последующего слежения за объектами интереса наибольший интерес представляют нейронные сети SSD, FASTER R-CNN и YOLO. Рассмотрим их основные преимущества и недостатки.

Подход, называемый SSD (Single Shot MultiBox Detector), дискретизирует выходное пространство пороговых блоков в стандартный набор блоков, определяющих различные соотношения сторон для каждого положения карты. При прогнозировании сеть генерирует множество с целью гарантии наличия каждой категории объектов в каждом пороговом блоке и

проводит корректировки в блоке для лучшего соответствия форме объекта. Кроме того, сеть объединяет прогнозы из нескольких функциональных карт с различными разрешениями для естественного управления объектами разных размеров. В основе SSD лежит СНС с обратной связью, которая проводит накопление ограничительных блоков фиксированных размеров и баллов за присутствие требуемых классификационных объектов в этих блоках, сопровождаемая шагом не максимального подавления для получения окончательных обнаружений. Ранние сетевые уровни основаны на стандартной архитектуре, используемой для высококачественной классификации изображений. Затем добавляются вспомогательные сетевые структуры сети для дальнейшего детектирования [Liu et al., 2016].

Нейронная сеть Faster-R-CNN представляет собой оптимизированный алгоритм “Fast R-CNN”. Решение “Faster R-CNN”, как следует из названия, предназначено для ускорения выполнения модели и адаптации ее для решения современных задач по детектированию объектов [Ren et al., 2016]. Авторами “Faster R-CNN” разработан специальный дополнительный модуль региональных предложений (region proposal network, RPN), который предлагается помещать после последнего сверточного слоя. Вся система представляет собой единую унифицированную сеть для обнаружения объекта.

Данная сеть позволяет генерировать предлагаемые регионы на основе последней сверточной карты признаков. RPN-модуль сообщает модулю Fast R-CNN место поиска объекта интереса. RPN принимает изображение, размер которого может быть любым, в качестве входных данных и выводит набор прямоугольных объектных предложений, каждый из которых имеет оценку объективности. Этот процесс моделируется ПСНС. Оба модуля при этом имеют общий набор сверточных слоев. Затем действует стандартная схема (пулинг целевого региона (RoI pooling), полносвязные слои, а далее классификация и регрессия.

YOLO (You Only Look Once) – система обнаружения объектов в режиме реального времени. Данная нейронная сеть делит изображение на области. Обнаружение объектов происходит путем очерчивания областей рамками границ и «взвешивания» их на основании предсказанных вероятностей. На выходе алгоритма можно получить класс объекта и координаты ограничивающего его прямоугольника [Redmon, 2015].

При исследовании эффективности работы алгоритмов применительно к имеющейся базе изображений автомобильной техники было обнаружено, что сети на основе архитектур YOLO, SSD и Faster R-CNN не обеспечивают достаточной точности обнаружения и локализации в виду относительно малых размеров объектов распознавания. Характерный размер объекта распознавания составляет не более 30 пикселей. Для эффективного решения задачи обнаружения и локализации было решено использовать нейронную

сеть с архитектурой ResCeption [Mundhenk et al., 2016], в основе которой лежит блок из семи сверточных слоев (рис. 1).

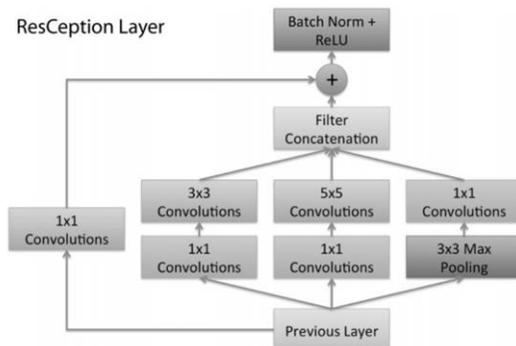


Рис. 1. Блок сверточных слоев ResCeption [Mundhenk et al., 2016]

Предлагаемая архитектура нейронной сети содержит девять блоков ResCeption. На выходе нейросеть выдает карту отклика половинного разрешения: при входном изображении размера 512×512 пикселей размер карты отклика составляет 256×256 пикселей.

2. Постановка задачи

Для успешного решения задачи обнаружения объектов необходимо располагать как можно более полной информацией о функциях яркости объектов и фона, а также знать параметры распределения шума.

Запишем формальную постановку задачи поиска объектов интереса.

Алгоритм поиска определяет центры предполагаемых объектов интереса и для каждого из них выдает показатель ранжирования s («уверенность» алгоритма в найденном объекте).

Для обучения использовалась база данных изображений автомобильной техники с характерным размером объекта интереса в 30 пикселей. Обучающая выборка состояла из изображений, суммарно содержащих 30000 объектов автомобильной техники. Для контроля использовалась валидационная выборка, содержащая 1000 объектов.

Описание метрики качества:

- площадь под графиком точность-полнота;
- c_1, \dots, c_N – центры объектов, получаемые из файла экспертной разметки. Центр c_i представляется триплетом (x_i, y_i, I) , где x_i, y_i – координаты центра (в пикселях);
- I – идентификатор соответствующего изображения;

- $(\hat{c}_j, s_j), \dots, (\hat{c}_M, s_M)$ – ответы алгоритма с показателями ранжирования, получаемые из файла разметки алгоритмом. Центр \hat{c}_j представляется триплетом (x_i, y_i, I) , оценка s_j является действительным числом. Ответы алгоритма предварительно сортируются по показателям ранжирования по убыванию: для индексов $i > j$ выполнено $s_i < s_j$;
- R_{thr} – радиус окрестности корректного определения объекта. Считается, что алгоритм корректно определил объект распознавания c_i , если для этого объекта существует ответ \hat{c}_j (на том же изображении), такой, что

$$\rho(c_i, \hat{c}_j) \leq R_{thr};$$

- $z = [z_1, \dots, z_M]$ – вектор true positives (tp): бинарный вектор, элемент z_j которого является индикатором того, что ответу алгоритма (\hat{c}_j, s_j) соответствует близкий объект c согласно критерию

$$\rho(c_i, \hat{c}_j) \leq R_{thr}.$$

В качестве базовых метрик рассматриваются функции точности (*precision*, p) и полноты (*recall*, r) для первых k объектов из ответов алгоритма

$$r(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k z_i, p(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k z_i, \\ r(0) = 0, p(0) = 0,$$

где $z = [z_1, \dots, z_M]$ – вектор true positives (tp).

Функционалом качества является площадь под кривой precision/recall:

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (p(k) + p(k-1))(r(k) + r(k-1)).$$

В качестве меры сходства использовалась мера Жаккара:

$$sim(i, j) = \frac{|Adj(i) \cap Adj(j)|}{|Adj(i) \cup Adj(j)|},$$

где $sim(i, j)$ – множество соседей узла i .

3. Настройка функции потерь

При обучении классификаторов одним из важных параметров является сбалансированность обучающей выборки. Преобладание какого-либо из классов приводит к увеличению числа ошибок при классификации объектов других классов.

При обучении нейросети, выходом которой является карта отклика высокого разрешения, проблема баланса выборки встает особенно остро: 1200 пикселей типового изображения, как правило, относятся к объекту интереса, 60000 пикселей при этом составляют объекты фона, такие как дома, дороги и т.д. Для выравнивания этого перекаса при обучении нейросетей, выдающих карты отклика, требуется специальная настройка функции потерь. В предлагаемом решении использовалась функция потерь на основе Hinge Loss:

$$L(y) = k_{\max} \cdot (0,1 - t \cdot y),$$

где y – результат нейросети, $t = \pm 1$ – метка класса («+1» – автомобильная техника, «-1» – фон), k – весовой коэффициент.

Весовой коэффициент выбирался в зависимости от типа объекта и положения элемента карты отклика относительно объектов изображения.

4. Алгоритм обнаружения и сопровождения объектов

На рис. 2 представлена схема работы алгоритма обнаружения и сопровождения объектов.

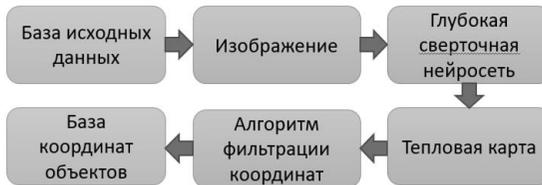


Рис. 2. Схема работы алгоритма обнаружения и локализации объектов

После выбора базы исходных данных с изображениями, на которых необходимо обнаружить объекты интереса, происходит запуск алгоритма. Каждое изображение из базы исходных данных обрабатывается независимо от всех остальных с помощью обученной глубокой сверточной нейросети. Результатом обработки является тепловая карта, которая поступает на вход алгоритма фильтрации координат. Полученные координаты объектов интереса добавляются в базу координат объектов, которая является конечным результатом работы алгоритма.

5. Результаты

Для оценки эффективности работы нейросетевых алгоритмов обнаружения и сопровождения были проведены контрольные эксперименты по обнаружению и сопровождению объектов автомобильной техники на видеопоследовательностях видимого и инфракрасного диапазонов, отснятых с помощью беспилотного летательного аппарата типа квадрокоптер.

На рис. 3 приведен результат работы алгоритма обнаружения автомобильной техники на кадре видеопоследовательности, отснятой с беспилотного летательного аппарата. Обнаруженные объекты отмечены крестиками, интенсивность крестика соответствует показателю ранжирования s для данного объекта. На валидационной выборке для алгоритма обнаружения были достигнуты следующие показатели качества: функционал качества: 0,922; средняя мера Жаккара: 0,865.



Рис. 3. Результат работы алгоритма обнаружения

На рис. 4 приведен кадр работы алгоритма сопровождения. Точка соответствует результату работы алгоритма, круг вокруг объекта – радиус срыва, число в левом верхнем углу показывает число срывов при сопровождении объекта. В данном случае срывы отсутствовали, число срывов «0». На валидационной выборке для алгоритма сопровождения были достигнуты следующие показатели качества: ошибка определения координат: 9,02%; частота срывов: 0,000617.



Рис. 4. Результат работы алгоритма сопровождения

Заключение

В ходе работы осуществлен анализ существующих современных решений по созданию ПСНС. На основе проведенного анализа выбрано решение предполагающее создание ПСНС на основе архитектуры ResCeption. Описаны функции потерь, определена важность выбора функции потерь при обучении ПСНС, приведено описание алгоритма обнаружения и сопровождения. Приведены результаты эксперимента для разработанного алгоритма.

Список литературы

- [Воробьев и др., 2017] Воробьев Н.В., Пучков Е.В. Классификация текстов с помощью сверточных нейронных сетей // Молодой исследователь Дона, 2017, Т. 9. № 6.
- [Liu et al.,2016] Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.-Y., Berg A.C. SSD: Single Shot MultiBox Detector // ECCV 2016. Springer, Cham. 2016.
- [Mundhenk et al., 2016] Mundhenk W.A., SaklaT.N., Boakye K.A. A large contextual dataset for classification, detection and counting of cars with deep learning // Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics). 2016. Vol. 9907.
- [Redmon, 2015] Redmon J. YOLO: Real-Time Object Detection. – <http://pjreddie.com/darknet/yolo>.
- [Ren et al., 2016] Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. – <https://arxiv.org/pdf/1506.01497v3.pdf>.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СОСТЯЗАТЕЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ¹

К.П. Коршунова (*ksenya-kor@mail.ru*)
Филиал Национального исследовательского
университета «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск

В данной работе предложена нейросетевая модель автоматического описания изображений на основе глубоких нейронных сетей и состязательного подхода к обучению. Приведена структура модели, описан алгоритм обучения, а также проведена оценка качества решения задачи генерирования текстовых описаний изображений с использованием предложенной модели.

Ключевые слова: автоматическое описание изображений, генерирование описаний изображений, глубокие нейронные сети, машинное обучение, состязательное обучение, генеративные состязательные сети

Введение

В последние годы возрастает интерес к комплексным задачам искусственного интеллекта, которые предполагают совместную обработку разнородной информации: графической (фото- и видеоизображения) и текстовой (текст на естественном языке). Решение подобных мультимодальных (англ. *multimodal*) задач требует комбинации подходов и принципов интеллектуального анализа информации разной природы, что обуславливает чрезвычайную сложность задач данного класса: в добавление к существующим проблемам анализа графических и текстовых данных возникают новые, связанные с комбинированием разнородной информации. К подобным задачам относится задача автоматического описания изображений [Борисов и др., 2017; Коршунова, 2018] (англ. *Image Captioning*), первые попытки решения которой предпринимались еще в 1990-х годах [Abella, 1995; Gerber, 1996].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00928).

1. Задача автоматического описания изображений

Система автоматического описания изображений получает на входе фото- или видеоизображение, анализирует его содержание и на выходе выдает текстовое описание данного изображения в виде одного или нескольких предложений на естественном языке (ЕЯ).

Задача автоматического описания изображений решается на стыке двух областей анализа данных: теории распознавания образов (*pattern recognition*) и обработки естественного языка (*natural language processing*), – так как предполагает не только распознавание графических образов (идентификацию объектов на изображении, определение их свойств, отношений между ними), но и последующее описание результатов распознавания на ЕЯ [Коршунова, 2018].

Задача генерирования описания изображения на ЕЯ представляет собой перевод из одного представления (пространства визуальных признаков) в другое (текстовое представление). В этом отношении она сходна с задачей машинного перевода: требуется перевести представление данных в одном языке (модальности) I в представление в другом языке (модальности) S , максимизируя функцию правдоподобия $p(S/I)$ [Vinyals, 2015]. Системы решения рассматриваемой задачи, как правило, включают в себя 2 подсистемы: кодер и декодер. Первая кодирует «сырые» пиксели входного изображения в вектор визуальных признаков, вторая декодирует данный вектор в текстовое представление (описание на ЕЯ).

Наиболее успешные методы решения задачи автоматического описания изображений основаны на глубоких нейронных сетях: сверточных нейронных сетях (СНС) для представления изображений (кодер) и рекуррентных нейронных сетях (РНС) для генерирования предложений на ЕЯ (декодер) [Vinyals, 2015; Karpathy, 2015; Chen, 2015a; Xu, 2016; Gu, 2018]. Общая схема решения представлена на рис. 1.

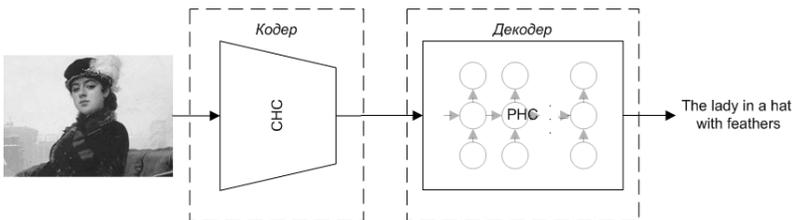


Рис. 1. Схема решения задачи автоматического описания изображений

Изображение кодируется с помощью СНС, затем вектор представления изображения (выходы предпоследнего слоя СНС) подается на вход РНС, которая осуществляет последовательное (слово за словом) генерирование

текстового описания. СНС и РНС могут обучаться как отдельно друг от друга, так и в едином цикле (*end-to-end*).

2. Нейросетевая модель решения задачи автоматического описания изображений на основе состязательного обучения

Генеративные состязательные сети (Generative Adversarial Nets, GANs [Goodfellow, 2014]), реализующие состязательный подход к обучению, обеспечивает хорошие результаты при решении отдельных задач генерирования фотореалистичных изображений, видеокладов, трехмерных моделей, а также генерирования последовательной информации: текста, музыки, речи [Wikipedia, 2018]. В данной же работе впервые предлагается решать комплексную задачу автоматического описания изображений с использованием предлагаемой нейросетевой модели, основанной на последовательных генеративных состязательных сетях – Sequence GANs [Lantao, 2017].

Генеративные состязательные сети представляют собой комбинацию двух нейронных сетей, одна из которых (сеть G) генерирует образцы (генеративная модель), а другая (сеть D) различает правильные («подлинные») образцы от неправильных, искусственно сгенерированных нейросетью (дискриминативная модель). Результаты работы дискриминативной сети D подаются на вход генеративной сети G так, чтобы она смогла подобрать лучший набор параметров и дискриминативная сеть уже не смогла бы отличить подлинные образцы от поддельных. Таким образом, реализуется состязательность процесса обучения общей модели решения генеративной задачи: сеть G стремится повысить долю ошибок сети D , а целью сети D является, наоборот, улучшение точности распознавания.

2.1. Структура модели

Обобщенная структура предлагаемой нейросетевой модели автоматического описания изображений на основе состязательного обучения представлена на рис. 2.

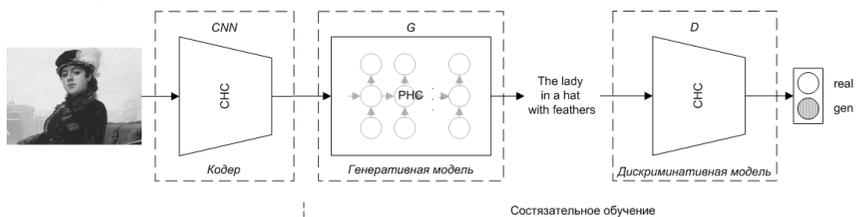


Рис. 2. Структура нейросетевой модели автоматического описания изображений на основе состязательного обучения

Для представления изображения используется СНС VGG16 [Simonyan, 2014] (кодер CNN), для генерирования текста (генеративная модель G) используется разновидность рекуррентных нейронных сетей LSTM (Long-Short Term Memory [Hochreiter, 1997]). В качестве дискриминативной модели D также используется разновидность СНС [Kim, 2014].

2.2. Обучение и функционирование модели

Процесс обучения предложенной модели состоит из следующих этапов.

1. Инициализация и предварительное обучение:
 - 1) предобучение моделей CNN и G ;
 - 2) генерирование отрицательных («поддельных») примеров с помощью CNN и G ;
 - 3) предобучение дискриминативной модели D .
2. Обучение (N эпох):
 - 1) обучение модели G (g эпох);
 - 2) генерирование отрицательных («поддельных») примеров с помощью CNN и G ;
 - 3) обучение модели D (d эпох).

Для обучения модели G применяется разновидность алгоритма обучения с подкреплением [Sutton, 2017], целью которого является максимизация ожидаемого долговременного выигрыша. В случае состязательного обучения выигрышем для модели G является ошибка модели D (считается, что модель D ошиблась, если она «поддельный», т.е. сгенерированный пример приняла за «подлинный»).

Дискриминативная модель D требуется только для обеспечения состязательности в процессе обучения. На этапе функционирования предложенной нейросетевой модели «работают» только кодер CNN и генератор G : входное изображение кодируется в некоторое промежуточное представление с помощью кодера, из которого затем генератором формируется текстовое описание.

2.3. Результаты работы модели

Для обучения и тестирования предложенной модели использовался публично доступный обширный набор данных Microsoft COCO Caption [Chen, 2015b], содержащий изображения из базы Microsoft Common Objects in COntext (COCO) [Lin, 2014b]. Весь набор данных разделен на обучающую и тестирующую выборки, первая содержит 32000 изображений и соответствующих текстовых описаний (по 5 на каждое изображение), вторая – 40000 пар «изображение–описание».

На рис. 3 приведены изображения из тестового набора данных и текстовые описания, составленные предложенной моделью после 75 эпох состязательного обучения.

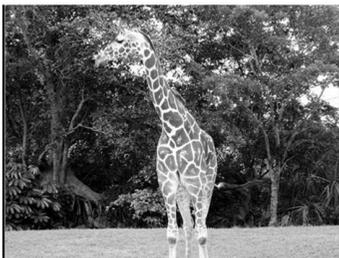
A cat standing on a big shelf behind a glass case
(Кот, стоящий на большом выступе за стеклянным футляром)



The bathroom with a set of sink and toilet
(Ванная комната с набором из раковины и туалета)



A giraffe walking in the grass near a
(Жираф, гуляющий в траве возле)



A view of the bus hanging on the road
(Изображение автобуса, висящего на дороге)



A skateboarder is doing a trick on a skateboard
(Скейтбордист, выполняющий трюк на скейтборде)



Two bears are standing on motorcycles and buildings
(Два медведя стоят на мотоциклах и зданиях)



Рис. 3. Примеры описания изображений

Из рис. 3 видно, что во многих случаях описания, составленные предлагаемой моделью, несмотря на грамматические и смысловые неточности,

способны передать содержание изображенных сцен, однако часто имеют место грубые ошибки.

2.4. Оценка качества автоматического описания изображений

Оценим качество решения задачи автоматического описания изображений предложенной моделью, используя количественные показатели, основанные на оценке сходства двух предложений на ЕЯ (сгенерированного и исходного описаний). К настоящему времени предложено несколько подобных показателей [Papineni, 2002; Lin, 2004a; Denkowski, 2014; Vedantam, 2015; Anderson, 2016]. Воспользуемся популярными показателями *BLEU-1*, *BLEU-2*, *BLEU-3*, *BLEU-4* [Papineni, 2002], *ROUGE-L* [Lin, 2004a], *CIDEr* [Vedantam, 2015].

Сравним качество автоматического описания изображений тестирующей выборки при решении рассматриваемой задачи с использованием двух моделей:

1) традиционной комбинации двух нейронных сетей: СНС (представление изображений) и РНС (генерирование описаний);

2) предложенной модели на основе состязательного обучения (GAN).

Результаты оценки качества решения задачи с помощью известной (СНС+РНС) и предложенной (GAN) моделей представлены в табл. 1 и на рис. 4–5.

Табл. 1.

Количество эпох обучения	Модель	Bleu-1	Bleu-2	Bleu-3	Bleu-4	ROUGE-L	CIDEr
10	СНС+РНС	0,290	0,128	0,054	0,025	0,239	0,041
	GAN	0,309	0,139	0,060	0,027	0,253	0,039
25	СНС+РНС	0,293	0,131	0,056	0,026	0,241	0,042
	GAN	0,318	0,145	0,062	0,027	0,258	0,044
50	СНС+РНС	0,297	0,133	0,058	0,027	0,244	0,045
	GAN	0,326	0,151	0,066	0,031	0,262	0,043
75	СНС+РНС	0,297	0,133	0,058	0,027	0,244	0,044
	GAN	0,314	0,148	0,067	0,031	0,251	0,054
100	СНС+РНС	0,296	0,132	0,057	0,026	0,244	0,044
	GAN	0,324	0,155	0,074	0,037	0,272	0,054

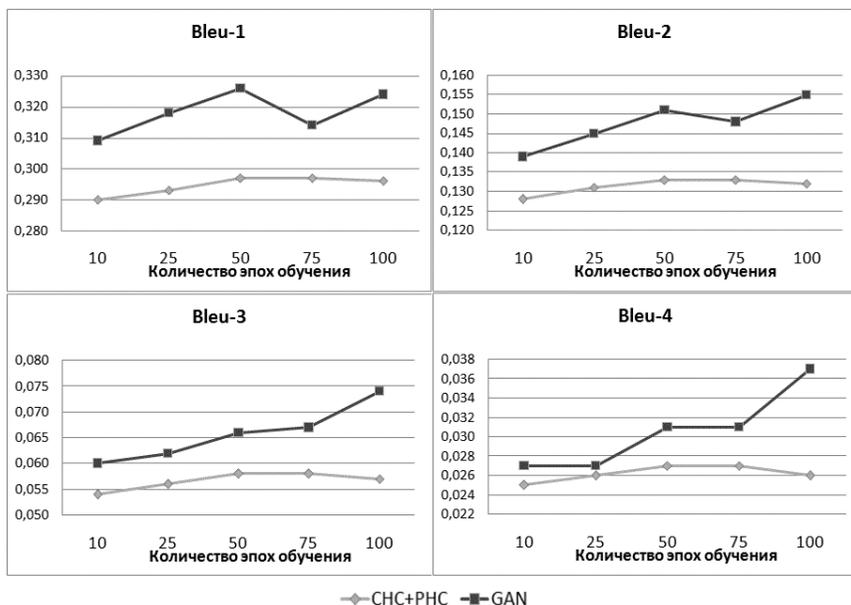


Рис. 4. Значения показателя BLEU для разного количества эпох обучения

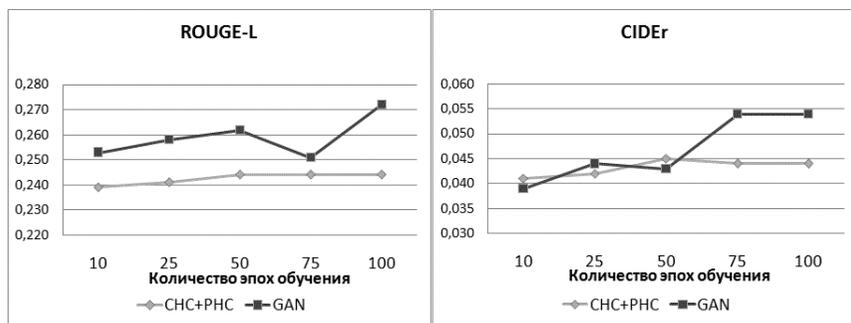


Рис. 5. Значения показателей ROUGE-L и CIDEr для разного количества эпох обучения

Применение предлагаемой нейросетевой модели на основе состязательного обучения для решения задачи автоматического описания изображений позволяет повысить качество решения данного класса задач по сравнению с традиционным способом на основе комбинации CHC и PHC относительно всех рассмотренных показателей качества. При этом наибольшие значения показателей, а также наибольшее улучшение качества решения задачи достигаются при 100 эпохах обучения.

Заклучение

Таким образом, в данной работе предложена нейросетевая модель автоматического описания изображений на основе состязательного обучения, включающая в себя сверточную нейронную сеть для обработки изображения и последовательную генеративную состязательную сеть для генерирования текстового описания. Моделирование работы предложенной нейросетевой структуры и результаты многочисленных экспериментов с публично доступным набором данных MS COCO Captions показали более высокое качество решения рассматриваемой задачи по сравнению с типовой комбинацией глубоких нейронных сетей: СНС и РНС.

Список литературы

- [Борисов и др., 2017] Борисов В. В., Коршунова К. П. Постановка прямой и обратной задачи поиска и генерирования текстовых описаний по изображениям // Энергетика, информатика, инновации - 2017 (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве). Сб. тр. VII Международной научно-технической конференции. Смоленск, 2017, Т 1.
- [Коршунова, 2018] Коршунова К. П. Задачи и методы автоматического описания изображений // Системы управления, связи и безопасности, 2018, №1. – <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/02-Korshunova.pdf>.
- [Abella, 1995] Abella A., Kender J. R., Starren J. Description Generation of Abnormal Densities found in Radiographs // Proc. Symp. Computer Applications in Medical Care, Journal of the American Medical Informatics Association. 1995.
- [Anderson, 2016] Anderson P., Fernando B., Johnson M., Gould S. SPICE: Semantic propositional image caption evaluation // Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), LNCS. 2016. Vol. 9909.
- [Chen, 2015a] Chen X., Zitnick C. L. Mind's eye: A recurrent visual representation for image caption generation // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015.
- [Chen, 2015b] Chen X., Fang H., Lin T. Y., Vedantam R., Gupta S., Dollár P., Zitnick C. L. Microsoft COCO Captions: Data Collection and Evaluation Server. arXiv.org, 2015. – <https://arxiv.org/abs/1504.00325>.
- [Denkowski, 2014] Denkowski M., Lavie A. Meteor Universal: Language Specific Translation Evaluation for Any Target Language // Proceedings of the Ninth Workshop on Statistical Machine Translation. 2014.
- [Gerber, 1996] Gerber R., Nagel N. H. Knowledge representation for the generation of quantified natural language descriptions of vehicle traffic in image sequences // Proceedings of the International Conference on Image Processing. 1996.
- [Goodfellow, 2014] Goodfellow I. J., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Bengio Y. Generative Adversarial Networks // Proc. of NIPS. 2014.

- [**Gu, 2018**] Gu J., Cai J., Wang G., Chen T. Stack-Captioning: Coarse-to-Fine Learning for Image Captioning // Association for the Advancement of Artificial Intelligence. 2018.
- [**Hochreiter, 1997**] Hochreiter S., Uergen Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9 (8).
- [**Karpathy, 2015**] Karpathy A., Fei-Fei L. Deep visual-semantic alignments for generating image descriptions // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015.
- [**Kim, 2014**] Kim, Y. Convolutional Neural Networks for Sentence Classification // EMNLP. 2014.
- [**Lantao, 2017**] Lantao Yu, Weinan Zhang, JunWang, Y. Y. SeqGAN: Sequence Generative Adversarial Nets with Policy Gradient // JAMA Internal Medicine. 2017. 177(3).
- [**Lin, 2004a**] Lin C. Y. Rouge: A package for automatic evaluation of summaries // Proceedings of the Workshop on Text Summarization Branches out (WAS 2004). 2004. Vol. 1.
- [**Lin, 2014b**] Lin T. Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollár P., Zitnick C. L. Microsoft COCO: Common objects in context. European conference on computer vision. 2014.
- [**Papineni, 2002**] Papineni K., Roukos S., Ward T., Zhu W. BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation. Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2002.
- [**Robertson, 2004**] Robertson S. Understanding inverse document frequency: on theoretical arguments for IDF // Journal of Documentation. 2004. No. 60 (5).
- [**Simonyan, 2014**] Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arXiv.org. 2014. – <https://arxiv.org/abs/1409.1556>.
- [**Sutton, 2017**] Sutton R. S., Barto G. Reinforcement learning: an introduction. University College London, Computer Science Department, Reinforcement Learning Lectures. 2017.
- [**Vedantam, 2015**] Vedantam R., Zitnick C. L., Parikh D. CIDEr: Consensus-based image description evaluation // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015.
- [**Vinyals, 2015**] Vinyals O., Toshev A., Bengio S., Erhan D. Show and Tell: A Neural Image Caption Generator // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015.
- [**Wikipedia, 2018**] Генеративно-сопязательная сеть // Wikipedia, the free encyclopedia. 2018. – [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Генеративно-сопязательная_сеть](https://ru.wikipedia.org/wiki/Генеративно-сопязательная_сеть).
- [**Xu, 2016**] Xu K., Ba J., Kiros R., Cho K., Courville A., Salakhutdinov R., Zemel R., Bengio Y. Show, Attend and Tell: Neural Image Caption Generation with Visual Attention // International Conference on Machine Learning. 2015.

УДК 004.8

ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ДЛЯ ПОИСКА АНСАМБЛЕЙ И РИТМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ¹

С.Г. Куливец (*skulivec@yandex.ru*)

Институт проблем управления РАН, Москва

В работе рассматривается программная среда, предназначенная для поиска ансамблей и ритмической активности в нейронных сетях. Графический интерфейс программной среды позволяет конструировать структуру нейронной сети, исследовать структуру обнаруженных ансамблей, анализировать влияние входов ансамбля на его состояние, осуществлять поиск периодических ритмов внутри сети.

Ключевые слова: среда моделирования, искусственная нейронная сеть, пороговый нейрон, ансамбль, конечный автомат

Введение

Для исследования и развития модели ансамблей в пороговых нейронных сетях [Кузнецов 2016, 2017] разработана программная среда с графическим интерфейсом. Модели ансамблей нейронов основаны на пороговой модели нейрона [McCulloch, Pitts, 1943] и сетей из таких нейронов [Kleene, 1956; Amari 1972]. В рамках разработанной программной среды могут быть решены задачи визуализации изменения состояния нейронной сети во времени, обнаружения возникающих ансамблей внутри сети, анализ влияния входных нейронов на ансамбли, обнаружение ритмической активности для подмножества нейронов.

1. Модель нейронной сети и ансамбля нейронов

Программная среда моделирования NeuronEnsemble опирается на математическую модель нейронных ансамблей, предложенную в работах [Кузнецов 2016, 2017]. Приведём основные определения из этих работ.

Формальный пороговый нейрон N_i – это элемент с несколькими входами x_1, \dots, x_{ki} и выходом y_i , работающий в дискретном времени. Входы x_1, \dots, x_{ki}

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 17-07-00541, 17-29-07029).

имеют различные (положительные и отрицательные) веса w_1, \dots, w_{ki} . Входы с положительными весами называются возбуждающими, а с отрицательными – тормозящими. Входы N_i могут принимать одно из двух значений – 0 или 1. Выход N_i в любой момент $t + 1$ принимают значение $y_i(t+1)$ (0 или 1) в зависимости от значений входов в момент t по пороговой формуле:

$$y_i(t + 1) = 1, \text{ если и только если } \sum_{j=1}^{ki} w_j \cdot x_j(t) \geq T_i, \quad (1.1)$$

где T_i – порог элемента N_i . Если $y_i(t + 1) = 1$, то элемент N_i активен в момент $t+1$. В противном случае N_i пассивен.

Сеть из формальных пороговых нейронов. Нейроны соединяются в *пороговую сеть* так, что из выхода элемента может выходить любое число связей, а ко входу нейрона может быть присоединена только одна связь. Между любыми элементами N_i, N_j существует не более одной внутренней связи. Связи (N_i, N_j) приписывается вес w_{ij} , равный весу входа x_{ji} элемента E_j , к которому она присоединена. Внутренние связи пороговой сети задаются матрицей весов $W = \||w_{ij}\|$ размера $n \times n$, где n – общее число элементов; $w_{ij} = 0$, если связи (E_i, E_j) нет. *Графом $G(S)$ сети S* называется граф, матрица смежности C_S которого получается из матрицы весов W_S сети S заменой всех ненулевых элементов на единицы.

Сеть и ее граф могут иметь разные свойства; поэтому одни и те же объекты мы будем называть по-разному в зависимости от контекста: объекты, которые в графе называются вершинами и ребрами, в сети будем называть, соответственно, элементами и связями.

Сеть P называется подсетью сети S , если $G(P)$ – подграф $G(S)$.

Состоянием $Y_P(t)$ подсети P с l элементами в момент t называется распределение активностей ее элементов в момент t , т.е. вектор двоичных значений выходов ее элементов: $Y_P(t) = \{y_1(t), \dots, y_l(t)\}$. Состояние $(1, 1, \dots, 1) = \mathbf{1}$ назовем единичным, а состояние $(0, 0, \dots, 0) = \mathbf{0}$ – нулевым.

Состояние подсети P называется *устойчивым*, если при отсутствии внешних воздействий в моменты $t, t+1, t+2, \dots$ она сохраняет это состояние в последующие моменты времени: $Y_P(t) = Y_P(t+1) = Y_P(t+2) = \dots$. Очевидно, что нулевое состояние устойчиво для любой подсети.

Ансамбли. *Ансамблем* называется подсеть сети S , в которой а) ее граф слабо связан, б) ее единичное состояние устойчиво. *Простым ансамблем* называется ансамбль, в котором ее граф бисвязен.

2. Программная реализация среды моделирования

Программная среда [NeuronEnsemble, 2018] разработана с помощью Microsoft Visual Studio .NET 2013, на языке программирования C#, для построения примеров сети формальных нейронов, расчёта их поведения, обнаружения ансамблей и просмотра графа состояний каждого из ансамблей,

представленного как граф состояний автомата. Все данные модели необходимые для расчётов и визуализации в программе объединяются в контейнер данных под названием «проект» и могут быть сохранены в отдельном файле, для повторного использования или редактирования в дальнейшем.

2.1. UML диаграмма ключевых классов системы

Базовые классы программной системы отображены на рис. 1.

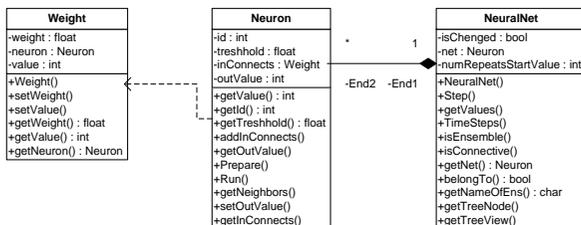


Рис. 1. Диаграмма классов системы

Внутри программной системы есть три ключевых класса: **Weight**, **Neuron**, **NeuralNet**. Центральный класс **Neuron** отвечает за хранение информации о каждом нейроне отдельно, а также реализации набора действий с нейроном и его поведения. Класс **Weight** отвечает за хранение информации о связях между нейронами в сети и обработку данной информации. Класс **NeuralNet** отвечает за хранение информации о нейронах, включённых в сеть, и предоставляет весь необходимый набор методов для обработки сети, расчёте её поведения и обнаружения ансамблей.

3. Инструменты исследования модели, реализованные в программе

В программе реализованы следующие функции:

- просмотр графа сети формальных нейронов;
- расчёт последовательности состояний сети для заданного начального состояния;
- поиск ансамблей в сети;
- анализ влияния входов ансамбля на состояние ансамбля;
- поиск ритмической активности в нейронной сети.

На основе матрицы смежности для графа сети формальных нейронов можно построить и просмотреть граф нейронной сети (пример на рис. 2).

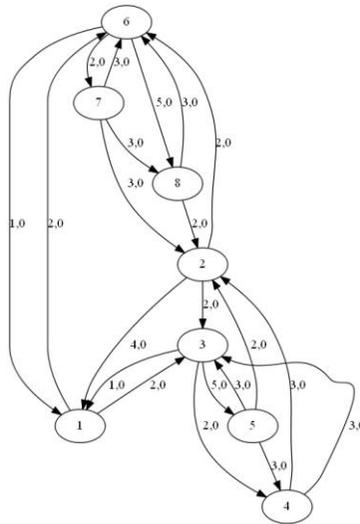


Рис. 2. Граф нейронной сети: вершины графа – нейроны; дуги – синаптические связи между нейронами; веса рёбер – веса входов соответствующих нейронов

Для расчёта последовательности состояний нейронной сети необходимо установить значения для порогов каждого нейрона, активность каждого нейрона в начальный момент времени, задать количество тактов, на которое будет рассчитана активность каждого из нейронов сети.

	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8
Нейрон 1									
Нейрон 2									
Нейрон 3									
Нейрон 4									
Нейрон 5									
Нейрон 6									
Нейрон 7									
Нейрон 8									

Рис. 3. Пример визуализации изменения состояний сети во времени. Каждой строке соответствует нейрон, каждому столбцу – момент времени. Ячейка на пересечении строки i и столбца j окрашена цветом, если нейрон i активен в момент j , иначе ячейка белого цвета

Для фиксированной нейронной сети с заданными параметрами в среде моделирования можно найти все ансамбли [Кузнецов 2016, 2017] в данной сети. Ансамблем может оказаться как вся сеть целиком, так и её подсети. Ансамбли могут оказываться вложенными друг в друга. Например, для сети на рис. 2 система обнаруживает три ансамбля: 1–2–3–4–5, 1–2–6–7–8 и 1–2–3–4–5–6–7–8 (вся сеть). У ансамбля есть множество входов: множество

вершин сети, не принадлежащих ансамблю, исходящие дуги которых являются входящими для нейронов ансамбля. Например, для ансамбля 1–2–3–4–5 такими входами являются вершины 6, 7 и 8 (рис. 4).

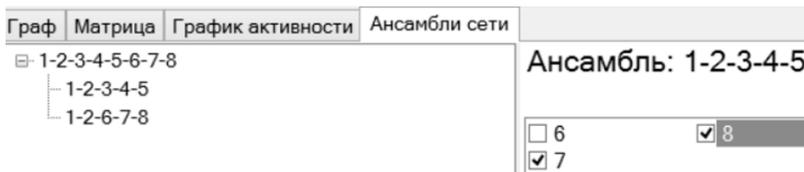


Рис. 4. Фрагмент интерфейса для установки исследуемых входов ансамбля

Далее мы рассмотрим возможности программной среды для задачи анализа влияния входов на состояние ансамбля. Для этого мы будем выбирать подмножество входов из имеющихся. Например, на рис. 4 выбрали входы 7 и 8. Это значит, что мы считаем вход 6 неизменным и равным 0.

4. Анализ влияния входов ансамбля на состояние ансамбля. Поиск ритмической активности в нейронной сети

Ансамбль можно рассматривать как *автомат* со входом, состоянием и выходом. Для такого ансамбля можно построить *таблицу автомата*, по строкам которой будут разные входы ансамбля, по столбцам – состояния, а в ячейках – выход ансамбля при текущем входе в заданном состоянии. Множество входов автомата задаётся множеством всех возможных значений активности для подмножества *входящих нейронов* для нейронов ансамбля. Остальные входящие нейроны, кроме заданных, всегда будут неактивными, и не рассматриваются как входы автомата. Результат расчётов визуализируются в виде графа автомата (рис. 5).

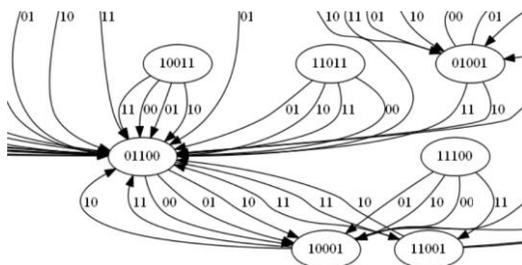


Рис. 5. Фрагмент графа автомата: вершины – состояния автомата (т.е. активность нейронов автомата в порядке нейронов 1–2–3–4–5), дуги – значения входов автомата (в порядке нейронов 7–8)

Визуализация автомата в виде графа помогает понимать влияние входящих нейронов для ансамбля на его состояние. Поясним на примере. Рассмотрим ансамбль 1–2–3–4–5 и входящие нейроны для него 6, 7 и 8 (см. рис. 2). Построим граф автомата для ансамбля 1–2–3–4–5 только с одним входом 6 (рис. 6).

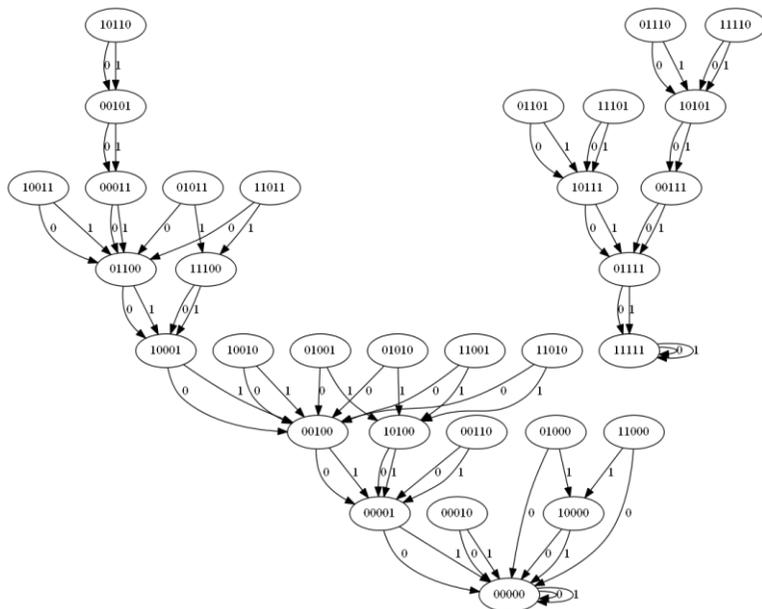


Рис. 6. Граф автомата 1–2–3–4–5 с исследуемым входом 6

Граф состоит из двух компонент. То есть в зависимости от начального состояния последующие состояния ансамбля будут либо в левой, либо в правой компонентах. Обе компоненты вырождены: в графах нет петель и циклов. Следовательно, влияние нейрона 6 в отдельности на ансамбль невелико и приведет в терминальное состояние за не более чем 7 тактов в одном случае (левая компонента) и за не более чем 4 шага в другом случае (правая компонента). В первом случае все нейроны ансамбля будут неактивны, а во втором случае – наоборот, все будут активны. Результат не зависит от нейрона 6, а определяется начальным состоянием.

Построим граф автомата для ансамбля 1–2–3–4–5 с двумя входами – нейронами 7 и 8.

Полученный граф состояний автомата имеет циклы, например, между состояниями 01100 и 10001 (рис. 5). Таким образом, можно сделать вывод,

что посредством воздействия через нейроны 7 и 8 можно генерировать периодический ритм для ансамбля 1–2–3–4–5.

Путём построения графа автомата, выбрав всю нейронную сеть в качестве ансамбля, (рис. 2) мы получим граф автомата всей сети (представлен частично, рис. 7).

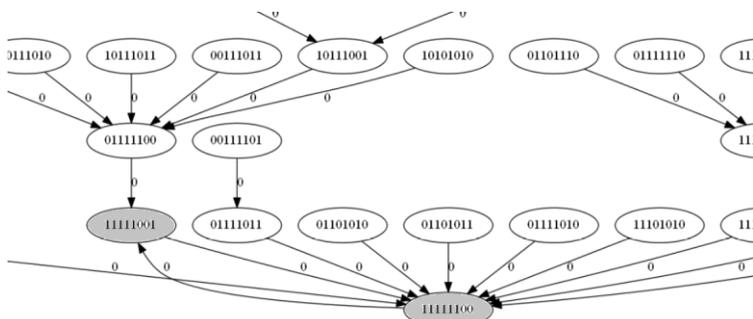


Рис. 7. Фрагмент графового представления автомата всей сети, без входов

Наличие в графе автомата всей сети циклов помогает обнаружить самоподдерживающуюся ритмическую активность в исходной нейронной сети, возникающую в определённых начальных состояниях. Например, на рис. 7 видно, что сеть колеблется между двумя состояниями: 11111001 и 11111100 безо всяких внешних воздействий. Такие колебания формируют внутренний устойчивый ритм.

Заключение

В работе рассматривается программная среда, реализованная для моделирования взаимодействия в искусственных нейронных сетях с пороговыми элементами в соответствии с работами [Кузнецов 2016, 2017]. Графический интерфейс программной среды позволяет конструировать структуру нейронной сети, задавать и изменять её параметры, просматривать изменение состояний нейронной сети в дискретные такты времени, исследовать структуру обнаруженных ансамблей в нейронной сети в виде графа состояний ансамбля и переходов между ними. Программная среда позволяет анализировать влияние входов ансамбля на его состояние, осуществлять поиск периодических ритмов внутри сети. Исходный код выложен в открытый доступ на <https://github.com>, см. [NeuronEnsemble, 2018].

Благодарности. Благодарю коллег О. Кузнецова, Л. Жилиякову, Н. Базенкова, Б. Болдышева из лаб. 11 ИПУ РАН за конструктивное обсуждение данной работы.

Список литературы

- [Кузнецов 2016] Кузнецов О.П. Пороговая модель нейронного ансамбля // Доклады Академии наук, 2016, Т. 467, № 6.
- [Кузнецов 2017] Кузнецов О.П. Стационарные ансамбли в пороговых сетях // Автоматика и телемеханика, 2017, № 3.
- [Amari 1972] Amari S.I. Learning Patterns and Pattern Sequences by Self-Organizing Nets of Threshold Elements // IEEE Trans. Computers. 1972. Vol.100 (21). No.11.
- [Kleene, 1956] Kleene S.C., Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata, Automata Studies, Eds. C.E. Shannon, J. McCarthy, Princeton Univ. Press, Princeton, 1956.
- [McCulloch, Pitts, 1943] McCulloch W.S., Pitts W. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity // Bull. Math. Biophys. 1943. Vol. 5.
- [NeuronEnsemble, 2018] Открытый код системы. – <https://github.com/SergeiKa83/NeuronEnsemble>.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ВЫБОРА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННОГО РЯДА В ГИБРИДНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

Д.В. Яшин (*dv.yashin@yandex.ru*)

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск

В работе рассмотрен основанный на методах машинного обучения способ выбора индивидуальных методов в комбинированной модели прогнозирования. Предложена нейронная сеть, на вход которой подается вектор легко вычисляемых метрик, соответствующих значимым для решения задачи прогнозирования характеристикам временного ряда. Нейронная сеть вычисляет предполагаемое значение ошибки каждым методом в составе базового набора комбинированной модели.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронная сеть, прогнозирование временного ряда, комбинированная модель прогнозирования.

Введение

Постоянная необходимость в повышении точности прогнозирования временных рядов приводит к росту числа публикаций по данной теме и появлению новых методов прогнозирования, с ростом числа которых все более актуальной становится проблема выбора наиболее подходящего метода.

Одним из возможных решений данной проблемы является использование комбинированных моделей прогнозирования, позволяющих получать агрегированный прогноз на основе результатов нескольких методов. Однако выбор методов также является требующей решения проблемой, так как отдельные индивидуальные неточные прогнозы могут существенно повлиять на качество итогового прогноза.

В данной работе предложен способ выбора индивидуальных методов прогнозирования из базового набора комбинированной модели, основанный на методах машинного обучения.

1. Гибридные системы в искусственном интеллекте. Комбинированная модель прогнозирования временного ряда: выбор методов из базового набора

Понятие гибридации возникает как следствие развития принципов системного подхода к исследованию сложных искусственных объектов в информатике [Тарасов, 2002]. Н.Г. Ярушкина отмечает развитие гибридных интегрированных и синергетических систем как одну из ведущих тенденций в современной информатике, определяя гибридизацию как интеграцию методов и технологий на глубинном уровне, когда система включает взаимодействующие модули, реализующие различные методы решения интеллектуальных задач [Ярушкина, 2007]. А.В. Гаврилов, отмечая процесс гибридации как основную тенденцию развития искусственного интеллекта, рассматривает гибридизацию как вариант комбинирования методов представления и обработки знаний в гибридных интеллектуальных системах [Гаврилов, 2001].

Гибридные интеллектуальные информационные системы являются междисциплинарным научным направлением, в рамках которого исследуется применимость нескольких методов из различных классов (аналитических, статистических, логико-лингвистических, нечетких и др.) к решению задач принятия решений, в то время как ни один из вышеперечисленных классов невозможно считать универсальным [Колесников и др., 2011]. Взаимодействие нескольких методов позволяет компенсировать их недостатки за счет появления интегративного свойства.

Существует множество методов прогнозирования временных рядов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Для использования преимуществ нескольких методов применяются комбинированные модели, состоящие из нескольких моделей, включенных в так называемый базовый набор [Лукашин, 2003].

В [Васильев, 2014] выделен ряд факторов, подчеркивающих эффективность применения комбинированной модели, среди которых: невозможность выбора единственной модели по экспериментальным данным; наличие в каждой «отвергнутой» модели важной для моделирования информации; необходимости выбора лучшей из группы моделей, имеющих схожие статистические характеристики.

Принято различать селективные и гибридные комбинированные модели прогнозирования. В селективной модели текущее прогнозное значение вычисляется по выбранной согласно селективному критерию модели из базового набора. В гибридной модели прогнозное значение получается путем

агрегации результатов прогнозирования по нескольким моделям из базового набора, как правило, итоговый прогноз является взвешенной комбинацией индивидуальных прогнозов [Лукашин, 2003].

В данном исследовании рассматривается способ выбора методов из базового набора для комбинированной гибридной модели прогнозирования, однако, предлагаемый подход может быть использован и для комбинированной селективной модели.

Согласно [Горелик и др., 1983], основной проблемой построения гибридных моделей прогнозирования является определение оптимальных весов индивидуальных прогнозов моделей из базового набора, обеспечивающих минимальное значение ошибки прогноза комбинированной модели.

Одним из возможных способов решения задачи отбора является разделение временного ряда на обучающую и контрольную части с последующим прогнозированием по обучающей части контрольных значений каждым методом из базового набора, после чего становится возможным выбор модели на основании полученных значений ошибки прогнозирования. Данный способ выбора моделей неэффективен для комбинированных моделей с большим количеством методов в базовом наборе, а также при прогнозировании коротких временных рядов. Еще один способ решения задачи выбора моделей из базового набора – экспертная оценка на основе анализа характеристик и графика временного ряда человеком-экспертом. Также применяется комбинация двух описанных выше способов, когда прогнозирование по обучающей части временного ряда его контрольных значений применяется только для выбранных экспертом из базового набора моделей.

Предлагаемый в данной работе способ наиболее приближен к экспертному подходу и предполагает выбор моделей из базового набора нейронной сетью, использующей набор легко вычисляемых метрик временного ряда.

2. Значимые для решения задачи прогнозирования метрики временного ряда

Выделяют множество характеристик временного ряда, такие как наличие тренда и сезонной составляющей, стационарность, длина, аномальность уровней, дисперсия, среднее значение. Для решения задачи прогнозирования временного ряда наибольшее значение имеют показатели его динамики. Согласно [Кобзарь, 2006], основными статистическими характеристиками динамики являются тенденция и колеблемость.

Используемые в рамках данного исследования метрики основаны на критериях выявления или оценки степени выраженности характеристик временного ряда. Метрики разделены на группы, исходя из соответствия характеристикам временного ряда:

- 1) метрики тренда, основанные на критериях Валлиса–Мура, Фостера–Стюарта, Кокс–Стюарта, кумулятивном Т-критерии, методе сравнения средних [Кобзарь, 2006], [Садовникова и др., 2001];
- 2) метрики сезонности, основанные на вычислении индексов сезонности, отражающих долю сезонной колеблемости исследуемого явления относительно среднего значения временного ряда;
- 3) метрики дисперсии и тренда дисперсии, в число которых входит как сама величина дисперсии нормированного временного ряда, так и метрики, основанные на критериях выявления тренда дисперсии – критерий Фостера–Стюарта и метод сравнения дисперсий двух совокупностей [Кобзарь, 2006];
- 4) метрики аномальности, основанные на критериях выявления аномальных значений временного ряда – критерий Ирвина и критерий Шовене [Кобзарь, 2006].

Для построения и обучения нейронной сети выбора методов прогнозирования было решено установить требование принадлежности значения каждой метрики к отрезку от 0 до 1. Перед вычислением значений метрик временные ряды нормируются.

Для вычисления итоговых значений метрик, основанных на критериях, предполагающих вычисление расчетного значения и его сравнения с критическим, используется формула (2.1):

$$m = \begin{cases} 1 - \frac{t_{\text{крит}}}{t_{\text{факт}}}, & t_{\text{факт}} \geq t_{\text{крит}}, \\ 0,01, & t_{\text{факт}} < t_{\text{крит}}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где $t_{\text{факт}}$ – фактическое значение критерия, $t_{\text{крит}}$ – критическое значение критерия.

Для вычисления метрики степени выраженности сезонности на основании индексов сезонности применяется формула (2.2):

$$m_{\text{ses}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{\tau} \left(\frac{I_t}{\bar{y}} - 1\right)^2}{\tau}}, \quad (2.2)$$

где T – период сезонности временного ряда, \bar{y} – средний уровень временного ряда, I_t – значение среднего индекса сезонности для периода t .

Для вычислений значений метрик, соответствующих степени аномальности временного ряда, используется отношение количества аномальных (согласно критерию) вершин к длине временного ряда.

3. Нейронная сеть выбора методов прогнозирования из базового набора

Для выбора методов прогнозирования из базового набора гибридной комбинированной модели используется специально разработанная нейронная сеть, для создания которой использован язык R со встроенным пакетом “neuralnet”. На вход нейронной сети подается вектор метрик прогнозируемого временного ряда. Каждому методу из базового набора соответствует один из нейронов выходного слоя. Структура нейронной сети представлена на рис. 1, где m_1, \dots, m_k – нейроны, соответствующие метрикам временного ряда, M_1, \dots, M_t – нейроны, соответствующие моделям прогнозирования.

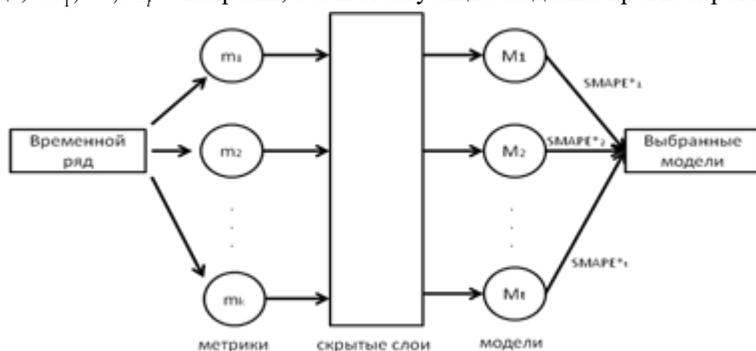


Рис. 1. Структура нейронной сети

Обучающая выборка состоит из набора временных рядов, представленных в виде совокупности метрик, и соответствующих значений ошибки прогнозирования (SMAPE) для каждой модели прогнозирования. В обучающей выборке использованы временные ряды из “Computational Intelligence in Forecasting” (CIF) [CIF, 2016] за 2015–2016 годы. Значения SMAPE для обучающей выборки получены в результате прогнозирования конкурсных временных рядов методами из комбинированной гибридной системы прогнозирования “Combination of fuzzy and exponential models” (CFEM), разработанной на кафедре ИС УлГТУ [Afanasiyeva, 2016]. Данная система оказалась лучшей на соревновании CIF в 2015 году.

Метрики и способы их вычисления для входного слоя нейронной сети описаны выше. Модели прогнозирования (соответствующие выходному слою нейронной сети) взяты из комбинированной модели CFEM. Нейронная сеть обучается на основании значений метрик вычислять предполагаемые значения ошибки для каждой модели из базового набора, что позволяет определять: какие модели из базового набора эффективнее применить для

прогнозирования значений текущего временного ряда. Если агрегирующий метод предполагает настройку весов моделей из базового набора, веса могут быть установлены обратно пропорционально полученным предполагаемым значениям ошибки каждой модели.

4. Получение оптимального набора метрик. Результаты экспериментов

Изначально в разработанной нейронной сети выбора методов прогнозирования было использовано 11 метрик: 5 метрик для тренда среднего, 2 для тренда дисперсии, 1 для величины дисперсии, 1 для степени выраженности сезонных колебаний и 2 для степени аномальности временного ряда.

Результаты оценок для одной характеристики по различным критериям отличаются в силу различия закономерностей, лежащих в основе методов оценки. Например, фазочастотный критерий Валлиса–Мура для выявления тенденции среднего значения основан на сравнении соседних уровней временного ряда, критерий Фостера–Стюарта – на сравнении текущего уровня со всеми предыдущими, критерий Кокс–Стюарта – на разбиении временного ряда на три части с последующим сравнением уровней между третьей и первой группой, а кумулятивный Т-критерий – на вычислении накопленного итога отклонений эмпирических значений от среднего уровня временного ряда [Кобзарь, 2006], [Садовникова и др., 2001]. Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что метрики, соответствующие одной и той же характеристике временного ряда, но вычисленные по различным критериям, могут не обладать высокой степенью корреляции.

При определении оптимального набора метрик временного ряда, являющихся вектором входных значений нейронной сети, наибольшую сложность составляет соблюдение баланса между полнотой охвата закономерностей временного ряда и низкой степенью корреляции между признаками. Было решено провести серию экспериментов, сводящихся к последовательному исключению из общего набора по 1 метрике и проверки влияния этого исключения на точность результатов нейронной сети.

Результаты эксперимента представлены в табл. 1. Столбцы таблицы соответствуют наборам метрик и отображают последовательность исключения метрик из общего набора, позволившей повысить точность сети. Каждый столбец разделен на два подстолбца, содержащих информацию о конфигурации нейронной сети и полученном значении ошибки сети. Строки таблицы соответствуют лучшим 7 конфигурациям для каждого набора метрик, а также средней ошибке для всех конфигураций.

В ходе экспериментов было установлено, что логистическая функция активации для рассматриваемой нейронной сети позволяет получать значительно более точные результаты, чем гиперболический тангенс.

Вычислительные эксперименты проведены для различных (по количеству нейронов в скрытых слоях) конфигураций нейронной сети, для некоторых из которых алгоритм обучения нейронной сети (основанный на алгоритме обратного распространения ошибки) не сходился – такие конфигурации не учитывались при итоговом подсчете. Эксперименты проведены для нейронных сетей с одним скрытым слоем с числом нейронов в нем от 1 до 11 и для сетей с двумя скрытыми слоями и числом нейронов в каждом их них от 1 до 8.

Табл. 1.

Все метрики		Все, кроме тренда дисперсии по критерию Фостера–Стюарта		Все, кроме тренда дисперсии по критерию Фостера–Стюарта и кумулятивного Т-критерия		Все, кроме кумулятивного Т-критерия и обеих метрик тренда дисперсии	
нейроны в скрытых слоях	SMAPE	нейроны в скрытых слоях	SMAPE	нейроны в скрытых слоях	SMAPE	нейроны в скрытых слоях	SMAPE
2	9,764	7	8,994	7	9,476	10	9,016
8-1	9,794	4-5	9,314	1-3	9,667	8	9,103
9	9,870	2-6	9,314	10	9,720	7	9,392
4-1	9,968	6-2	9,788	3-4	9,777	1	9,553
2-1	10,075	7-3	9,869	2	9,782	2	9,592
3-3	10,099	1-6	9,924	1-4	9,795	6-3	9,777
8-2	10,194	4	10,050	6	9,957	4-3	9,788
...
средняя ошибка	10,967	средняя ошибка	10,851	средняя ошибка	10,656	средняя ошибка	10,769

Обучающая выборка нейронной сети делилась 5 раз на обучающую и контрольную части, после чего для каждой конфигурации (набора метрик и числа нейронов в скрытых слоях) выполнялось обучение нейронной сети и вычисление отклонения выходных значений сети от тестовых.

Согласно табл. 1, наибольшая точность, в среднем для всех конфигураций, была достигнута для набора, содержащего все метрики, кроме метрики тренда дисперсии по критерию Фостера–Стюарта и метрики на основе кумулятивного Т-критерия. Однако исключение еще одной метрики оценки тренда дисперсии позволило получить самые точные результаты для отдельных конфигураций.

Отдельная серия экспериментов была проведена с целью оценки эффективности применения разработанной нейронной сети для повышения точ-

ности итогового прогноза. Из базового набора для получения агрегированного прогноза брались только методы с низкой (согласно результатам нейронной сети) ошибкой прогнозирования. Было установлено, что предварительный отбор методов нейронной сетью, содержащей все 11 метрик, позволил уменьшить ошибку итогового прогноза с 13,131% до 9,601%. Применение же лучшей конфигурации нейронной сети из предыдущего эксперимента (без кумулятивного Т-критерия и обеих метрик тренда дисперсии, с 10 нейронами в скрытом слое) – уменьшить до 9,234%.

Заключение

Рассмотрен подход к выбору индивидуальных методов прогнозирования из базового набора комбинированной модели, основанный на применении методов машинного обучения, а именно специально разработанной нейронной сети, выбирающей методы на основании значимых, с точки зрения предметной области, характеристик временного ряда.

Предложены алгоритмы вычисления значений метрик на основании характеристик временного ряда и структура нейронной сети выбора методов. Согласно полученным экспериментальным данным определен оптимальный набор метрик и оценена эффективность применения нейронной сети: средняя ошибка прогнозирования уменьшилась с 13,131% до 9,234%.

Нейронная сеть выбора методов прогнозирования наиболее эффективна для коротких временных рядов и при большом числе методов прогнозирования (так как использует легко вычисляемые метрики) – там, где подход, предполагающих разбиение временного ряда на обучающую и контрольную части с последующим вычислением каждым методом контрольных значений, неэффективен.

Благодарности. Выражаю благодарность своему научному руководителю Н.Г. Ярушкиной за ценные советы при планировании исследования.

Список литературы

- [Афанасьев и др., 2001] Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование. – М.: Финансы и статистика, 2001.
- [Васильев, 2014] Васильев А.А. Генезис гибридных моделей прогнозирования на основе объединения прогнозов // Вестник ТвГУ. Серия «Экономика и управление», 2014, № 23.
- [Гаврилов, 2001] Гаврилов А.В. Гибридные интеллектуальные системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
- [Горелик и др., 1983] Горелик Н.А., Френкель А.А. Статистические проблемы экономического прогнозирования // Статистические методы анализа экономической динамики: уч. зап. по статистике, т. 46. – М.: Наука, 1983.
- [Кобзарь, 2006] Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006.

- [**Колесников и др., 2011**] Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В., Румовская С.Б., Доманицкий А.А. Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. – М.: ИПИ РАН, 2011.
- [**Лукашин, 2003**] Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Финансы и статистика, 2003.
- [**Рыбина, 2001**] Рыбина Г.В. Современные экспертные системы: тенденции к интеграции и гибридизации // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика, 2001, № 8.
- [**Садовникова и др., 2001**] Садовникова Н.А., Шмойлова Р.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. – М.: МГУЭСИ, 2001.
- [**Тарасов, 2002**] Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002.
- [**Ярушкина, 2007**] Ярушкина Н.Г. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика. – М: Физматлит, 2007.
- [**Ярушкина и др., 2010**] Ярушкина Н.Г., Афанасьева Т.В., Перфильева И.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов: учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2010.
- [**Afanasieva, 2016**] Afanasieva T., Yarushkina N., Zavarzin D., Guskov G., Romanov A. Time series forecasting using combination of exponential models and fuzzy techniques // Advances in intelligent systems and computing. 2016. vol. 450.
- [**CIF, 2016**] Computational Intelligence in Forecasting. – <http://irafim.osu.cz/cif/main.php>.

СЕКЦИЯ 11 | ПРИКЛАДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 004.89

**РАЗРАБОТКА ПРЕЦЕДЕНТНОГО МОДУЛЯ
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ ПРИ
АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ¹**

П.Р. Варшавский (*varp@appmat.ru*),

Р.В. Алехин (*r.alekhin@gmail.com*),

А.В. Кожевников (*antoko@yandex.ru*)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва

Работа посвящена вопросам разработки прецедентного модуля, способного выполнять идентификацию сигналов, получаемых во время акустико-эмиссионного контроля сложных технических объектов.

Ключевые слова: прецедентный подход, мониторинг, анализ данных, акустическая эмиссия

¹ Работа поддержана грантами РФФИ (проекты №№ 18-51-00007, 18-01-00459), грантом Президента РФ МК-2897.2017.9.

Введение

В настоящее время для оценки состояния сложных промышленных объектов все чаще используют мониторинг – постоянное наблюдение за техническим состоянием конструкции или агрегата. Развитие и распространение систем мониторинга, связано со старением оборудования и необходимостью продления его срока эксплуатации, а их успешное функционирование обеспечивается высоким техническим уровнем средств неразрушающего контроля, усложнением их алгоритмического и программного обеспечения [Барат и др., 2008].

Наиболее эффективным для мониторинга особо опасных объектов является метод акустической эмиссии (АЭ). АЭ – явление возникновения и распространения упругих колебаний (акустических волн) в различных процессах, например, при деформации напряжённого материала, истечении газов, жидкостей, горения, взрыве. Количественно АЭ оценивается критерием целостности материала, который определяется звуковым излучением материала при его контрольной нагрузке. Эффект АЭ может использоваться для определения образования дефектов на начальной стадии разрушения конструкции и слежения за характером образования и развития дефектов в материале всего объекта в целом.

Основой АЭ контроля является обнаружение и превращение упругих волн в электрический сигнал. Анализ этих сигналов дает ценную информацию о наличии и происхождении дефектов в материале [Терентьев, 2013]. Одной из проблем, возникающих при проведении АЭ мониторинга, является большой объем разнородной диагностической информации – сигналы АЭ, их параметры, показания датчиков температуры, давления, влажности и др. [Kwon et al., 1990]. Как известно, при проведении мониторинга контролируемый объект работает в штатном режиме, но вибрация оборудования, течение продукта создают акустические помехи, затрудняющие проведение мониторинга. Для исключения сигналов-помех необходимо решать проблемы идентификации сигналов и фильтрации данных.

1. Электронная фильтрация данных при АЭ контроле

Чувствительность систем АЭ часто ограничивается количеством фоновых шумов поблизости. Шум в АЭ контроле относится к любым нежелательным сигналам, обнаруженным датчиками. Примерами таких сигналов являются источники трения (например, ослабленные болты или незакрепленные разъемы, которые перемещаются при воздействии ветра) и механические источники (например, дождь, летящие объекты или пыль).

Источники шума могут также присутствовать в местах проведения испытаний, при которых возможны механические вибрации (например, присутствие работающих насосов). Для компенсации влияния фоновой помехи применяются различные процедуры. Некоторые реальные подходы включают в себя изготовление специальных датчиков с электронными фильтрами для блокирования шумов, принимая во внимание расстановку датчиков так далеко, как только возможно от источника шума, и электронная фильтрация (либо с помощью учёта времени появления сигнала или различия в спектральном составе истинных сигналов АЭ и фоновых шумов) [Kwon et al., 1990].

Для классификации сигналов и помех часто применяют алгоритм медианной фильтрации: используется величина, определяющая отношение энергии сигнала до $s(t)$ и после $s'(t)$ медианной фильтрации его спектра $F(\Omega)$:

$$l = \frac{\sum_{n=0}^N s'(\Delta t \cdot n)}{\sum_{n=0}^N s(\Delta t \cdot n)^2},$$

где $s'(\Delta t \cdot n) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=0}^N \text{median}(F(\Omega)) e^{-in \frac{2\pi i}{N}}$, N – размер буфера, Δt – временной шаг.

Если при выборе параметров медианного фильтра задать ширину частотного окна сопоставимым с шириной спектра помехи, соотношение l для помех и для сигналов будет отличаться примерно в 20 раз (рис. 1). Такой способ фильтрации можно применять для исключения любых узкополосных помех как высокочастотных, так и низкочастотных [Барат и др., 2008].

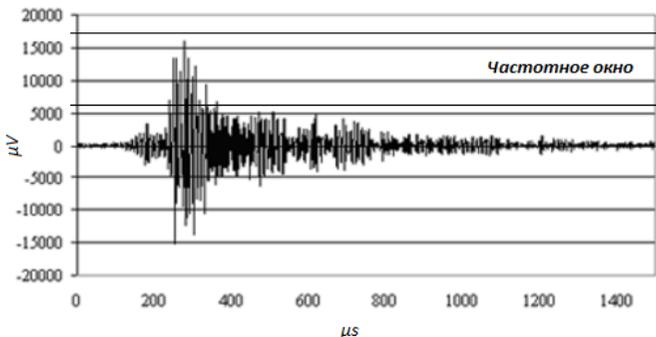


Рис. 1. Частотное окно и реально возможный порог сигнала

Алгоритм медианной фильтрации обладает явно выраженной избирательностью и наиболее эффективно исключает сигналы, попадающие за края частотного окна. Но, к сожалению, присутствует вероятность идентификации шумов как актуальных сигналов.

Для фильтрации этих шумов могут применяться методы искусственного интеллекта и, в частности, можно использовать прецедентный подход [Еремеев и др., 2012]. Каждый сигнал можно рассматривать как отдельный прецедент, тогда, имея информацию о ранее выявленных шумах, можно без активного привлечения эксперта идентифицировать шумы для последующего их устранения.

2. Представление информации о сигналах АЭ в виде прецедентов

Как правило, прецедент включает описание ситуации, решение для данной ситуации, и может присутствовать информация о результате применения решения [Еремеев и др., 2012]:

$$CASE = (Situation, Solution, Result),$$

где *Situation* – ситуация, описывающая данный прецедент, а *Solution* – решение (например, диагноз и рекомендации пользователю), *Result* – результат применения решения, который может включать список выполненных действий, дополнительные комментарии и ссылки на другие прецеденты, а также в некоторых случаях может приводиться обоснование выбора данного решения и возможные альтернативы.

Полученный сигнал содержит достаточно много промежуточных данных, которые не несут в себе важной информации. Поэтому отображение сигнала можно упростить до ломаной из экстремумов осциллограммы. Экстремумом будет считаться точка с максимальной/минимальной амплитудой в ε -окрестности, которая определяется длиной сигнала.

По упрощенной версии сигнала строится последовательность возрастных и спадов сигнала с фиксированием значений относительной амплитуды

$\delta A_i = \frac{A_i}{A_{MAX}}$ и диапазона времени. Другими словами, образуется последова-

тельность s_1, s_2, \dots, s_k , у которой каждый член s_i представлен четверкой $\{T, \delta A, t_n, t_k\}$, где T – тип (рост или спад), $\delta A \in [-1, 1]$ – относительная амплитуда на этом участке, $t_n, t_k \in [0, 1]$ – относительные временные границы диапазона времени.

Далее полученная последовательность проходит процедуру группировки по следующим правилам.

- Пара возрастания и спада сигнала, действующая в пределах $\leq \varepsilon$, считается пиком.
- Пара возрастания и спада сигнала, действующая в пределах $> \varepsilon$, считается колебанием.
- Идущие подряд $N > 1$ колебаний с близкими значениями относительной амплитуды группируются (объединяются в одно с суммарным диапазоном времени).

После группировки образуется аналогичная последовательность S_1, S_2, \dots, S_L , где S_i представлен такой же четверкой $\{T, \delta A, t_n, t_k\}$, но теперь $T \in \{\text{пик; колебания}\}$.

Формирование данной последовательности позволяет значительно сократить информацию о сигнале (что актуально для снижения временных затрат на поиск похожих сигналов в базе знаний), например, для сигнала (рис. 2а) длиной в 2000 точек, была получена следующая последовательность из 30 четверок (рис. 2б):

- [колебания; 0,001; 0,000; 0,059]
- [колебания; 0,115; 0,059; 0,065]
- [колебания; 0,428; 0,065; 0,073]
- [пик; 1; 0,073; 0,079]
- [колебания; 0,456; 0,079; 0,088]
- [колебания; 0,648; 0,088; 0,096]
- [пик; 0,814; 0,096; 0,1035]
- [колебания; 0,245; 0,104; 0,110]

...
30. [колебания; 0,103; 0,593; 1,000]

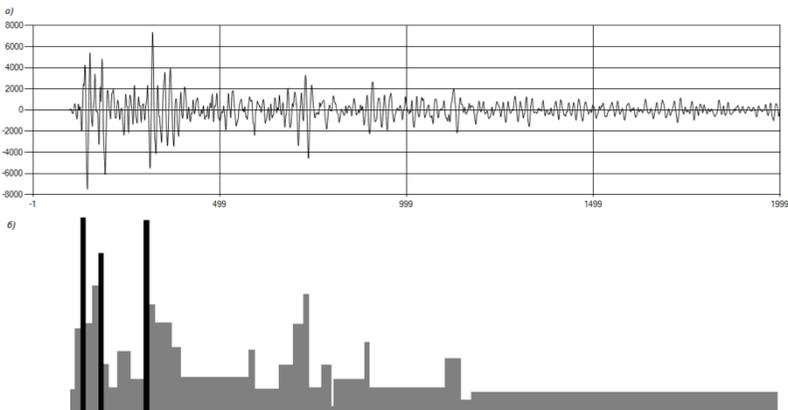


Рис. 2. Исходный сигнал (а) и графическое отображение соответствующей последовательности (б)

Полученную последовательность можно сохранить как прецедент для дальнейшего сравнения с имеющимися прецедентами в базе знаний. В базе знаний могут храниться как прецеденты с сигналами-помехами, так и с актуальными сигналами.

Заметим, что прецедент не содержит полной информации о сигнале (например, могут отсутствовать конкретные данные осциллограммы сигнала), но в то же время, прецедент хранит в себе информацию, необходимую для экспертной оценки актуальности сигнала.

3. Прецедентный подход для идентификации сигналов АЭ

Прецедентный подход базируется на анализе накопленного опыта и последующей адаптации решения известной задачи к решению новой. Прецедент можно определить как случай, имевший место ранее и служащий примером или оправданием для последующих случаев подобного рода. Методы поиска решения на основе прецедентов (Case-Based Reasoning, CBR) включают в себя четыре основных этапа, образующие так называемый CBR-цикл: извлечение, повторное использование, адаптация, сохранение [Aamodt et al., 1994].

Существует целый ряд методов извлечения прецедентов, например, метод ближайшего соседа, извлечение на основе деревьев решений, извлечение с учетом применимости прецедента [Еремеев и др., 2012].

Для определения сходства текущего сигнала с прецедентами из базы прецедентов (БП) предлагается использовать метод ближайшего соседа. Метод ближайшего соседа (NN – Nearest Neighbor) – наиболее используемый метод сравнения и извлечения прецедентов. Он позволяет довольно легко вычислить степень сходства текущей проблемной ситуации и прецедентов из БП. Для определения степени сходства на множестве параметров, используемых для описания прецедентов и текущей ситуации, вводится некоторая метрика. Далее в соответствии с выбранной метрикой определяется расстояние от целевой точки, соответствующей текущей проблемной ситуации, до точек, представляющих прецеденты из БП, и выбирается ближайшая точка к целевой [Еремеев и др., 2012].

Эффективность метода ближайшего соседа во многом зависит от выбора метрики (меры сходства). Для сравнения последовательностей колебаний выбрана метрика редукционного расстояния.

Расстояние Левенштейна для последовательностей s_1 и s_2 (длиной M и N соответственно) определяется следующим образом:

$$d(s_1, s_2) = D(M, N),$$

$$D(i, j) = \begin{cases} 0, & i = 0, j = 0, \\ i, & j = 0, i > 0, \\ j, & i = 0, j > 0, \\ \min \left(\begin{array}{l} D(i, j-1) + 1, \\ D(i-1, j) + 1, \\ D(i-1, j-1) + m(s_1[i], s_2[j]) \end{array} \right), & j > 0, i > 0, \end{cases}$$

где s_1, s_2 – входные последовательности, а $m(a, b) = 0$, если $a = b$, в противном случае $m(a, b) = 1$.

Между новым прецедентом (T) и сохраненными в базе (C) в выбранной метрике определяются расстояния d_{CT} . Для определения значения степени сходства $Sim(C, T)$ необходимо найти максимальное расстояние d_{MAX} в выбранной метрике, используя границы диапазонов соответствующих параметров.

Оценка по методу ближайшего соседа:

$$Sim(C, T) = 1 - \frac{d_{CT}}{d_{MAX}},$$

где d_{CT} – расстояние между текущим сигналом и прецедентом из БП, d_{MAX} – максимальное расстояние в выбранной метрике.

4. Реализация прецедентного модуля для идентификации сигналов АЭ

Предложенный прецедентный подход для идентификации сигналов АЭ и алгоритм извлечения прецедентов (определения сходства) реализован в программном модуле (рис. 3) для системы анализа файлов, содержащих данные АЭ контроля, на языке C# (.NET 4.5) в среде Microsoft Visual Studio 2012 под ОС Windows 7.

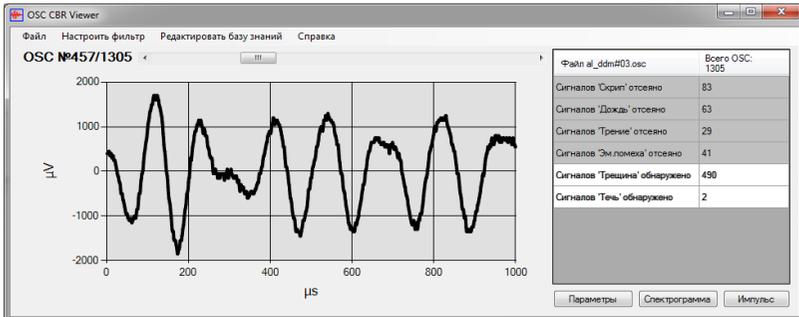


Рис. 3. Реализованный программный модуль

Работа модуля была проверена экспертами на тестовых данных, полученных при АЭ контроле металлических конструкций (более 20 файлов измерений), что подтвердило целесообразность применения предложенных решений.

Заключение

В работе исследована возможность применения методов поиска решения на основе прецедентов для идентификации сигналов АЭ контроля сложных технических объектов. Для извлечения прецедентов из базы прецедентов предложено использовать метод ближайшего соседа и расстояние Левенштейна в качестве меры сходства. Разработан метод представления сигналов АЭ контроля как прецедента. На основе предложенного подхода реализован прецедентный модуль для идентификации сигналов АЭ контроля. Работа реализованного модуля была проверена на тестовых данных, полученных при АЭ контроле металлических конструкций (более 20 файлов измерений).

Список литературы

- [**Барат и др., 2008**] Барат В.А., Алякритский А.Л. Метод статистической обработки данных акустико-эмиссионного мониторинга на примере реактора гидроочистки Мозырского НП // В мире НК, 2008, № 4.
- [**Еремеев и др., 2012**] Еремеев А.П., Варшавский П.Р., Куриленко И.Е. Моделирование временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов // International Journal “Information technologies and knowledge”. 2012. Vol. 6, No. 3.
- [**Терентьев, 2013**] Терентьев Д.А. Идентификация сигналов акустической эмиссии при помощи частотно-временного анализа // В мире НК, 2013, № 2.
- [**Aamodt et al., 1994**] Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches // Artificial Intelligence Communications. IOS Press. 1994. Vol. 7. No. 1.
- [**Kwon et al., 1990**] Kwon O.-Y., Ono K. Acoustic Emission Characterization of the Deformation and Fracture of an SiC-Reinforced Aluminum Matrix Composite // Journal of Acoustic Emission. 1990. Vol. 9.

УДК 519.688

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСТАДИЙНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ¹

А.Н. Ветров (*vetrov_48@mail.ru*)

И.И. Емельянова (*emelyanova-123@yandex.ru*)

А.А. Мальков (*kja227@list.ru*)

Б.В. Палюх (*pboris@istu.tver.ru*)

Тверской государственный технический университет,
Тверь

В работе рассмотрен подход к построению экспертной системы (ЭС) для поддержки принятия решений при эволюционном управлении многостадийными технологическими процессами в условиях неопределенности. Предложена методика и принципы разработки ЭС с использованием методов теории свидетельств. Приведено описание ЭС, реализованной в среде CLIPS и интерфейса с ядром CLIPS, запускающего машину вывода.

Ключевые слова: теория свидетельств, экспертная система, управление технологическим процессом

Введение

Многие современные непрерывные многостадийные технологические процессы являются потенциально-опасными, потому что отказ оборудования приводит к тяжелым последствиям. При управлении подобными технологическими процессами оперативно должны решаться две взаимосвязанные задачи: диагностика аварийных отказов и выявление стадий технологического процесса с неэффективно работающим в кризисных ситуациях оборудованием. Вторая задача решается в рамках системы эволюционного управления многостадийным технологическим процессом [Paliukh et al., 2017]. Решения о неэффективно работающей стадии технологического процесса определяется на основании диагностических переменных, которые

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-07-01339).

либо измеряются непосредственно, либо рассчитываются на основе результатов математического моделирования. Выход значений диагностических переменных за границы, определяемые технологическим регламентом, является признаком неэффективно работающей стадии технологического процесса в кризисной ситуации. Контроль состояния технологического процесса возлагается на оператора-технолога, который должен на основании текущих значений диагностических переменных распознать опасную ситуацию и принять решение об ее устранении. В большинстве случаев эта задача решается успешно. Однако в силу неопределенности данных о технологическом процессе могут возникать нештатные ситуации, в которых оператор не может правильно определить причину, вызывающую отклонения диагностических переменных и принимает неверные управляющие решения. Наиболее яркий пример – авария на Саяно-Шушенской ГЭС. Неопределенность подобных нештатных ситуаций не носит статистический характер. При создании экспертных систем (ЭС) для поддержки принятия решений, связанных с подобными ситуациями, в последнее время используют методы, основанные на логике немонотонных рассуждений [Дюбуа и др., 1990; Люгер, 2003]. Мы рассматриваем подход к оценке и анализу неопределенности и неточности в рамках теории возможностей при создании ЭС для решения задач управления многостадийными технологическими процессами.

1. Учет неопределенности на основе структур доверия Демпстера-Шефера

Рассматривается иерархическая (двухуровневая) процедура диагностики неисправностей и поиска неэффективно работающей стадии технологического процесса [Paliukh et al., 2017; Perov et al., 1993]. На первом уровне происходит сужение пространства поиска до отдельных стадий производства (цепей технологического процесса), а затем на втором уровне решается задача локализации неисправности до элемента технологического оборудования в конкретной цепи технологического процесса. Обозначим: $X = \{x_i\}$ – множество диагностических переменных, а $C = \{c_j\}$ – множество технологических цепей. Как уже отмечалось, признаком возможности наличия неэффективно работающего оборудования является выход значения диагностической переменной за допустимые технологические границы. Этот факт будем обозначать как нарушение по диагностической переменной (НДП). Обозначим $P = \{p_i\}$ – множество логических переменных. Появлению НДП по i -й переменной соответствует значение логической переменной $p_i = 1$, отсутствию НДП соответствует $p_i = 0$. Каждое НДП свидетельствует о неисправности в одной или нескольких технологических це-

пях. С учетом принятых обозначений исходные данные для поиска неисправности технологического оборудования можно представить диагностической матрицей вида:

$$\begin{array}{cccccc}
 & c_1 & c_2 & \dots & c_r & \\
 x_1 & \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1r} & \\
 x_2 & \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2r} & , \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\
 x_n & \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{nr} &
 \end{array}$$

где μ_{ij} определяет степень влияния i -й переменной на работоспособность j -й цепи, определяемую экспертным путем. Каждое значение логической переменной $p_i = 1$ индуцирует экспертно-определенное множество технологических цепей C_i :

$$C_i = \{(c_j, \mu_i(c_j) \neq 0)\}, c_j \in C, C_i \subset C, C_i \neq \emptyset.$$

Здесь c_j – цепи, неисправности в которых могли бы вызвать нарушение ограничений по i -й диагностической переменной; $\mu_i(c_j)$ – степень принадлежности элемента c_j множеству C_i (соответствует приведенной к диапазону $[0, 1]$ степени уверенности эксперта в наличии источника НДП по j -й переменной в цепи c_j). Задача распознавания на первом этапе заключается в определении соответствия между значениями диагностических переменных и неисправной или неэффективно работающей стадией технологического процесса (технологической цепи).

Использование теории Демпстера–Шефера (DST) позволяет закрепить общую меру вероятности за подмножествами множества неисправных технологических цепей [Shafer et al., 1985; Yager et al., 1994]. Это необходимо по следующим причинам. Во-первых, из-за неоднозначности решения задачи экспертной классификации, когда эксперт не может определить степень характерности данного НДП для одной, отдельно взятой цепи. Во-вторых, в случае неточности результатов определения самого факта НДП. В-третьих, при назначении общего уровня доверия для всех диагностических процедур.

Основным понятием DST [Yager et al., 2008] является фрейм различения, определяемый как полное множество взаимоисключающих событий. Роль фрейма различения в нашем случае выполняет множество $C = \{c_j\}$. Пустое множества \emptyset отождествляется с невозможным событием. Обозначим через A некоторое подмножество множества C , включая пустое множество \emptyset и само множество C . Множество всех подмножеств определим как $\{A \mid A \subseteq C\}$. Каждому множеству A можно поставить в соответствие действительное число $m(A)$ называемое базовой вероятностью. В DST рассматриваются не все подмножества фрейма различения [Dempster, 2001], а

только те, которые имеют не нулевые базовые вероятности – так называемые фокальные элементы функции доверия Bel . Таким образом, любое множество C_i индуцируемое логической переменной $p_i = 1$, является фокальным элементом. Любое подмножество A_i множества C_i является фокальным элементом если оно имеет ненулевую базовую вероятность. Для множества A_i функция доверия $Bel(A_i)$ вычисляется как сумма всех базовых вероятностей элементов, образующих множество A_i :

$$Bel(A_i) = \sum_{B \subseteq A_i} m(A_j).$$

Как правило, при возникновении потенциально-опасной ситуации фиксируется некоторое множество НДП $P^* = \{p_i / p_i = 1\}$. В этом случае факты регистрации различных НДП рассматриваются как независимые свидетельства о неполадках в технологическом процессе. Для объединения различных свидетельств [Murphy, 2000; Lefevre et al., 2002] необходимо вычислить ортогональные суммы базовых вероятностей, определенных для каждого из свидетельств. Для этого используется правило Демпстера [Sentz, 2002], в соответствии с которым ортогональные суммы определяются следующим выражением:

$$m_1 \oplus m_2(A) = \frac{1}{1 - m(\emptyset)} * \sum_{Y \cap Z = A} m_1(Y) * m_2(Z),$$

где Y и Z два фокальных элемента, распределенные на фрейме доверия, порожденные различными свидетельствами. Мера вероятности, приходящаяся на пустое множество:

$$m(\emptyset) = \sum_{Y \cap Z = \emptyset} m_1(Y) * m_2(Z).$$

Правило Демпстера ассоциативно и коммутативно, что позволяет объединять аналогичным образом и большее число свидетельств.

На основе новых базисных вероятностей вычисляются функции доверия и правдоподобия для всех рассматриваемых гипотез, что позволяет использовать всю доступную информацию в процессе поиска неисправных или не эффективно работающих технологических цепей и сузить количество подозреваемых объектов, отсеив часть из них и перераспределить оценки возможного наличия неисправности для отдельной технологической цепи или множества цепей.

2. Учет неопределенности в экспертной системе с продукционными правилами

Для реализации изложенной выше методики учета неопределенности на основе структур доверия Демпстера–Шефера разработан программный продукт, представляющий собой комплекс прикладного программного

обеспечения, разработанного и функционирующего в среде CLIPS [CLIPS, 2018] с использованием внешних прикладных программ. CLIPS является многоплатформенной, с открытым исходным кодом и открытой документацией, свободно распространяемой средой реализации ЭС, написанной на встроенном объектно-ориентированном языке COOL.

Разработанная ЭС позволяет эксперту-технологу принимать решение об исправлении неполадок оборудования, используемого в многостадийных технологических процессах производстве. Для получения решения в такого рода системах, эксперт, при получении соответствующей информации с технологической линии, или в терминах ЭС – фактов, использует ее при работе с ЭС. Факты – это основная форма представления информации в CLIPS. Зачастую используются неупорядоченные факты, которые дают возможность абстрагироваться от их структуры. Такие факты описываются на COOL при помощи конструкции *defemplate*.

Экспертная система диагностического типа основана на использовании набора продукционных правил и работает по принципу «вопрос–ответ». Продукционные правила позволяют эксперту «хранить» собственный опыт в базе знаний ЭС. Разработчик ЭС должен составить набор правил, совместное использование которых позволяет разрешить, возникшую на производстве ситуацию. В CLIPS правила записываются при помощи конструкции *defrule*.

Набор правил зависит от выполнения условий, которые, в свою очередь, активируются фактами. Для успешной работы ЭС необходимо наличие фактов и продукционных правил. Важной особенностью CLIPS является наличие в ней машины логического вывода, которая и определяет, какие правила должны быть выполнены при наличии имеющихся фактов, и, таким образом, ЭС, написанная на CLIPS, позволяет в указанном режиме работы получить некоторое решение. Кроме прочего, CLIPS поддерживает процедурный механизм, или использование функций, которые задаются при помощи конструкции *deffunction*.

Основным недостатком среды CLIPS является отсутствие привычного по работе в ОС Windows графического интерфейса, поскольку в API CLIPS используются C++ функции, позволяющие работать только в текстовом режиме (консольный ввод-вывод). Однако открытый исходный код функций API CLIPS, написанных на C++ [Джаратано et al., 2007], позволяют разработчикам успешно интегрировать ядро CLIPS в собственное приложение. Возможна интеграция CLIPS в приложение, написанное на C# в среде Visual Studio. Для этого может быть использована библиотека CLIPSNet для интеграции CLIPS в .NET приложения [CLIPS, 2018]. Таким образом, задача интеграции сводится к организации интерфейса между Windows-приложением и ядром CLIPS.

Опытный образец ЭС был построен как приложение Windows Forms в среде Visual Studio 2015. Для организации интерфейса между экспертом и ядром CLIPS «со стороны» Windows Forms использовались стандартные компоненты .NET Framework 4.5.2: (*TableLayoutPanel*, *FlowLayoutPanel*, *Button*, *Label*), а «со стороны» CLIPS – встроенные API функции (*public bool LoadFromResource(string A_0, string A_1); public void Reset(); public long Run()*).

На языке COOL была написана ЭС диагностического типа для обнаружения неисправности на одном из участков технологической линии в химическом производстве. Особенность ЭС заключается в дополнении ее особым функционалом, позволяющим влиять на динамическое изменение интерфейса приложения, который программно настраивается во время работы приложения. Это касается как вариантов ответов пользователя (эксперта-технолога), так и предлагаемых ему вопросов, необходимых для уточнения того или иного факта. Для запуска ЭС и определения неполадок в указанной технологической цепи производства используется окно интерфейса приложения.

При нажатии на кнопку «Запуск» ЭС начинает диалог с экспертом-технологом, который, выбирая один из вариантов ответа (да/нет), пополняет рабочую область ЭС новыми фактами и, следовательно, тем самым активирует соответствующие производственные правила. Приложение так организует интерфейс с ядром CLIPS, запуская при этом машину вывода на имеющемся наборе фактов и производственных правил.

В результате такого диалога ЭС формирует экспертное заключение относительно причины нарушения работоспособности, которое предлагается оператору-технологу для анализа. В случае необходимости работа ЭС может быть продолжена.

Для проверки эффективности системы было проведено ее испытание на примере анализа дефектов центробежного нагнетателя. Было показано, что использование традиционных методов учета неопределенности при принятии решений приводит к неустойчивости диагноза при малых отклонениях от ограничений и наличии шумов в измерительных цепях. На рис. 1 отображена работа диагностической системы, использующей булевскую методику при 10% пороге доверия и зашумленности данных не более чем на 5%. На 100-м шаге в систему был введен дефект в виде 70% уверенности в неисправности датчика давления. Из рис. 1 видно, что при нормальной работе системы шум в измерениях вызывает нестабильность диагноза, а после введения нарушения правильный диагноз появляется спорадически.

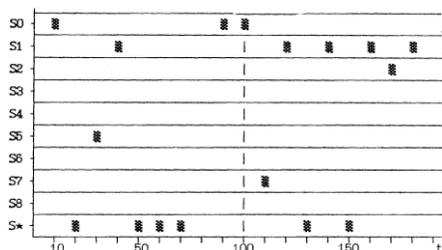


Рис. 1. Результат моделирования диагностических процедур с использованием булевого подхода

На рис. 2 показан график работы ЭС, опирающейся на предложенную выше методику при тех же исходных данных.

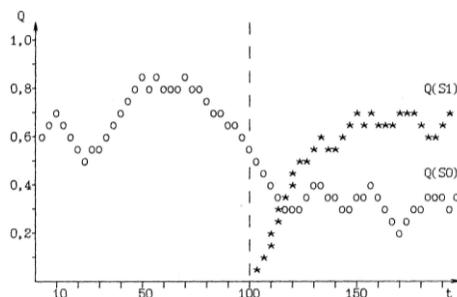


Рис. 2. Результаты моделирования диагностических процедур на основе теории свидетельств

Из графика видно, как изменяется оценка правдоподобия диагностических гипотез Q до и после введения нарушения, обеспечивая стабильный правильный диагноз. Оценки правдоподобия альтернативных гипотез не показаны, так как их значения ниже уровня шума.

Заключение

Предложенная методика учета неопределенности и принципы построения ЭС для поддержки принятия решений при эволюционном управлении многостадийными технологическими процессами позволяют:

- обеспечить последовательный анализ состояния работоспособности технологического комплекса с локализацией источника неполадок до уровня первичной неисправности;
- использовать в своей структуре интервальные диагностические модели процесса для учета физической неопределенности информации и комбинирования результатов аналитического и экспертного анализа состояния агрегата;

- проводить анализ неисправных и не эффективных работающих технологических подсистем с помощью ЭС в соответствии с предложенной методикой учета неопределенности, позволяющей сократить требуемое время и ресурсы диагностических процедур.

Список литературы

- [Джаратано et al., 2007] Джаратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирования. – М.: Вильямс, 2007.
- [Дюбуа и др., 1990] Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложение знаний в информатике. – М., Радио и связь, 1990.
- [Люгер, 2003] Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект: Стратегии и методы решения сложных проблем. – М.: Вильямс, 2003.
- [Barnett, 1981] Barnett J.A. Computational methods for a mathematical theory of evidence // In Proceedings of the 7th International Joint Conference on AI, Vancouver, BC. 1981.
- [Dempster, 2001] Dempster A.P. Belief functions in the 21st century: A statistical perspective // Proceedings of Institute for Operations Research and Management Science Annual meeting (INFORMS 2001). 2001.
- [Lefevre et al., 2002] Lefevre E., Colot O., Vannoorenberghe P. Belief functions combination and conflict management // Information Fusion. 2002. Vol. 3(2).
- [Murphy, 2000] Murphy C. Combining belief functions when evidence conflicts // Decision support systems. 2000. Vol. 29 (1).
- [Paliukh et al., 2017] Paliukh B.V., Vetrov A.N., Emelyanova I.I. Diagnostics and state analysis of multiple-stage production in terms of evolution management // 2017 Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). 2017.
- [Perov et al., 1993] Perov V.L., Paliukh B.V., Kuperman V.G. Defective chemical process chain detection in uncertainty condition // Computers chem. Engng. 1993. Vol. 17. No. 10.
- [Senz, 2002] Senz K. Combination of Evidence in Dempster–Shafer Theory. Binghamton University. 2002.
- [Shafer et al., 1985] Shafer G., Tversky A. Languages and designs for probability judgment. // Cognitive Science. 1985. 9.
- [Yager et al., 1994] Yager R., Fedrizzi M., Kacprzyk J. (eds.) Advances in the Dempster–Shafer Theory of Evidence. John Wiley & Sons Inc. 1994.
- [Yager et al., 2008] Yager R., Liu L., Classic Works of the Dempster–Shafer Theory of Belief Functions. Springer. 2008.
- [CLIPS, 2018] Reference Manual, Volume II, Advanced Programming Guide. – <http://clipsrules.sourceforge.net/documentation/v630/apg.htm>.

УДК 007:519.816

ПРИМЕНЕНИЕ РАССУЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНОГО СОТРУДНИКА ОТДЕЛА СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ¹

И.Е. Куриленко (*ivan@appmat.ru*)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва

В работе описывается пример использования методов искусственного интеллекта для создания «виртуального сотрудника», реализующего функции автоматической обработки обращений в отдел сопровождения программного обеспечения.

Ключевые слова: вывод на основе прецедентов, темпоральная логика, виртуальный сотрудник

Введение

В настоящее время методы искусственного интеллекта (ИИ) активно внедряются в программные системы. Имеющиеся методы и подходы, программные компоненты и технологии при должной интеграции позволяют конструировать автономных программных агентов, наделенных интеллектуальными функциями, позволяющих им заменять частично или полностью сотрудников-людей [Krupka et al, 2009; Diggelen et al., 2010; AA, 2018]. В настоящее время результаты деятельности таких агентов (далее «виртуальных сотрудников», ВС) могут быть неотличимы от решений и сотрудников-людей в случаях, если рассматриваются несложные и типичные (шаблонные) служебные обязанности. Например, это могут быть должности сотрудников отделов поддержки, контролеров, для которых ВС может не только служить для автоматизации рутинных задач, но и встраиваться в реальные бизнес-процессы и обеспечивать взаимодействие с людьми, имитируя реальных сотрудников.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00459).

В данной работе рассматривается пример применения методов рассуждений на основе прецедентов для построения такого ВС для отдела сопровождения программного обеспечения (ПО).

1. Постановка задачи

Многие организации по разработке ПО выполняют сопровождение программных продуктов (ПП). Значительная часть обращений организаций-пользователей обычно связана с отказами ПП. В этих случаях запрашиваются и анализируются протоколы (логи) работы ПП, по которым определяются причины проблем и предлагается их решения.

В качестве примера ПП, требующего активного сопровождения, будем рассматривать ПО автоматического платежного терминала. Сеть таких терминалов в настоящее время охватила всю страну, и в конкретных местах их установки может не быть квалифицированного обслуживающего персонала. В результате, получаемые сообщения о проблемах в работе терминалов не всегда связаны с ошибками работы ПО, особенно в период установки и наладки. Например, достаточно большое число обращений связано с ошибками монтажа аппаратуры или настройки ПО. Для большинства таких проблем формируются типовые решения, имеющие вид решающих правил.

Например: *«Если клиент сообщил о том, что нет реакции при попытке провести оплату бесконтактной банковской картой, то необходимо получить и проверить протокол драйвера бесконтактного считывателя карт. Если в протоколе присутствуют сообщения о проблеме доступа к порту считывателя, то рекомендовать проверить эту настройку. Если доступ есть, но считыватель не отвечает, то рекомендовать проверить соединительные провода и подачу питания на устройство».*

При большом числе установок (например, более 10 тысяч) число подобных обращений растёт. Для решения задачи сопровождения обычно нанимаются сотрудники низкой квалификации (младшие специалисты отдела сопровождения ПО, далее младшие специалисты). Они обучены решать типовые проблемы. Если они сталкиваются с нетиповой проблемой и не могут самостоятельно выработать решение, то к решению привлекается эксперт. В случае обнаружения отказа ПО выпускается исправленная версия. Решив проблему, эксперт формирует ее типовое решение.

Для учета обращений пользователей и накопления таких типовых решений в настоящее время часто используются специализированные программные системы – Service Desk, называемые далее системами управления задачами и заявками (СУЗЗ) [ITIL, 2012].

Использование СУЗЗ предполагает заполнение заявки на каждое обращение пользователя. Все взаимодействие с пользователем обычно выполняется через ее интерфейс. Главный компонент СУЗЗ – база данных (БД),

содержащая заявки. Для каждой заявки в ней хранится следующая информация (атрибуты заявки): номер (идентификатор) заявки; короткое описание заявки (одно или два предложения); кто обратился (пользователь); дата и время обращения; версия ПП; серьёзность (критичность); приоритет решения; описание шагов для воспроизведения проблемы; ожидаемый результат и фактический результат; кто ответственен за решение заявки; текущее состояние (статус); решение.

Как правило, СУЗЗ использует тот или иной вариант жизненного цикла заявки (ЖЦ), стадия которого определяется текущим состоянием (статусом) [ITIL, 2012]. В процессе решения заявки проводится обновление и дополнение ее полей. Типичный ЖЦ:

- «открыта» – заявка зарегистрирована;
- «в работе» – назначен ответственный за решение;
- «решена» – выработано решение.

Младшие специалисты, получив новую заявку, обычно выполняют поиск похожих заявок в СУЗЗ с целью повторного использования имеющегося решения. Таким образом, СУЗЗ неявно используются в качестве базы знаний (БЗ).

Функции младшего специалиста с успехом может выполнять ВС. Взаимодействуя с СУЗЗ, ВС может обрабатывать заявки. В результате принятия решения ВС меняет атрибуты заявки (например, изменяет статус на «решена» или «закрыта», или в историю работы над заявкой вносится какая-то рекомендация или вопрос). Если при регистрации ВС в СУЗЗ выдать ему «человеческое» имя, то в графическом интерфейсе СУЗЗ результаты его деятельности будет сложно отличить от работы сотрудника-человека.

Для реализации такого ВС весьма подходят методы поиска решений на основе прецедентов (CBR, Case-based reasoning) [Крупка et al., 2009]. Рассмотрим далее предлагаемую конструкцию ВС и схему его функционирования.

2. Конструкция ВС и общая схема его функционирования

Для реализации ВС потребуются следующие компоненты (рис. 1): интерфейс с СУЗЗ; база прецедентов (БП); анализатор заявки; анализатор протоколов; блок поиска решения; модуль обучения.

Интерфейс с СУЗЗ является интерфейсом связи рассматриваемого ВС с внешним миром. Через этот интерфейс он получает заявки и «общается» со всеми участниками их решения. Большинство современных СУЗЗ обеспечивают развитый программный интерфейс для автоматизации (API, application programming interface), позволяет: получать список заявок, назначенных определенному пользователю СУЗЗ; создавать новые заявки;

переназначать заявки; управлять полями заявок, статусом; вносить комментарии к заявке и т.п. Интерфейс с СУЗЗ обеспечивает получение заявок из СУЗЗ и преобразование их в форму, удобную для реализации процесса вывода.

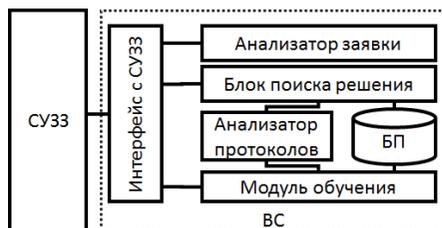


Рис.1. Конструкция ВС

Заявка описывается как $Z = \langle A, H \rangle$, где $A = (a_1, \dots, a_k)$, где a_i – атрибут заявки, $H = \{h_i\}$ – история работы над заявкой (список событий – действий людей и ВС).

ВС через интерфейс с СУЗЗ проводит поиск заявок для обработки. Алгоритм выбора заявок следующий. Если у заявки не заполнен атрибут «ответственный за решение», то ВС назначает эту заявку себе и направляет на анализатор заявки. Иные заявки обрабатываются ВС только, если ВС указан как ответственный за решение, и в атрибуте «время изменения» заявки указано время большее, чем указанное в атрибуте «время принятия решения ВС». Такие заявки направляются в блок поиска решения.

Анализатор заявки выполняет оценку полноты заполнения заявки и при необходимости запрашивает дополнительные данные (например, протоколы работы ПО). Реализован этот компонент может быть на основе базы продукционных правил, заданных экспертом. Пример правила: «Если атрибут «ПП» установлен в «ПО контроллера доступа» и атрибут «протокол работы» не заполнен, то запросить протокол работы контроллера». Заявка считается пригодной для передачи в блок поиска решения если не срабатывает ни одно из правил.

В блоке поиска решения ВС заявка сопоставляется с имеющимися в БП. В результате определяется типовое решение. Если оно найдено, то в заявке фиксируется соответствующая рекомендация. Иначе ВС переназначает заявку в работу человеку.

Анализатор протоколов используется блоком поиска решения для сопоставления протоколов работы ПО и будет рассмотрен ниже.

Модуль обучения используется для формирования новых прецедентов в БП на основе решенных заявок, имеющихся в СУЗЗ.

3. Блок поиска решения

Блок поиска решений построен на основе модифицированного метода рассуждения на основе прецедентов. Будем представлять прецеденты в виде $CASE = (x_1, x_2, \dots, x_n, T, R)$, где x_1, \dots, x_n – параметры заявки; $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$, где n – количество параметров для описания прецедента, а X_1, \dots, X_n – области допустимых значений соответствующих параметров, T – функция, сопоставляющая параметру используемую для сравнения метрику, R – рекомендация [Eremeev et al., 2015].

Для большинства параметров для оценки схожести подойдет обычная евклидова метрика. Для параметров, значение которых задается короткими текстами на естественном языке (ЕЯ), будем использовать специальную метрику для оценки сходства [Erkan et al., 2004]. Для определения сходства двух предложений будем представлять каждое предложение S как N -мерный вектор, где N – число всех возможных слов в целевом языке. Для каждого слова, которое появляется в предложении, значение коэффициента по соответствующей оси есть число появлений слова w в предложении, взвешенное коэффициентом idf_w (inverse document frequency), представляющим собой инверсию частоты, с которой слово w встречается в тексте. Таким образом, понижается вес широко используемых слов и междометий. Различия между двумя предложениями определяется тогда по следующей формуле [Ramos, 2003]:

$$Diff(x, y) = \frac{\sum_{w \in \{x, y\}} tf_{wx} tf_{wy} (idf_w)^2}{\sqrt{\sum_{x_i \in x} (tf_{x_i, x} idf_{x_i})^2} \cdot \sqrt{\sum_{y_i \in y} (tf_{y_i, y} idf_{y_i})^2}},$$

где $tf_{w,s}$ – число появлений слова w в предложении s .

При этом ВС для каждого прецедента может хранить в специальной БД предварительно рассчитанные значения частот для ускорения вычислений.

Наиболее сложный для сопоставления параметр – протокол работы системы. Для решения этой задачи предусмотрен анализатор протоколов.

Для ПО автоматического платежного терминала процесс работы может быть представлен в виде последовательности исполнения типовых операций. Каждая операция может быть описана как множество произошедших событий. Аномальные ситуации в работе ПО терминала могут быть выделены за счет анализа этой последовательности на предмет наличия операций, которые имели нетиповой или неизвестный характер. В прецедент могут включаться как необходимость наличия в протоколе какого-то конкретного события – например, ошибки определенного типа, так и более сложное условие, включающее контроль предварительно произошедших событий.

Первый случай не представляет какой-либо сложности для реализации, поэтому не будем его подробно рассматривать. Вторым случаем позволяет реализовать более качественный анализ происходящего, так как ситуация будет рассматриваться «в динамике», а решение приниматься с учетом истории развития процесса [Eremeev et al., 2015].

Будем представлять протокол как множество записей вида $Rec = (t, s, k, m)$, где $t \in D$ – время наблюдения события, s – тревожность события, $s \in \{\text{ошибка, предупреждение, рядовое, отладочное}\}$, k – тип события (например, начало операции, конец операции, активация поиска банковской карты), m – дополнительная информация (строковая константа), D – множество вещественных чисел.

Обычно ПО протоколирует достаточно большой объем событий, некоторые из которых несущественны для анализа. Поэтому вначале анализатором протоколов проводится фильтрация. Далее проводится «нарезка» на операции (по соответствующим типам событий). Каждая полученная операция нормализуется – из времени всех событий, вошедших в нее вычитается время самого первого события. Затем среди полученного множества операций выполняется поиск операции, описанной в прецеденте. Если найдена схожая или идентичная операция (в зависимости от «жесткости» метрики), то сходство по данному параметру считается установленным.

Для реализации алгоритма сравнения перейдем к метрической задаче согласования временных ограничений. Будем представлять операцию как $O = (V, C)$, где $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ – конечное множество временных переменных, соответствующих моментам времени; C – конечное число бинарных временных ограничений вида $C_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}]$.

Ограничения позволяют определить разрешенную дистанцию между моментами времени и интерпретируются как $(a_{ij} \leq V_j - V_i \leq b_{ij})$. Каждому V_i сопоставляется запись $Rec_i = (t_i, s_i, k_i, m_i)$. Такое представление позволяет фиксировать факт наступления событий, их порядок, время их появления.

Для упрощения реализации алгоритма определения схожести операций события нумеруются с учетом значения времени их наблюдения и типа. Это позволит быстро оценивать «наложение» операций друг на друга, а также значительно упрощает анализ подобия временных ограничений [Еремеев и др., 2012, 2013].

В итоге, для определения соответствия двух операций O_1 и O_2 будем использовать следующее условие:

- совпадает множество временных переменных O_1 и O_2 ;
- для всех $C_{ij}^1 \in O_1$ и $C_{ij}^2 \in O_2$ выполняется условие: $|lo(C_{ij}^1) - lo(C_{ij}^2)| < \varepsilon \wedge |hi(C_{ij}^1) - hi(C_{ij}^2)| < \varepsilon$, где: ε – пороговое значение; $lo(C_{ij}) = a_k$, $hi(C_{ij}) = b_k$ функции, выдающие нижнюю и верхнюю границы ограничения, соответственно.

В итоге блок вывода извлекает из БП все прецеденты выше некоторого порога сходства. Если получается несколько альтернатив, то предусмотрено два режима. В первом режиме ВС передает работу над заявкой человеку с указанием найденных вариантов, во втором случае выбирается прецедент с самой высшей оценкой сходства.

Заключение

В работе рассмотрен пример использования методов рассуждений на основе прецедентов для построения ВС для отдела сопровождения ПО.

Прототип использован в процессе сопровождения ПО автоматического терминала оплаты. В БП прототипа к настоящему моменту содержится 80 прецедентов. Прототип ВС позволил оценить практическую пользу предлагаемого подхода. В настоящее время ведется работа по улучшению наполненности БП прототипа. Реализация ВС позволяет повысить оперативность первичной обработки заявок на сопровождение и получить экономический эффект вследствие снижения нагрузки на специалистов.

Список литературы

- [Еремеев и др., 2012] Еремеев А.П., Варшавский П.Р., Куриленко И.Е. Моделирование временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов // *Information technologies and knowledge*. 2012. Vol. 6. No. 3.
- [Еремеев и др., 2013] Еремеев А.П., Куриленко И.Е. Методы моделирования временных зависимостей в интеллектуальных системах с использованием темпоральных прецедентов // *Information Models and Analyses*. 2013. Vol. 2. No. 4.
- [AA, 2018] *Ai Applied*. – <http://www.ai-applied.com>.
- [Diggelen et al, 2010] Diggelen van J., Muller T., Bosh van den K. Intelligent virtual agents // *Proc. 10th International Conf., IVA 2010, Philadelphia, PA, USA*. 2010.
- [Eremeev et al., 2015] Eremeev A.P., Kurilenko I.E., Varshavskiy P.R. Temporal Case-Based Reasoning System for Automatic Parking Complex // *Int. J. of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*. 2015. Vol 2. No. 5.
- [Erkan et al., 2004] Erkan G., Radev D. LexRank: Graph-based Lexical Centrality as Saliency in Text Summarization // *J. of Artificial Intelligence Research*. 2004. Vol. 22.
- [ITIL, 2012] *ITIL Foundation Handbook*. 3rd ed. The Stationery Office, Norwich. 2012.
- [Krupka et al., 2009] Krupka J., Kasparova M., Jirava P. Case-based reasoning model in process of emergency management // *Man-Machine Interactions*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009. Vol. 59.
- [Ramos, 2003] Ramos J. Using TF-IDF to determine word relevance in document queries // *In First International Conference on Machine Learning*, New Brunswick: NJ, USA. 2003.

УДК 351.854

ПРОБЛЕМЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПОНЯТИЯ ЭТИКИ В ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ¹

Г.В. Ройзензон (*rgv@isa.ru*)
Институт системного анализа
Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление» РАН,
Московский физико-технический институт
(государственный университет),
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва

Рассмотрена инициатива IEEE по разработке проектов стандартов этики искусственного интеллекта (ИИ) – этически обусловленного проектирования. Представлен перечень проектов стандартов этики ИИ IEEE. Рассмотрены основные проблемы формализации понятия этики в ИИ. Проведен критический анализ различного математического инструментария, позволяющего формализовать понятия этики в ИИ. Предложены механизмы для успешного решения поставленной задачи.

Ключевые слова: этика, стандарты IEEE, этические нормы в ИИ, формализация понятия этики в ИИ

Введение

В 2016 году структура IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers – Институт инженеров электротехники и электроники), параллельно с еще несколькими организациями (например, ЮНЕСКО), выступила с глобальной инициативой в области этики искусственного интеллекта (ИИ) [IEEE EAD, 2016], [Карпов и др., 2018]. Важность предпринятых IEEE усилий определяется ее фактически ведущей ролью в сообществе ученых и инженеров в электротехнике, электронике, информационных технологиях, телекоммуникациях, что обязательно окажет самое непосредственное влия-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 16-07-00865, 16-29-12901, 16-29-12878).

ние на разработчиков технологий ИИ. В результате усилий IEEE был разработан документ “Ethically Aligned Design” («Этически обусловленное проектирование») [IEEE EAD, 2016]. В документе IEEE отражены основные актуальные угрозы и риски [Бритков и др., 2017], связанные с внедрением автономных систем на базе ИИ.

В рамках инициативы IEEE предполагается разработка серии стандартов (табл. 1), применение которых, скорее всего, станет обязательным для всех специалистов и организаций, занятых в создании различных продуктов в той или иной степени использующих технологии ИИ. Кроме того, со своей стороны, организации и специалисты, использующие технологии ИИ, должны в самое ближайшее время сформулировать и внести свои предложения по выработке дополнительных условий соответствия упомянутым стандартам. Таким образом, в процедуре выработки стандартов должны принять участие несколько сторон (например, IEEE, разработчики и научное сообщество).

Основная цель данной работы – обзор существующего математического инструментария, который может быть использован для формализации понятия этики в ИИ. В частности, особый интерес представляют подходы, позволяющие оценивать на соответствие определенным требованиям (этическим нормам, критериям, стандартам) технологии, использующие ИИ.

Прежде чем рассматривать конкретные математические подходы для решения поставленной задачи важно проанализировать сформулированные к настоящему моменту основные определения для используемых терминов.

Этика – философская дисциплина, исследующая вопросы морали и нравственности.

Относительно определения научного направления ИИ дело обстоит несколько сложнее. Нужно признать, что какого-то одного устоявшегося и единодушно принятого научным сообществом определения к настоящему моменту не выработано. Предложено огромное количество различных определений ИИ, сравнение и анализ которых явно выходит за рамки представленной работы. По мнению автора настоящей статьи под ИИ понимается группа методов и подходов, которые ориентированы на решение слабоструктурированных задач. Разумеется, представленное определение не претендует на истину в последней инстанции.

Прежде всего, нужно упомянуть классические фундаментальные работы по этике как отечественных, так и зарубежных специалистов, которые оказали существенное влияние на современные представления. В частности, можно отметить работы: Р.Г. Апресяна [Апресян, 2017]; А.А. Гусейнова [Гусейнов, 2017]; О.Г. Дробницкого [Дробницкий, 2002]; П.А. Кропоткина [Кропоткин, 1991]; И.Т. Фролова и Б.Г. Юдина [Фролов и др., 2016]; А.Швейцера [Швейцер, 1973]; Р. Шпемана [Шпеман, 1993] и ряда других.

Табл. 1.

Код проекта стандарта IEEE	Оригинальное название
P7000	Model Process for Addressing Ethical Concerns During System Design
P7001	Transparency of Autonomous Systems
P7002	Data Privacy Process
P7003	Algorithmic Bias Considerations
P7004	Standard for Child and Student Data Governance
P7005	Standard for Transparent Employer Data Governance
P7006	Standard for Personal Data Artificial Intelligence (AI) Agent Standard for Personal Data Artificial Intelligence (AI) Agent
P7007	Ontological Standard for Ethically Driven Robotics and Automation Systems
P7008	Standard for Ethically Driven Nudging for Robotic, Intelligent and Autonomous Systems
P7009	Standard for Fail-Safe Design of Autonomous and Semi-Autonomous Systems
P7010	Wellbeing Metrics Standard for Ethical Artificial Intelligence and Autonomous Systems
P7011	Standard for the Process of Identifying and Rating the Trustworthiness of News Sources
P7012	Standard for Machine Readable Personal Privacy Terms
P7013	Inclusion and Application Standards for Automated Facial Analysis Technology

В истории науки можно привести несколько ярких примеров того как развитие новых технологий и вопросы этики приводили к весьма существенным противоречиям и столкновениям мнений политиков, общественных организаций, ведущих мировых ученых. При этом важно обратить внимание на то, что в вопросах этики в рамках научно-технического прогресса инициатива исходила зачастую именно от самих ученых.

В 1955 году Б. Рассел озвучил одну из первых таких инициатив (знаменитый манифест Рассела–Эйнштейна). Инициатива Б. Рассела положила начало широко известному теперь Пагуошскому движению за мир и разоружение [Фролов и др., 2016], поскольку к середине 1950-х годов угроза всеобщей ядерной катастрофы стала очевидной и появилась необходимость мобилизовать авторитетнейших ученых (Ф. Жолио-Кюри, Л. Полинг, А. Эйнштейн и др.) для преодоления сложившейся критической ситуации.

Еще одним таким ярким примером служит инициатива генетика П. Берга, который в 1974 году предложил наложить мораторий на эксперименты с рекомбинантной ДНК для того, чтобы иметь возможность оценить все риски и последствия использования этой новой технологии [Фролов и др., 2016].

Основные выводы, которые можно сделать из подобных инициатив ведущих мировых ученых, заключаются в том, что развитие и неразумное использование технологий может угрожать существованию человечества (например, ядерное оружие). Безусловно, повсеместное внедрение различных технологий ИИ также сопряжено с определенными опасностями и рисками [Бритков и др., 2017], что становится причиной инициатив по разработке проектов стандартов в области этики ИИ со стороны IEEE.

Еще один важный вывод, который можно здесь сделать, заключается в том, что, с одной стороны, развитие тех или иных опасных технологий без учета вопросов этики, может привести человечество к совершенно катастрофическому результату. С другой стороны, если «загнать» развитие современных технологий в слишком жесткие рамки это станет причиной замедления темпов научно-технического прогресса (очень характерный пример с уже упомянутыми технологиями генной инженерии [Юдин и др., 2016]).

Кроме того, есть еще один важный аспект, связанный с инициативой IEEE по разработке стандартов. К настоящему моменту на рынке появилось огромное количество продуктов, которые претендуют на то, что в них в той или иной степени используются технологии ИИ. В действительности при тщательном изучении оказывается, что представленные продукты вообще не имеют никакого отношения к рассматриваемой предметной области. Таким образом, предстоящая возможная достаточно жесткая сертификация продуктов, использующих технологии ИИ, заставит многих недобросовестных производителей задуматься, прежде чем осуществлять различные маркетинговые действия (иными словами, голословно заявлять, что в их продукции используются технологии ИИ). Соответственно разработка рассматриваемых стандартов может послужить определенным фильтром, так как многие производители продукции много раз подумают, стоит ли им заявлять, что их продукция использует технологии ИИ, зная, что им предстоит обязательная непростая процедура сертификации.

Анализ классических работ по этике, а также выводы авторов работы [Карпов и др., 2018] позволяют констатировать, что вопросы соотношения этики и ИИ коренным образом отличаются от того, что понимается, например, под этическими проблемами генных технологий, информатики, естествознания. Это отличие определяется тем, что в ИИ этические вопросы ближе к пониманию этики в философском или социогуманитарном смысле, и связаны эти этические аспекты прежде всего с тем, что они касаются вопросов поведения и принятия решений. Соответственно данный аспект существенно влияет на выбор математического инструментария для формализации понятия этики в ИИ.

1. Формальные методы

Проблема формализации этических норм включает в себя две основные задачи. Первая – это создание форм представлений норм, вторая – выбор соответствующего математического аппарата для работы с этими формами: сопоставления, измерения, анализа. Нечеткая, многозначная или вероятностная логика – это достаточно глубоко проработанные области, доведенные, вообще говоря, до уровня практически применимых технологий. Здесь гораздо важнее определиться с качественным уровнем представления параметров систем ИИ и этических норм.

Кроме того, в рамках этики ИИ требуется разработка новых норм, таких, например, как гуманность (как машины влияют на наше поведение и взаимодействие), сингулярность (как мы сможем контролировать сложную «умную» систему), безопасность. Не всегда соответствие тем или иным нормам можно свести к классическим «да» и «нет». Поэтому актуально рассмотрение и использование различных неклассических логик (например, многозначных), механизма многокритериальной классификации, вероятностных подходов. Рассмотрим указанный математический аппарат подробнее.

1.1. Булева алгебра

Концепция формализации различных этических понятий активно развивается на протяжении последних десятилетий. В качестве пионерской работы по исследуемому вопросу важно упомянуть книгу В.А. Лефевра «Алгебра совести» [Лефевр, 2003]. В этой книге целая глава посвящена вопросам этики и возможным аспектам, связанным с формализацией этого понятия. Для решения рассматриваемой задачи в основном используется математический аппарат булевой алгебры. Это имеет как положительные, так и определенные отрицательные стороны. К положительным можно отнести то, что булева алгебра к настоящему моменту хорошо развита, есть множество приложений, программных библиотек для самых разных инструментальных средств. К отрицательным можно отнести то, что не всегда различные этические проблемы (в том числе и относящиеся к ИИ) можно строго разделить на «белые» и «черные» [Поспелов, 1994], а механизм булевой алгебры зачастую предполагает именно такой подход. В работе Д.А. Поспелова [Поспелов, 1994] для преодоления данной проблемы вводится понятие «кольцевых» шкал, что для решения задачи формализации этики ИИ является весьма оригинальным и перспективным подходом.

1.2. Многозначные логики

В рамках развития различных неклассических парадигм в ИИ, в частности, подхода многозначных логик важно упомянуть работы отечественных специалистов, прежде всего, А.С. Карпенко [Карпенко, 2010], В.К. Финна [Финн, 2006], О.П. Кузнецова [Кузнецов, 1995], В.Б. Тарасова [Тарасов,

2002], В.Н. Вагина [Вагин и др., 2008]. Использование многозначных логик для формализации понятия этики ИИ также сопряжено с определенными сложностями. В частности, переход от трехзначной логики к четырехзначной может потребовать кардинальной «переделки» соответствующих математических конструкций, что фактически означает необходимость решения указанной задачи заново.

1.3. Теория вероятностей и нечеткая логика

В этом смысле использование вероятностного аппарата и нечеткой логики [Zadeh, 1965] для формализации понятий этики ИИ [Шрейдер и др., 1997] является весьма интересным подходом, так как нечеткую логику можно считать неким обобщением многозначной логики [Тарасов, 2002]. К известным особенностям применения нечеткой логики можно отнести определенные проблемы при построении функций принадлежности: разные способы построения таких функций приводят к разным результатам (неустойчивость методов нечеткой логики относительно исходных данных).

1.4. Вербальный анализ решений

Еще одним возможным подходом для формализации понятия этики ИИ является использование методов вербального анализа решений (ВАР) [Ларичев, 2006]. Группа методов ВАР опирается на использование достижений различных научных дисциплин: когнитивной психологии (измерения, операции получения информации при построении решающего правила, поэтапное построение решающего правила); прикладной математики (обоснование вида решающего правила, методов получения и проверки информации на непротиворечивость); теории организаций (получение объяснений); компьютерных наук (диалог человек-компьютер). Разработанные в рамках этого подхода методы принятия решений позволяют при анализе вариантов сложных решений органично сочетать качественную и количественную информацию об альтернативах, суждения экспертов и предпочтения лиц, принимающих решения, объективные и субъективные факторы, характерные для проблемной ситуации.

Применительно к проблеме формализации этики в ИИ с использованием методов ВАР возможна следующая постановка задачи. Если в рамках этики ИИ разработать некоторый перечень норм, то степень соответствия той или иной норме можно рассматривать как задачу многокритериальной порядковой классификации [Асанов и др., 2001], [Ларичев, 2006]. Соответственно, на основе анализа таких норм этики ИИ мы должны будем принять решение о том, что либо нормы соблюдены, либо есть некоторое несущественное их нарушение, либо наблюдается какой-то заметный отход от принятых норм. То есть нам будет нужно отнести определенную совокупность оценок по каждой из норм к некоторому классу решений (категории).

К положительным сторонам использования методов ВАР прежде всего можно отнести то, что к исходным данным не применяются никакие операции по их переводу в количественную форму. Известно, что перевод вербальных измерений в «цифру» зачастую весьма субъективен и не имеет строгого математического обоснования. Кроме того, методы ВАР позволяют получить объяснения принятых решений (интерпретация результата) в терминах предметной области, здесь – в терминах описания норм этики ИИ. В качестве недостатков методов ВАР можно отметить большие трудозатраты эксперта или лица, принимающего решения, при работе в признаковом пространстве большой размерности. В этом случае необходимо применять различные методы снижения его размерности [Ройзензон, 2005]. Таким образом, можно констатировать, что к настоящему моменту разработан широкий спектр инструментальных средств, опирающихся на самые различные математические конструкции, позволяющие успешно решить задачу формализации этических норм в ИИ.

Заключение

В представленной статье рассмотрена инициатива IEEE по разработке проектов стандартов этики ИИ. Предложены возможные определения этики и ИИ. Проанализирована особенность применения некоторых норм этики применительно к разработке и использованию современных технологий ИИ. Представлен перечень проектов стандартов этики ИИ IEEE (P7000–P7013), что говорит о достаточно широком спектре проблем, с которыми в самое ближайшее время столкнутся разработчики различных систем ИИ. Фактически это означает, что разработчики систем ИИ уже сейчас должны начать подготовку к прохождению различных процедур сертификации (т.е. соответствия их продукции, использующей технологии ИИ, указанным стандартам ИИ). В этой связи критический анализ различного математического инструментария, позволяющего формализовать понятия этики ИИ, будет способствовать разработке понятных и прозрачных «правил игры». К формальным методам, использование которых весьма востребовано для поставленной в статье задачи, можно отнести следующие: булева алгебра, многозначные логики, нечетная логика и теория вероятностей, а также методы ВАР. Благодаря тому, что к настоящему моменту все перечисленные концепции весьма развиты, можно достаточно оптимистично смотреть на решение задачи формализации этики ИИ. Из нерешенных задач необходимо отметить, что для каждого из проектов стандартов IEEE необходима разработка индивидуальных систем критериев (фактически это некий перечень норм) и соответствующих шкал оценок, по которым можно будет принять решение о степени соответствия той или иной технологии ИИ предложенным этическим стандартам.

Список литературы

- [Апресян, 2017] Апресян Р.Г. Этика: учебник. – М.: КноРус, 2017.
- [Бритков и др., 2017] Бритков В.Б., Ройзензон Г.В. Современные подходы анализа риска // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. XVI Всероссийская научно-практическая конференция. Сборник материалов. – М.: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2017.
- [Гусейнов, 2017] Гусейнов А.А. Античная этика. – М.: URSS, 2017.
- [Вагин и др., 2008] Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. – М.: Физматлит, 2008.
- [Дробницкий, 2002] Дробницкий О.Г. Моральная философия: Избранные труды. – М.: Гардарики, 2002.
- [Карпов и др., 2018] Карпов В.Э., Готовцев П.М., Ройзензон Г.В. К вопросу об этике и системах искусственного интеллекта // Философия и общество, 2018, № 2(87). DOI: 10.30884/jfo/2018.02.07.
- [Кропоткин, 1991] Кропоткин П.А. Этика: Избранные труды. – М.: Политиздат, 1991.
- [Кузнецов, 1995] Кузнецов О.П. Неклассические парадигмы в искусственном интеллекте // Известия РАН. Теория и системы управления, 1995, № 5.
- [Ларичев, 2006] Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. – М.: Наука, 2006.
- [Лефевр, 2003] Лефевр В.А. Алгебра совести. – М.: Когито-Центр, 2003.
- [Асанов и др., 2001] Асанов А.А., Ларичев О.И., Ройзензон Г.В. и др. Метод многокритериальной классификации ЦИКЛ и его применение для анализа кредитного риска // Экономика и математические методы, 2001, Т. 37, № 2.
- [Поспелов, 1994] Поспелов Д.А. «Серые» и/или «черно-белые» // Прикладная эргономика. Специальный выпуск «Рефлексивные процессы», 1994, № 1.
- [Ройзензон, 2005] Ройзензон Г.В. Способы снижения размерности признакового пространства для описания сложных систем в задачах принятия решений // Новости искусственного интеллекта, 2005, № 1.
- [Тарасов, 2002] Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002.
- [Финн, 2006] Финн В.К. Интеллектуальные системы и общество: Сборник статей. – М.: КомКнига, 2006.
- [Фролов и др., 2016] Фролов И.Т., Юдин Б.Г. Этика науки: Проблемы и дискуссии. – М.: URSS, 2016.
- [Швейцер, 1973] Швейцер А. Культура и этика. – М.: Прогресс, 1973.
- [Шпеман, 1993] Шпеман Р. Основные понятия морали. – М.: Московский философский фонд, 1993.
- [Шрейдер и др., 1997] Шрейдер Ю.А., Мухелишвили Н.Л. Проблема неполного добра в модели ценностной рефлексии по В. А. Лефевру // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1997, № 25.
- [IEEE EAD, 2016] IEEE. Ethically Aligned Design. 2016. – <https://ethicsinaction.ieee.org>.
- [Zadeh, 1965] Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. No. 3.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАРКЕТИНГОВЫХ ДАННЫХ¹

Н.А. Семенов (*slt1155@mail.ru*)

Г.Б. Бурдо (*gbtms@yandex.ru*)

Тверской государственной технической университет,
Тверь

В работе описывается проблемная область маркетинговых исследований с точки зрения интеллектуального анализа данных. Основной особенностью маркетинговых данных является их разнотипность. Результаты исследования могут служить основой для формирования базы знаний и соответствующих экспертных систем и систем поддержки принятия решений.

Ключевые слова: искусственный интеллект, маркетинг, регрессия, классификация, сегментация, прогнозирование, поддержка принятия решений

Введение

Интеллектуальный анализ данных (ИАД) наряду с коммуникативными и текстологическими методами используется для извлечения поверхностных и глубинных знаний необходимых для формирования БЗ и принятия решений в разных сферах человеческой деятельности, в частности, в маркетинге [Филиппов, 2001; Нэреш, 2007]. Основной особенностью данных, используемых при проведении маркетинговых исследований в области анализа рыночного потенциала, ценообразования, конкурентоспособности, сегментирования и позиционирования, производственной и транспортной логистики, рекламной деятельности и PR, является их разнотипность. При этом маркетинговые данные могут быть измерены в номинальной, ранговой, интервальной и относительной шкалах. К основным задачам ИАД, решаемым в рамках маркетинговых исследований, можно отнести регрессию, классификацию, сегментацию (кластеризацию), прогнозирование, а также задачи дисперсионного, дискриминантного и факторного анализа.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-01-00566).

1. Регрессионный анализ

Регрессионный анализ предполагает, что зависимая переменная Y и независимые переменные X измерены в относительной шкале. При выборе метода регрессионного анализа следует учитывать размерность задачи, наличие мультиколлинеарности в матрице регрессоров X ; $\dim X = n * m$, где n – объем выборки, m – число регрессоров (независимых переменных). Логике выбора метода структурно-параметрической идентификации аддитивной модели $Y = f(x)$ можно определить следующими правилами-продукциями ([Семенов и др., 2014]):

- ЕСЛИ** $m < 10$ **И** мультиколлинеарность X отсутствует,
ТО использование метода множественной линейной регрессии;
- ЕСЛИ** $10 < m < 40$ **И** мультиколлинеарность X отсутствует,
ТО использование метода всех возможных регрессий;
- ЕСЛИ** $m > 40$ **И** мультиколлинеарность X отсутствует,
ТО использование метода пошаговой регрессии;
- ЕСЛИ** $n < m$, **ТО** использование многорядного алгоритма МГУА;
- ЕСЛИ** мультиколлинеарность X присутствует,
ТО использование метода гребневой (ридж) регрессии.

Для устранения мультиколлинеарности X может быть использована процедура факторного анализа или процедура исключения одной или нескольких коррелирующих независимых переменных.

Определенные выше методы структурно-параметрической идентификации могут быть использованы для построения любой линейной по параметрам модели, анализ адекватности которой осуществляется на основе F-статистики. В случае если адекватность модели, идентифицированной на основе исходных данных X, Y ($\dim Y = n$), не подтверждается, то целесообразна реализация эвристической процедуры расширения матрицы X за счет введения столбцов с квадратами значений для независимых переменных, наименее коррелирующих с зависимой переменной, поскольку коэффициент корреляции определяет силу только линейной связи между двумя переменными. Степень независимых переменных не следует назначать выше третьей.

Методы регрессионного анализа позволяют выявить причинно-следственные связи между зависимой и независимыми переменными с целью формирования соответствующих правил-продукций, которые являются основой для формирования БЗ и последующего принятия решений, например:

- ЕСЛИ** цена товара = ...руб. **И** расходы на рекламу = ...% от валового дохода **И** инфляция = ...% **И** предоплата = ...%,
ТО чистая прибыль = ...руб. **И** время реализации товара = ... дней.

В качестве зависимой переменной могут выступать прибыль от реализации товара, спрос, эффективность рекламы, а в качестве независимых переменных – цена товара, издержки, затраты на рекламу, платежеспособность населения. В результате могут быть решены задачи исследования влияния на объем продаж цены товара, расходов на рекламу, издержек на торговых посредников, мерчендайзинговые мероприятия.

2. Дисперсионный и дискриминантный анализ

В случае если зависимая переменная измерена в относительной шкале, а независимые переменные в ранговой (качественной), то для анализа данных используется дисперсионный анализ, предусматривающий: определение зависимой и независимых переменных; разложение полной дисперсии на компоненты; измерение эффектов, проверку значимости и интерпретацию результатов. На основе дисперсионного анализа решаются задачи анализа сегментов рынка с точки зрения потребления, оценки торговой марки группами респондентов, которые просмотрели разные рекламные ролики, оценки эффективности внутримаркетинговой рекламы и пр. В последнем случае в качестве зависимой переменной используется объем сбыта, а независимая переменная может принимать значения: $x = \{\text{высокий уровень, средний уровень, низкий уровень}\}$. При проведении маркетинговых исследований часто анализируется одновременное влияние на зависимую переменную нескольких факторов, например, как меняются намерения потребителей приобрести товар при различных уровнях цены (высокая, средняя, низкая) и доходов (высокий, средний, низкий), как уровень рекламы и уровень цен влияют на продажи товара данной торговой марки, влияют ли на выбор потребителей данной торговой марки уровень их образования и возраст.

Дискриминантный анализ используется с целью выявления различий между исследуемыми группами, если независимые переменные выражены в относительной шкале, а зависимая в качественной. На основе дискриминантного анализа исследуются группы потребителей конкурирующих товаров на предмет того, существуют ли различия между исследуемыми группами по разным признакам с целью формирования «типичного портрета покупателя»? В качестве признаков могут рассматриваться средства массовой информации, уровень дохода, возраст.

3. Классификация и кластеризация

Классификация широко используется в маркетинговых исследованиях для получения представления о типе покупателей, товаров или объектов, на основе на основе описания атрибутов для идентификации определенного класса. Классификация в отличие от кластеризации предполагает, что апри-

ори классы известны. В рамках мерчендайзинговых исследований актуально решение задачи классификации товаров на «связанные» и «несвязанные» на основе исходной таблицы покупок и формирования матрицы совместных покупок. В результате могут быть разработаны стратегии ценообразования на «связанные товары», включая формирование системы скидок на один из них или сформирована рекламная кампания в ходе акции по поддержке сбыта, когда основное внимание сосредоточено на одном из «связанных» товаров. Классификация и кластеризация не предполагают деление переменных на зависимые и независимые и допускают использование данных, измеренных в различных шкалах.

Для классификации в маркетинговых исследованиях используются следующие методы:

- АВС-анализ, позволяющий классифицировать ресурсы по степени их важности;
- XYZ-анализ предназначен для классификации клиентов или товаров по стабильности их закупок;
- FMR-анализ используется для исследования товарного ассортимента по частоте обращений на склад;
- RFM-анализ используется для разделения клиентов на классы в соответствии с критериями новизны покупки, их количества и потраченной денежной суммы;
- VEN-анализ предназначен для сегментации ассортимента товара по степени важности для потребителя.

Задача кластерного анализа состоит в формировании групп однородных внутри (условие внутренней гомогенности) и четко отличных друг от друга (условие внешней гетерогенности). Целью кластерного анализа в маркетинге является определение целевых групп потребителей, для которых было бы целесообразно разработать специальное торговое предложение. Техника кластерного анализа заключается в выявлении уровня схожести всех исследуемых элементов в порядке возрастания уровня различий между ними.

Выполнение кластерного анализа предусматривает следующие этапы:

- определение атрибутов для описания объектов;
- выбор меры расстояния;
- выбор метода кластеризации;
- определение количества кластеров;
- интерпретация и профилирование кластеров;
- оценка достоверности кластеризации.

При определении количества кластеров следует руководствоваться теоретическими и практическими соображениями. Например, если цель кластеризации – выявление сегментов рынка, то в интересах менеджмента необходимо получить конкретное количество кластеров. Интерпретация и профилирование кластеров включает проверку кластерных центроидов. Для оценки достоверности кластеризации сравниваются результаты, полученные на основе разных мер расстояния и разных методов кластерного анализа.

Кластерный анализ применяется в маркетинге для решения задач сегментирования потребителей и товаров, их позиционирования. При этом в качестве атрибутов используются социально-демографические, экономические, психографические показатели, цена, качество и дизайн товара.

4. Факторный анализ

Для группировки большого числа переменных (факторов) и сведения к минимуму числа «обобщающих» факторов в маркетинговых исследованиях используется факторный анализ. При этом переменные, имеющие между собой высокую степень корреляции, объединяются в один фактор, что при использовании регрессионного анализа позволяет устранить мультиколлинеарность в матрице независимых переменных X . В случае огромного массива исходных данных факторный анализ позволяет «сжать» его для проведения дальнейших исследований и предшествует применению других методов статистического анализа.

На основе факторного анализа могут быть решены задачи: сегментации рынка для определения латентных (скрытых) переменных для группировки потребителей; разработки товарной стратегии для определения характеристик торговой марки, влияющих на выбор потребителей; разработки стратегии ценообразования для определения характеристик потребителей, чувствительных к цене. При использовании факторного анализа переменные не подразделяются на зависимые и независимые, а их значения должны быть выражены в интервальной или относительной шкала. Определенные сложности могут возникнуть при интерпретации «обобщающих» факторов.

5. Прогнозирование

Прогнозирование в маркетинге рассматривается в двух аспектах – с точки зрения адаптации к рынку и влияния на рынок, чему соответствуют два направления – спонтанных изменений рынка и его возможных реакций на действия фирмы в области реализации маркетинговых мероприятий. Прогнозирование спонтанных изменений рынка охватывает явления, на которые конкретная фирма не может оказывать влияние, но которые могут иметь значительное влияние на фирму, например, прогнозирование макро-

факторов маркетинговой среды; прогнозирование факторов, связанных с возможным поведением конкурентов, изменения потребностей и вкусов потребителей. Среди множества объектов прогнозирования в маркетинге наиболее актуальным является прогнозирование продаж для определения политики закупок, поддержания оптимального объема продукции на складах (производственная логистика), рентабельности продукции. Для решения задач прогнозирования в маркетинговых исследованиях используются:

- качественные методы;
- статистические методы экстраполяции тенденций;
- экспликативные модели;
- экспериментальные методы.

Наибольший интерес с точки зрения ИАД представляют статистические методы экстраполяции тенденций. При этом от прогноза товарного рынка требуется: надежность, научная обоснованность и системность; альтернативный характер с четкой формулировкой всех гипотез и предпосылок, положенных в его основу; верифицируемость, то есть наличие надежной методики оценки достоверности и точности прогноза. При исследовании одномерных временных рядов с целью повышения качества прогнозирования целесообразна реализация процедуры комбинирования частных прогнозов, имеющих альтернативный характер [Нэреш, 2007].

6. SWOT-анализ

Эффективным инструментом исследования конкурентоспособности фирмы является SWOT-анализ, ориентированный на изучение сильных и слабых сторон в сопоставлении с возможностями и угрозами для нее во внешней среде. Для реализации SWOT-анализа необходимо комплексное исследование финансово-хозяйственной деятельности и интеллектуального капитала предприятия. При этом необходимо учитывать особенности типа конкретной фирмы: промышленное предприятие, IT-фирма, медиа-компания. При анализе конкурентоспособности промышленного предприятия основное внимание уделяется результатам инновационной и финансово-хозяйственной деятельности [Семенов и др., 2017а]. Для IT-фирмы, медиа-компании на первый план выступает анализ интеллектуального капитала (человеческий капитал в виде знаний, творческих способностей, навыков; организационный капитал – техническое и программное обеспечение; потребительский капитал – наработанные связи с клиентами и информация о них) [Семенов и др., 2017б].

С целью реализации SWOT-анализа используются методы регрессионного, дисперсионного и кластерного анализа.

Заключение

Методы многомерного статистического анализа в рамках ИАД являются мощным инструментом извлечения знаний из разнотипных маркетинговых данных с целью разработки экспертных систем и систем поддержки принятия решений в области маркетинга.

Список литературы

- [Нэреш, 2007] Нэреш К. Малхотра. Маркетинговые исследования. – М.: Вильямс, 2007.
- [Семенов и др., 2014] Семенов Н.А., Бурдо Г.Б. Подход к построению интеллектуальной системы маркетинговой информации // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS&IT-2014), 2014, Т. 2.
- [Семенов и др., 2017а] Семенов Н.А., Морозов А.К. Алгоритм оценки конкурентоспособности предприятия на основе производственной модели // Программные продукты, системы и алгоритмы, 2017, №1. – <http://swsys-web.ru>.
- [Семенов и др., 2017б] Семенов Н.А., Шодикулова Е.З. Алгоритмическое обеспечение информационно-аналитической системы оценки и анализа конкурентоспособности IT-предприятия // Программные продукты, системы и алгоритмы, 2017, №2. – <http://swsys-web.ru>.
- [Филиппов, 2001] Филиппов В.А. Интеллектуальный анализ данных: методы и средства. – М.: Эдиториал УРСС, 2001.

УДК 004.5

ОРИЕНТИРОВАННЫЕ НА ОПЫТ КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПРОСТРАНСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ¹

П.И. Соснин (*sosnin@ulstu.ru*)

Ульяновский государственный технический
университет, Ульяновск

В работе представляется концептуальное пространство, структура и содержание которого формируются и используются в процессе проектирования автоматизированной системы. Специфику пространства определяет его материализация в семантической памяти вопросно-ответного типа, обслуживающей взаимодействие проектировщиков с доступным опытом.

Ключевые слова: автоматизированная система, вопросно-ответная сеть, концептуальное пространство, семантическая память

Введение

К специфике создания современных автоматизированных систем (АС) относится интенсивное использование программной инженерии в условиях высокой сложности компьютеризованной операционной среды, при взаимодействии с которой проектировщикам приходится согласованно применять разнородный опыт, развивая его в процессе проектирования.

Более того, в разработке каждой АС активность команды проектировщиков осуществляется в определённой области физического пространства в условиях воздействия на процесс проектирования разнообразных ситуационных факторов, возникновение которых часто непредсказуемо (в полезном обзоре [Clarke et al., 2008] около 400 таких ситуационных факторов отображены на 48 их вариантов, распределённых по 11 группам).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 18-07-00989, 18-47-730016).

В таких условиях, явный учёт пространства проектирования (design space, S), документирование его проявлений, а также построение и использование полезных моделей S приводят к позитивам как для процесса проектирования АС, так и его результатов.

В наиболее общем плане под пространством проектирования понимают открытое динамическое образование, состоящее из связанных объектов разной природы, ограничивающих активность проектировщиков, вовлечённых в согласованную работу. Такое понимание S предполагает явное или опосредованное взаимодействие проектировщиков с его составляющими.

Интересы исследования, представляемого ниже, связаны с конструктивным представлением пространства S на концептуальном этапе проектирования АС, который является источником дорогостоящих промахов и ошибок проектирования, обусловленных негативными проявлениями человеческого фактора [Chaos, 2018].

Исследование привело к концептуальной версии CS пространства S , в основу которой положен явный учёт взаимодействия проектировщиков с опытом в процессах решения задач концептуального этапа проектирования АС. В предлагаемой версии пространство CS формируется оперативно (по ходу решения задач) с помощью отображения составляющих S на семантическую памяти вопросно-ответного типа. Отображение обеспечивает инструментально-моделирующей среде WIQA (Working In Questions and Answers), ориентированная на концептуальное проектирование АС [Sosnin, 2018a].

1. Представления пространства проектирования

В теории и практике проектирования использование термина «пространство» имеет долгую историю, в течение которой этот термин применялся в различных интерпретациях для разных целей. В настоящее время роль конструктивного использования проектного пространства и его моделей неуклонно расширяется. В число основных причин такой тенденции входит чрезвычайно-низкая степень успешности проектирования систем с программным обеспечением, что подтверждается уже более 20 лет исследованийскими отчётам корпорации Standish Group [Chaos, 2018].

Многолетние и многочисленные попытки повысить успешность (на текущий момент времени степень успешности не превышает 40%) незначительно изменили положение дел, но привели к необходимости конструктивного учёта социологических, психологических и организационно-управленческих факторов проектной деятельности, проявляющих своё воздействие на проект в ситуативном пространственно-временном контексте. В таком контексте, наиболее общей формой учёта пространства является ис-

пользование в проектировании его метафорической семантики, в основе которой лежит богатейший опыт взаимодействия человека с окружающей его средой.

Употребление явной ссылки на пространство или активизация такой ссылки неявно открывают включение составляющих этого опыта в процесс проектирования, по крайней мере в контекст действий проектировщиков. Вот почему такие включения и эффекты от их воздействия на процесс проектирования исследуют и переводят на уровень конструктивных (модельных) представлений пространства.

Практически во всех решениях по моделированию пространства проектирования их авторы называют модели «концептуальным пространством». Среди решений, родственных описанному ниже, отметим:

- 1) решения, связанные с онтологической версией «концептуального пространства как геометрии мысли», специфику которых определяет публикация [Gärdenfors et al., 2000];
- 2) модели, реализующие подход “Design Space Analysis” (DSA), особенности которого раскрыты в [MacLean et al., 1991], где *CS* представляется деревьями «Вопрос, Выбор, Критерии» (Questions, Options, and Criteria);
- 3) модели, в основу которых положены отображения “Function-Behavior-Structure” с преобразованиями в пространствах «Реальный Мир», «Интерпретируемый Мир» и «Ожидаемый Мир», динамика которых достаточно полно детализирована в публикации [Al-Fedaghi, 2016];
- 4) списковая модель *CS*, ориентированная на оперативное документирование потенциальных возможностей и ограничений [Biskjaer et al., 2014], управляющих выбором подходящих проектных решений.

В большинстве исследованных моделей *CS* особое внимание уделяется динамике их построения, которое осуществляется параллельно с другими действиями проектировщиков.

2. Отображение составляющих пространства проектирования на семантическую память вопросно-ответного типа

К версии концептуального пространства $CS(t)$, представляемой в статье, привели исследования оперативных взаимодействий проектировщика с опытом в процессах решения задач на концептуальном этапе проектирования АС. Для управляемого доступа к опыту были выбраны вопросно-ответные рассуждения (*QA*-рассуждения), что привело к решению об отображении основных сущностей пространства проектирования S на семантическую память вопросно-ответного типа. Обобщённая схема таких отображений приведена на рис. 1.



Рис. 1. Отображение пространства S на семантическую память

На схеме показано, что в результате отображения R^{QA} основные сущности (операционного) пространства OS , в которыми взаимодействует команда проектировщиков K , находят свое модельное представление в вопросно-ответной памяти (QA -памяти) инструментария $WIQA$. Такое отображение можно описать следующим выражением:

$$OS(P, K, ED, EU, S(t), \dots, X, t) \rightarrow CS(K^{QA}(t), E^{QA}(t), P^{QA}(t), S^{QA}(t), \dots, X^{QA}(t)),$$

где X указывает на любую (не показанную на рисунке, но важную) сущность, а другие символические обозначения соответствуют именам, использованным на рис. 1. Отметим дополнительно, что результаты отображения R^{QA} являются динамическими объектами, которые загружены в QA -память на текущий момент времени, а вернее, заполняют концептуальное пространство $CS(t)$ в текущей точке жизненного цикла системы $S(t)$.

Специфику отображения R^{QA} определяет унифицированное представление сущностей в семантической памяти в виде вопросно-ответных сетей (QA -сетей), каждая из которых (или её фрагмент) регистрирует каждую спецификацию сущности (или её составляющей) в паре ячеек памяти, настроенных на представления вопроса (о спецификации) и ответа (о её текущем значении). Такая форма моделирования сущностей и её потенциал детально раскрыты в многочисленных публикациях автора статьи, в частности в монографии [Sosnin, 2018a]. В этой статье отметим то, что важнейшим атрибутом моделей «вопросов» и «ответов», регистрируемых в ячейках семантической памяти, является их вербальное описание, содержащее «следы» взаимодействия с опытом. Отметим и то, что с каждым узлом сети или их целостной осмысленной комбинацией в QA -памяти связывается простой или составной QA -объект, который доступен проектировщикам как визуально, так и программно.

Формирование и использование QA -объектов и их сетей началось около 15 лет назад с отображения на семантическую память дерева задач проекта и команды проектировщиков, что позволило распределять задачи между членами коллектива, строить концептуальные решения задач, отслеживать состояния процесса решения и управлять процессом концептуального проектирования.

Шаг за шагом ответственность отображения R^{QA} расширялась на другие процессы проектирования, с учётом автоматизации действий проектировщиков, что отражено на рис. 2.

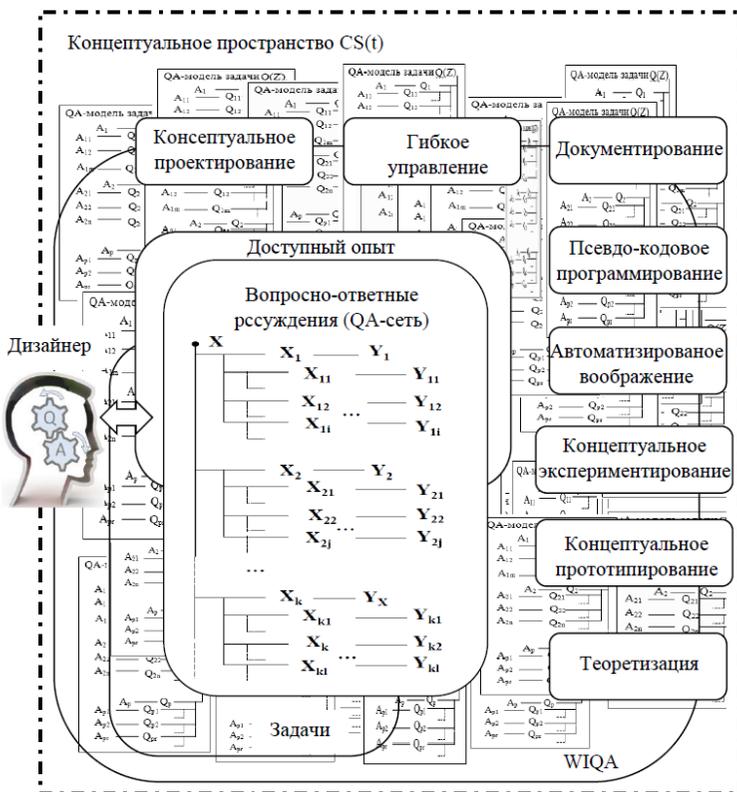


Рис. 2. Вопросно-ответные сети

В основе активностей проектировщика, представленных на схеме, лежит формирование и использование визуальное дерево узлов, любой из которых имеет X или Y -тип, интерпретируемый как «вопрос» или «ответ»,

объединенные в QA -сеть за счёт общих атрибутов. В частности, проектировщики могут создавать и взаимодействовать со следующими типами узлов: Q – вопрос и A – ответ в QA -рассуждении; G – команда дизайнеров и M – член группы; R – выполняемая роль и C – компетенция; D – имя данных, а V – его значение и т.д. В текущем состоянии процесса проектирования построенные QA -сети переплетаются, образуя искусственную среду, использование которой облегчает включение ряда положительных эффектов в процесс проектирования.

Практически на всех этапах освоения QA -сетей, указанных на рис. 2, понятия «операционного пространства» и «концептуального пространства» использовались метафорически, но даже такая их интерпретация позволила усовершенствовать механизмы человеко-компьютерного взаимодействия в среде WIQA за счёт управляемого взаимодействия с доступным опытом. В конце 2017 года было решено конструктивно определить и специфицировать концептуально пространство, положив в основу интеграции QA -сетей системный подход (рис. 3).

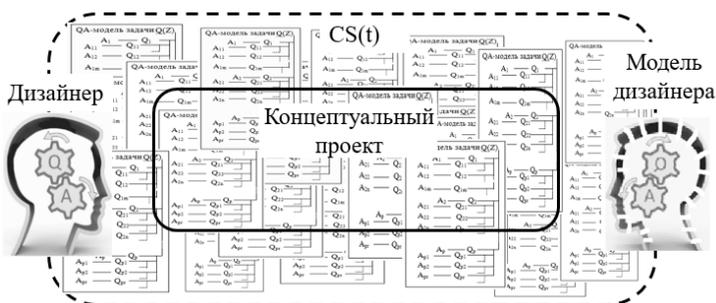


Рис. 3. Место и роль $CS(t)$ в создании концептуального проекта

Схема подчеркивает, что концептуальный проект $CP(t)$ имеет представление, которое находится в $CS(t)$, причём как $CP(t)$, так и $CS(t)$ объективируются семантической памяти в текущем состоянии их QA -сетей. В соответствии с системным подходом $CP(t)$ представляет собой систему, расположенную в среде $CS(t)$. Кроме того, $CP(t)$ в своем текущем состоянии состоит из компонентов, которые были извлечены из $CS(t)$ и обработаны необходимым образом.

В описываемой версии модели $CS(t)$ проектировщики в конкретном проекте начинают создавать это пространство с «пустого» состояния, параллельно с процессом решения проектных задач, а вернее, в рамках этого процесса и согласованно с другими действиями процесса. Когда в этом возникает необходимость проектировщики взаимодействуют с составляющими

$CS(t)$, учитывая закономерности пространства, в первую очередь причинно-следственные закономерности. В этом плане пространство $CS(t)$, при его качественном построении, обладает контролирующим потенциалом, поскольку оно позволяет оценивать не только физическую реализуемость принимаемых проектных решений, но и их концептуально-алгоритмическую реализуемость.

Другими словами, формирование и использование $CS(t)$ «вплетается» в процесс концептуального решения проектных задач, осуществляемый в инструментально-моделирующей среде WIQA в условиях активного использования доступного опыта, его аккумуляции и накопления в Базе опыта, основными компонентами которой являются База прецедентов и Онтология проекта [Sosnin, 2018b]. Взаимодействуя с $CS(t)$ проектировщики по ходу решения задач создают и используют полезные им модели (рис. 4), среди которых особое место занимают те, которые откладываются в Базе прецедентов и Онтологии проекта как единицы повторного (и проверенного) использования.

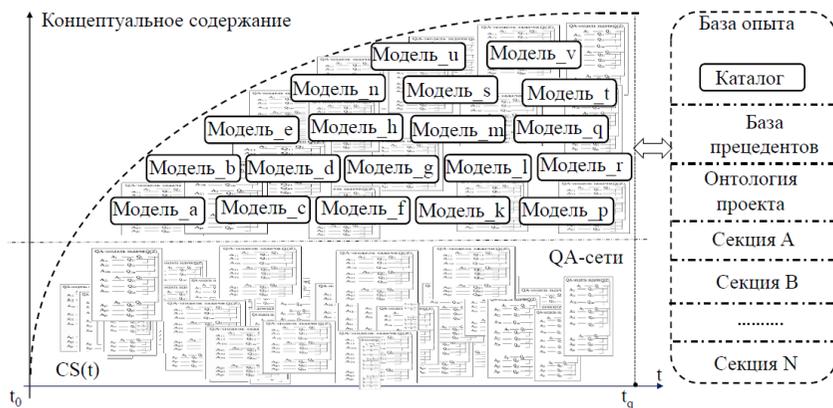


Рис. 4. Жизненный цикл формирования $CS(t)$

По этой причине, Базу опыта с её составляющими, локализованными в QA -памяти, логично рассматривать как рафинированную область в пространстве $CS(t)$. Именно по отмеченным особенностям $CS(t)$ оно квалифицируется как «ориентированное на опыт».

Представленная модель пространства $CS(t)$ открыла полезный подход к его теоретизации, которая согласована с теоретизацией проекта $CP(t)$, извлекаемого из этого пространства. Учитывая организационно-поведенческий характер проектирования АС, для теоретизации выбраны механизмы

Обоснованных Теорий (Grounded Theories), с применениями которых в программной инженерии, связывают большие надежды [Stol et al., 2016]. Для рассматриваемой модели пространства, разработана модификация такой теоретизации, позволяющая строить и использовать «содержательно-эволюционные теории проекта» $Th^P(t)$ с фазовой структурой, представленной на рис. 5 и детально описанной в [Sosnin, 2018b]. В основе теоретизации лежит извлечение фактов, регистрирующих следы взаимодействия с опытом в процессе решения проектных задач. Такие факты откладываются в до-теоретической фазе $Th^B(t)$ теории $Th^P(t)$ для построения других её фаз.

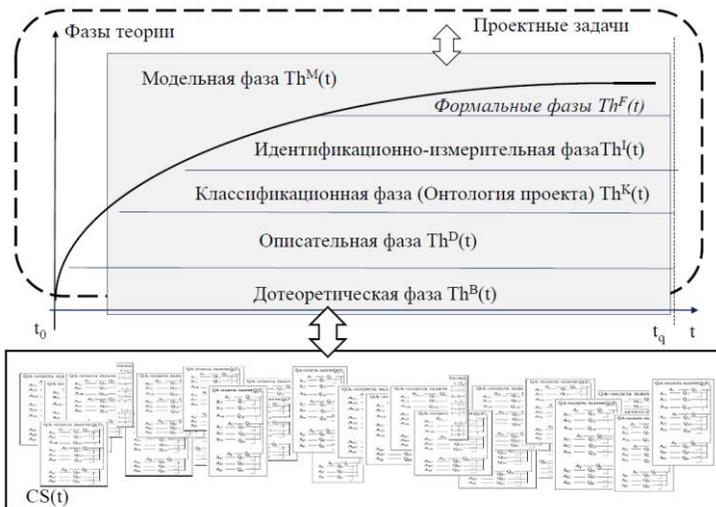


Рис. 5. Содержательно-эволюционная теория проекта

В результате обработки фактов до-теоретической фазы, проектировщики строят и оперативно используют основные теоретические конструкты описательной фазы, формируя параллельно содержимое Онтологии проекта. Построения сопровождаются их сопоставлением с реальностью проектирования, что регистрируется в содержимом идентификационно-измерительной фазы. При необходимости в состав теории включаются подходящие фрагменты формальных теорий. Детали формирования фаз раскрыты в публикации [Sosnin, 2018b].

Заклучение

Представленная версия пространства $CS(t)$, состоящая из связной совокупности QA -сетей локализованных в семантической памяти, вводит в процессы решения проектных задач ряд полезных эффектов, обусловленных тем, что каждая сеть моделирует соответствующую сущность с позиций взаимодействия проектировщиков с доступным опытом. Очень полезно то, что $CS(t)$ образует конструктивный контекст, способствующий рациональному выбору ограничений и требований для альтернативных (конкурирующих) решений. Кроме того, пространство и его теоретизация открывают возможности для контролируемого использования лексики проекта, для оценок и проверок проектных решений на соответствие закономерностям $CS(t)$, а также на их физическую и концептуально-алгоритмическую реализуемость.

Список литературы

- [Al-Fedaghi, 2016] Al-Fedaghi S. Function-Behavior-Structure Model of Design: An Alternative Approach // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2016. No. 7 (7).
- [Biskjaer et al., 2014] Biskjaer M.M., Dalsgaard P., Halskov K. A constraint-based understanding of design spaces // Proc. of the 2014 conference on Designing interactive systems, ACM, NY, USA. 2014.
- [Chaos, 2018] Chaos reports 1994-2016. – <http://www.standishgroup.com>.
- [Clarke et al., 2012] Clarke P. and O'Connor R.V. The situational factors that affect the software development process: Towards a comprehensive reference framework, Journal of Information Software and Technology. 2012. No. 54(5).
- [Gärdenfors et al., 2000] Gärdenfors P. Conceptual Spaces –The Geometry of Thought, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 2000.
- [MacLean et al., 1991] MacLean A., Young R.M., Bellotti V.M.E., Moran T.P. Questions, Options, and Criteria: Elements of Design Space Analysis // Human-Computer Interaction, No. 6, (3, 4): Design Rationale. 1991.
- [Sosnin, 2018a] Experience-Based Human-Computer Interactions: Emerging Research and Opportunities, IGI-Global. 2017.
- [Sosnin, 2018b] Sosnin P. Substantially Evolutionary Theorizing in Designing the Software-Intensive Systems // Information. 2018. No. 9(4).
- [Stol et al., 2016] Stol K.J., Ralph P., Fitzgera B. Grounded Theory in Software Engineering Research: A Critical Review and Guidelines // Proc. of the 38th International Conference on Software Engineering. 2016.

Список авторов

Алехин Р.В.	222	Лейба С.Н.	139
Бодрина Н.И.	53	Луферов В.С.	181
Боковой А.В.	165	Мальков А.А.	230
Брынза А.А.	174	Махалова Т.П.	19
Бурдо Г.Б.	253	Московский А.Д.	27
Варшавский П.Р.	222	Морозова Е.Ф.	35
Ветров А.Н.	230	Мошкина И.А.	3
Войцицкая А.С.	181	Наполи А.	19
Воробьев А.Б.	96	Нгуен Зуй Тхань	35
Гаврилов Д.А.	188	Павлов А.В.	79
Гладков Л.А.	139	Палюх Б.В.	230
Гладкова Н.В.	139	Панченко М.В.	157
Дьяков И.Ф.	3	Поляков В.М.	157
Емельянова И.И.	230	Попов С.Е.	12
Замараев Р.Ю.	12	Ройзензон Г.В.	245
Зернов М.М.	105	Романов А.А.	3
Клещёв А.С.	114	Семенов Н.А.	253
Кожевников А.В.	222	Сидоров К.В.	44, 53
Корлякова М.О.	174	Синюк В.Г.	157
Коршунова К.П.	196	Сметанин Ю.М.	131
Крылов А.К.	62	Соснин П.И.	260
Кузнецов С.О.	19	Тимченко В.А.	114
Кузнецова Ю.М.	71	Федулов Я.А.	181
Куливец С.Г.	205	Филатова Н.Н.	44, 53
Кулик Б.А.	123	Фоминых И.Б.	96
Куксина Е.В.	53	Фридман А.Я.	123
Курбатов С.С.	96	Чудова Н.В.	88
Куриленко И.Е.	238	Шемаев П.Д.	53
Лебедев Б.К.	148	Эгов Е.Н.	3
Лебедев В.Б.	148	Яковлев К.С.	165
Лебедев О.Б.	148	Яшин Д.В.	213

**АННОТАЦИИ СТАТЕЙ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ В СБОРНИКЕ ТРУДОВ КИИ-2018
ИЗДАТЕЛЬСТВОМ SPRINGER**

Секция 1

**ИНЖЕНЕРИЯ ЗНАНИЙ В ПОСТРОЕНИИ ЭКСПЕРТНЫХ
СИСТЕМ ПО НАСЛЕДСТВЕННЫМ БОЛЕЗНЯМ**

Н.А. Благодосклонов (*nblagosklonov@gmail.com*)

Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН, Москва

Н.С. Демикова (*ns_d@rambler.ru*)

Российская медицинская академия
непрерывного профессионального образования, Москва

Б.А. Кобринский (*kba_05@mail.ru*)

Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН, Москва

Рассматривается извлечение медицинских знаний для диагностики редких наследственных заболеваний. Особенностью предлагаемого подхода является сочетание экспертных оценок вероятности наличия (присутствия) признаков с тремя взаимодополняющими факторами уверенности – для времени манифестации, выраженности и частоты встречаемости признаков в разных возрастных диапазонах. Предварительно, на основе лингвистического анализа литературных источников, формируются текстологические карты, используемые экспертами и когнитологом.

Ключевые слова: инженерия знаний, факторы уверенности, лингвистический анализ, текстологические карты, наследственные болезни, орфанные болезни.

ОНТОЛОГИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОСТРЫХ И ХРОНИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

В.В. Грибова (*gribova@iacp.dvo.ru*)

Д.Б. Окунь (*okdm@iacp.dvo.ru*)

М.В. Петряева (*margaret@iacp.dvo.ru*)

Е.А. Шалфеева (*shalf@iacp.dvo.ru*)

Институт автоматики и процессов управления
ДВО РАН, Владивосток

Представлена онтология дифференциальной диагностики заболеваний, учитывающую динамику значений симптомов и позволяющая формализовать любое заболевание как непрерывно развивающийся внутренний процесс. Работа может быть полезна разработчикам систем медицинской диагностики и специалистам по теории и практическому применению онтологий.

Ключевые слова: онтология, дифференциальная диагностика, заболевание, признаки больного, система поддержки принятия решений

РЕАЛИЗАЦИЯ ПАТТЕРНОВ СОДЕРЖАНИЯ В МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ОНТОЛОГИЙ НАУЧНЫХ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Ю.А. Загорулько (*zagor@iis.nsk.su*)

О.И. Боровикова (*olesya@iis.nsk.su*)

Г.Б. Загорулько (*gal@iis.nsk.su*)

Институт систем информатики имени А.П. Ершова
СО РАН, Новосибирск

Рассматривается подход к разработке и реализации паттернов онтологического проектирования, применяемых при построении онтологий научных предметных областей. Использование таких паттернов позволяет, с одной стороны, обеспечить единообразное и согласованное представление всех сущностей разрабатываемой онтологии, с другой – сэкономить ресурсы и избежать типичных ошибок онтологического моделирования.

Ключевые слова: онтология, паттерны онтологического проектирования, паттерны содержания, методология разработки онтологий научных предметных областей

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

Г.В. Рыбина (*galina@ailab.mephi.ru*)

Ю.М. Блохин

Л.С. Таракчян

Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», Москва

Обсуждаются результаты дальнейшего развития базовых компонентов интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, предназначенных для автоматизации и интеллектуализации процессов построения интегрированных экспертных систем (ИЭС) на основе задачно-ориентированной методологии. Акцент делается на особенностях реализации интеллектуального планировщика в контексте постановки задачи интеллектуального планирования процессов прототипирования ИЭС и предложенных подходов к ее решению.

Ключевые слова: интегрированные экспертные системы, задачно-ориентированная методология, интеллектуальная программная среда, интеллектуальное планирование, типовая проектная процедура, повторно используемые компоненты, модель процессов прототипирования.

Секция 2

еLIAN: УЛУЧШЕННЫЙ АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ НА ПЛОСКОСТИ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

А.А. Андрейчук (*andreychuk@mail.com*)
Российский университет дружбы народов, Москва

Н.А. Соболева (*nasoboleva@edu.hse.ru*)
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва

К.С. Яковлев (*kyakovlev@hse.ru*)
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН, Москва
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва

Рассматривается задача планирования траектории на плоскости с учетом геометрических ограничений, а именно когда запрещено изменение направления движения более, чем на заданный угол. Учет подобных ограничений приводит к заметному увеличению пространства поиска по сравнению с базовой постановкой задачи (без ограничений). Одним из способов сократить размер этого пространства является введение фиксированной длины секции траектории и исключение из рассмотрения элементов, не соответствующих введенному геометрическому ограничению. Это приводит к неполноте алгоритма, а также к его зависимости от выбранного значения длины секции – входного параметра алгоритма. Представлен метод, частично устраняющий последний недостаток за счет автоматического изменения значения параметра в ходе работы алгоритма. Применение этого положительно сказывается на эффективности алгоритма планирования, что подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: планирование траектории, ГРД, LIAN, еLIAN.

Секция 3

АРХИТЕКТУРА КАЧЕСТВЕННОГО КОГНИТИВНОГО АГЕНТА

А.А. Кулинич (*kulinich@ipu.ru*)

Институт проблем управления РАН, Москва

Национальный исследовательский центр

«Курчатовский институт», Москва

Предложена архитектура качественного когнитивного агента, включающая: модель представления знаний, подсистемы планирования поведения и кооперации агентов. Модель знаний агента представлена в виде качественного концептуального каркаса, структурирующего среду функционирования агентов на подпространства, определяющие классы возможных состояний. В подсистеме планирования поведения агентов выбор действия агента основан на решении обратной задачи в логико-лингвистических уравнениях динамики агентов. Подсистема кооперации агентов основана на критерии взаимной полезности агентов. Предложенная архитектура качественного когнитивного агента позволяет реализовать и исследовать разнообразные принципы командного поведения множества агентов с BDI-архитектурой с меньшей трудоемкостью при сохранении основных свойств интеллектуальных агентов.

Ключевые слова: когнитивная архитектура, BDI архитектура, концептуальный каркас, планирование поведения, кооперация агентов

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ АГРЕГИРОВАНИЕ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕКТОВ В ГРУППОВОМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОМ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ

А.Б. Петровский (*pab@isa.ru*)

Федеральный исследовательский центр

«Информатика и управление» РАН, Москва

Представлена многометодная технология ПАКС-М для выбора объектов со многими числовыми и/или вербальными признаками. Технология обеспечивает агрегирование признаков объектов путём снижения размерности признакового пространства; построения иерархических систем составных критериев и интегрального показателя качества; упорядочения и/или классификации объектов несколькими методами принятия решений. Технология была применена для решения трудных задач многокритериального принятия решений, в частности, группового многокритериального выбора перспективного вычислительного комплекса.

Ключевые слова: многокритериальное принятие решений, многопризнаковые объекты, признаковое пространство, снижение размерности, иерархическое агрегирование признаков, составные критерии, интегральный показатель

Секция 4

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ В СЕТЯХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

С.Г. Антипов (*antisergey@gmail.com*)

В.Н. Вагин (*vagin@appmat.ru*)

О.Л. Моросин (*omorsik@gmail.com*)

М.В. Фомина (*m_fomina2000@mail.ru*)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва

Рассматривается возможность применения методов машинного обучения в задачах информационной безопасности: методы формирования индуктивных понятий для анализа сетевого трафика, а также методы аргументации для автоматизированной поддержки решений безопасности. Предлагаемые подходы позволяют дать количественные оценки качества рекомендаций, разработанных системой, помогая тем самым решить важную задачу – задачу выбора способа реагирования на подозрительную деятельность в системе. Даны примеры обработки опасных ситуаций, возникающих в системе.

Ключевые слова: информационная безопасность, аргументация, разрешение противоречий, временные ряды, индуктивное формирование понятий

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ОСНОВАННОЕ НА ОПЕРАЦИИ СХОДСТВА

Д.В. Виноградов (*krrguest@yandex.ru*)

Федеральный исследовательский центр

«Информатика и управление» РАН, Москва

Описана парадигма машинного обучения, использующая технику Анализа формальных понятий. Алгоритм спаривающей цепи Маркова порождает подмножество сходств. Представлен метод ускорения вычислений путем остановки цепи Маркова, если длина текущей траектории превосходит сумму длин предыдущих запусков. Сходства служат гипотетическими причинами целевого свойства. Целевое свойство тестовых примеров предсказывается с помощью этих гипотез. Предъявлена нижняя граница на число гипотез, нужных для предсказания всех важных тестовых примеров с заданным доверительным уровнем.

Ключевые слова: спаривающая цепь Маркова, остановленная цепь Маркова, индукция, предсказание

Секция 5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ СЛОВСОЧЕТАНИЙ

Лукашевич Н.В. (*louk_nat@mail.ru*)
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, Москва
Татарская академия наук, Казань

Пархоменко Е.А. (*parkat13@yandex.ru*)
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, Москва

Рассматривается задача извлечения многословных выражений для пополнения тезауруса русского языка РуТез, содержащего различные типы устойчивых словосочетаний, в том числе идиомы, многословные термины и их варианты, глагольные конструкции и другие. Исследуются несколько признаков для словосочетаний и их компонентов, основанных на распределенном представлении языковых единиц (дистрибутивные признаки), оценивается их вклад в поиск устойчивых словосочетаний различных типов, по сравнению с традиционными ассоциативными и контекстными мерами. Определено, что один из дистрибутивных признаков имеет достаточно высокие результаты, особенно при использовании в сочетании с другими мерами.

Ключевые слова: тезаурус, устойчивое словосочетание, распределенное представление

Секция 6

ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ПРОСТРАНСТВА ПРИЗНАКОВ ИЗ ДЕРЕВА ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ЗАДАЧИ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

П.В. Дударин (*p.dudarin@ulstu.ru*)

М.К. Самохвалов (*sam@ulstu.ru*)

Н.Г. Ярушкина (*jng@ulstu.ru*)

Ульяновский государственный технический университет,

Ульяновск

В большинстве алгоритмов кластеризации, использующих деревья признаков, узлы дерева представлены векторами n -мерного пространства. Для случая не векторной формы задания узлов дерева требуется специальное преобразование. Способ построения пространства признаков определяет объем и качество информации, заключенной в полученных векторных представлениях объектов кластеризации, поэтому это важный этап алгоритма кластеризации. В данной работе представлен подход к построению пространства признаков из дерева признаков для задачи кластеризации. Данный подход решает задачу сохранения информации об исходной иерархии, а также задачу снижения размерности пространства признаков.

Ключевые слова: кластеризация, деревья признаков, построение пространства признаков

Секция 7

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАССУЖДЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ЗНАКОВОЙ КАРТИНЕ МИРА

Г.А. Киселёв (*kiselev@isa.ru*)

Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН, Москва

А.К. Ковалёв (*akkovalev@hse.ru*)

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва

А.И. Панов (*pan@isa.ru*)

Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН, Москва

Рассматривается взаимодействие методов моделирования рассуждений и планирования поведения в знаковой картине мира для задачи синтеза иерархического плана перемещения. Такое взаимодействие представлено с помощью формализма интеллектуальных динамических систем, основанных на правилах, в виде поочередной работы функций перехода (этапа плана) и функций замыкания (этапа рассуждения). Особое внимание уделяется способам представления информации о пространственных отношениях объектов на карте местности и методам организации псевдофизических рассуждений в знаковой картине мира. В работе представлен ряд теоретико-модельных экспериментов по перемещению когнитивного агента в различных средах и пополнению описания состояния с помощью одного из вариантов логического вывода.

Ключевые слова: знак, знаковая картина мира, планирование перемещения, моделирование рассуждений, псевдофизические логики

Секция 8

РАСШИРЕННЫЕ ШАГОВЫЕ ТЕОРИИ АКТИВНОЙ ЛОГИКИ: ПАРАНЕПРОТИВОРЕЧИВАЯ СЕМАНТИКА

М.М. Виньков (*vinkovmm@mail.ru*)

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва

И.Б. Фоминых (*igborfomin@mail.ru*)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва

Активная Логика (АЛ) является концептуальной системой, принципам которой удовлетворяют формализмы рассуждений, дающие возможность для соотнесения их результатов с моментами времени и толерантных к противоречиям. В настоящее время толерантность к противоречиям получила теоретическое обоснование только в работах авторов данного доклада и относится к так называемому формализму шаговых теорий, объединяющему в себе принципы АЛ и логического программирования. В данной работе эти результаты получают развитие для случая шаговых теорий с двумя видами отрицания. В этом случае достигаются лучшие выразительные возможности и более полное соответствие принципам логического программирования по сравнению с другими вариантами формализма шаговых теорий. Показано, что предлагаемая аргументационная семантика шаговых теорий с двумя видами отрицания паранепротиворечива в том смысле, что наличие логического противоречий в этих теориях не приводит к их разрушению.

Ключевые слова: активная логика, рассуждения во времени, шаговые теории, паранепротиворечивая семантика.

Секция 9

ОТБОР ПРИЗНАКОВ И ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЕТКОГО КЛАССИФИКАТОРА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА «КУКУШКИН ПОИСК»

К.С. Сарин (*sks@security.tomsk.ru*)

И.А. Ходашинский (*hodashn@rambler.ru*)

А.С. Слезкин (*slezkin.tema@mail.ru*)

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники, Томск

Предложен метод для построения нечетких классификаторов, основанный на метаэвристике «кукушкин поиск». Предлагаются алгоритмы отбора информативных признаков и оптимизации параметров нечеткого классификатора, использующие данную метаэвристику. Проведены эксперименты на реальных наборах данных по построению нечетких классификаторов.

Ключевые слова: анализ данных, классификация, отбор признаков

НЕЙРО-НЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО ЗНАЧЕНИЯ ИСТИННОСТИ

В.Г. Синюк (*vgsinuk@mail.ru*)

С.В. Кулабухов (*qlba@ya.ru*)

Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Описываются нейро-нечеткие системы, в которых вывод осуществляется продукционными системами логического типа на основе нечеткого значения истинности. Для обучения таких систем рассматривается применение эволюционной стратегии (μ , λ). Приводятся результаты вычислительного эксперимента, состоящего в аппроксимации функциональной зависимости нейро-нечеткой системой, обучением и оценкой качества.

Ключевые слова: нечеткие системы, нейро-нечеткие системы, эволюционные стратегии

Секция 10

HYBRID NEURAL NETWORKS FOR TIME SERIES FORECASTING

A. Averkin (*averkin2003@inbox.ru*)

FRC “Informatics and Computer Science” of RAS, Moscow

S. Yarushev (*sergey.yarushev@icloud.com*)

Plekhanov Russian University of Economics, Moscow

This paper presents research in the field for hybrid neural networks for time series forecasting. We present a detailed review of the latest researches in this field. The paper includes detailed review of studies what compared the performance of multiple regression methods and neural networks. It is also consider a hybrid method of time series prediction based on ANFIS. In addition, showed the results of time series forecasting based on ANFIS model and compared with results of forecasting based on multiple regression.

Keywords: time series forecasting, neural networks, ANFIS, time series prediction

МЕТОД АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ЗРИТЕЛЬНЫХ СЦЕН НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В.В. Борисов (*vbor67@mail.ru*)

О.И. Гаранин (*hedgehog91@mail.ru*)

Филиал Национального исследовательского университета
«МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск

Предлагается метод анализа динамических зрительных сцен на основе модели визуального представления объекта. Данный метод позволяет детектировать изображения и выделять «глубокие признаки» детекции объекта за один прямой проход сверточной нейронной сети, повысить точность построения треков по сравнению с другими онлайн-методами и выполнить анализ динамических зрительных сцен режиме реального времени.

Ключевые слова: сопровождение на основе детектирования, многомасштабная модель детектирования, сверточная нейронная сеть

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЁРТЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ПАТОЛОГИЙ ЗРЕНИЯ

А.П. Еремеев (*eremeev@appmat.ru*)

С.А. Ивлиев (*siriusfrk@gmail.com*)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва

Рассматривается применение аппарата свёрточных нейронных сетей для анализа нестационарных сигналов на примере электроретинограмм для диагностики сложных патологий зрения. Предлагается метод на основе кластеризации данных, который позволяет извлекать знания из данных биофизических исследований в ситуациях, когда однозначный диагноз на основе имеющихся данных поставить невозможно, либо наличествует несколько заболеваний одновременно.

Ключевые слова: нестационарные сигналы, свёрточные нейронные сети, кластеризация, медицинская диагностика

РЕСУРСНАЯ СЕТЬ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ЁМКОСТЬ ВЕРШИН: ДВУХПороговая ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОТОКОВАЯ МОДЕЛЬ

Л.Ю. Жиликова (*zhilyakova.ludmila@gmail.com*)

Институт проблем управления РАН, Москва

Описывается двухпороговая потоковая модель, основанная на модели ресурсной сети – неклассической модели рассеяния, в которой вершины ориентированного взвешенного графа обмениваются однородным ресурсом в дискретном времени. В такой модели существует пороговое значение суммарного ресурса, зависящее от топологии сети и весов ребер, по разные стороны от которого сеть демонстрирует различное поведение. При «большом ресурсе» некоторое подмножество вершин притягивает к себе все излишки ресурса. Такие вершины названы аттракторами. В модели, описанной в настоящей работе, аттракторы имеют ограничения на ёмкость. Таким образом, оставшиеся излишки ресурса накапливаются в новом множестве вершин, названных вторичными аттракторами. При этом, в сети появляется второе пороговое значение суммарного ресурса. Показано, что процесс распределения ресурса, превосходящего второе пороговое значение, описывается неоднородной цепью Маркова. Свойство аттрактивности вершин может использоваться как новая целочисленная мера центральности в сетях с произвольной семантикой.

Ключевые слова: графовые динамические модели, пороговые модели, потоки в сетях, неоднородные цепи Маркова, ресурсные сети, показатель центральности

ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННЫХ МУЛЬТИТРАНСМИТТЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ

О.П. Кузнецов (*olpkuz@yandex.ru*)

Н.И. Базенков (*n.bazenkov@yandex.ru*)

Б.А. Болдышев

Л.Ю. Жилиякова (*zhilyakova.ludmila@gmail.com*)

С.Г. Куливец (*skulivec@yandex.ru*)

Институт проблем управления РАН, Москва

И.А. Чистопольский

Институт биологии развития РАН, Москва

Предлагается асинхронная дискретная модель химических несинаптических взаимодействий между нейронами, которая является существенным расширением модели, изложенной в [Базенков, 2017; Bazenkov, 2018]. Нейроны взаимодействуют, выбрасывая нейротрансмиттеры в общее внеклеточное пространство (ВКП) и реагируя на них с помощью рецепторов, чувствительных к определенному виду трансммиттеров. Введены скорости изменения мембранного потенциала, которые являются суммой двух скоростей: эндогенной скорости, зависящей от типа нейрона, и экзогенной скорости, зависящей от концентрации трансммиттеров, к которым чувствителен данный нейрон. В статье рассмотрены нейроны трех типов: осцилляторный, тонический и реактивный. Различие эндогенных скоростей у разных нейронов приводит к асинхронности нейронных взаимодействий и к значительной вариабельности длительностей тактов в моделируемых паттернах активности простых нейронных систем. Приведен алгоритм вычисления поведения предложенной модели.

Ключевые слова: асинхронная дискретная модель, гетерогенная нейронная система, внеклеточное пространство, несинаптические взаимодействия, нейротрансмиттеры

Секция 11

ВЫЯВЛЕНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ АКТИВНОСТИ БЫТОВЫХ ПРИБОРОВ

Н.И. Базенков (*n.bazenkov@yandex.ru*)

М.В. Губко

Институт проблем управления РАН, Москва

Предлагается метод, основанный на выявлении пользовательских предпочтений в виде функции полезности. Предложенный алгоритм основан на методе обратного обучения с подкреплением (IRL). Эффективность алгоритма сравнивается с методами машинного обучения и параметрическим байесовским методом. Назначение алгоритма – предсказание действий пользователя на основе истории его предыдущих действий. Как IRL, так и байесовский алгоритм показали сопоставимую эффективность и оба превзошли современные алгоритмы машинного обучения такие как XGBoost, случайный лес решений. Алгоритмы выявления предпочтений хорошо обобщались на данные с характеристиками, отличающимися от обучающей выборки. Подход выявления предпочтений полезен автоматизации умных домов, когда будущие ситуации отличаются от тех, на которых проводилось обучение.

Ключевые слова: выявление предпочтений, умная энергетика, имитационное моделирование пользователя, байесовское обучение, обратное обучение с подкреплением

ОЦЕНКА РИСКОВ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ЛЮДЕЙ И ПОДБОР ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА АРГУМЕНТАЦИОННЫХ РАССУЖДЕНИЙ

О.Г. Григорьев (*oleggpolikvart@yandex.ru*)

А.И. Молодченков (*aim@tesyan.ru*)

Федеральный исследовательский центр

«Информатика и управление» РАН, Москва

Рассматривается метод оценки рисков заболеваний и построения плана профилактических мероприятий для уменьшения этих рисков. Описаны основные компоненты базы знаний системы построения плана профилактических мероприятий. Метод оценки рисков и построения множества гипотез профилактических мероприятий основан на алгоритме аргументационных рассуждений, который адаптирован для решения поставленной задачи. Рекомендации по профилактике основаны на принципах 4П медицины. Текущая версия системы базируется на экспертных знаниях, полученных в результате автоматизированного мониторинга и анализа большого числа публикаций и рекомендаций по данной теме.

Ключевые слова: база знаний, 4П медицина, аргументационные рассуждения, оценка рисков заболеваний, инфаркт, инсульт

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 6. КЛАССИФИКАЦИЯ, РАСПОЗНАВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА

<i>Дьяков И.Ф., Мошкина И.А., Романов А.А., Эгов Е.Н.</i> Извлечение и прогнозирование временных рядов производственных процессов	3
<i>Замараев Р.Ю., Попов С.Е.</i> Автоматическое обнаружение и классификация региональных сейсмических событий	12
<i>Кузнецов С.О., Махалова Т.П., Наполи А.</i> Как улучшить оценку множеств признаков с помощью принципа минимальной длины описания?	19
<i>Московский А.Д.</i> Метод распознавания сцен на основе недоопределенных моделей	27
<i>Нгуен Зуй Тхань, Морозова Е.Ф.</i> построение и управление 3D-моделями лиц человека	35
<i>Сидоров К.В., Филатова Н.Н.</i> Алгоритм укрупнения интервальных признаков в задаче классификации двумерных графических зависимостей биомедицинских сигналов	44

СЕКЦИЯ 7. КОГНИТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

<i>Бодрина Н.И., Куксина Е.В., Сидоров К.В., Филатова Н.Н., Шемаев П.Д.</i> Когнитивные исследования и психологические аспекты искусственного интеллекта	53
<i>Крылов А.К.</i> Механизм внутренней детерминации поведения в системной психофизиологии	62
<i>Кузнецова Ю.М.</i> Особенности приобретения знаний в разных картинах мира	71
<i>Павлов А.В.</i> Моделирование квантово-подобных когнитивных феноменов на алгебре фурье-дуальных операций: феномен «Линда»	79
<i>Чудова Н.В.</i> Психологические аспекты планирования в знаковой картине мира	88

СЕКЦИЯ 8. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССУЖДЕНИЙ И НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ЛОГИКИ

<i>Воробьев А.Б., Курбатов С.С., Фоминых И.Б.</i> Пойа-метод: компьютерное воплощение методологии Д. Пойа	96
---	----

<i>Зернов М.М.</i> Надстройка времени над ситуационно-событийным исчислением	105
<i>Клещев А.С., Тимченко В.А.</i> Концепция оболочки для интерактивных систем верификации интуитивных математических доказательств	114
<i>Кулик Б.А., Фридман А.Я.</i> Пресуппозиции в рассуждениях и их связь с аномалиями баз знаний	123
<i>Сметанин Ю.М.</i> Приложения неклассической пропозициональной логики в задачах верификации логического следования	131

СЕКЦИЯ 9. НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ И МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

<i>Гладков Л.А., Гладкова Н.В., Лейба С.Н.</i> Разработка и исследование гибридного алгоритма решения оптимизационных задач проектирования	139
<i>Лебедев Б.К., Лебедев В.Б., Лебедев О.Б.</i> Гибридный метод стохастической оптимизации на основе интеграции моделей эволюции и роевого (стадного) поведения животных в аффинных пространствах поиска	148
<i>Синюк В.Г., Поляков В.М., Панченко М.В.</i> Критерии эффективности для анализа методов вывода на основе нечеткого значения истинности в системах со многими нечеткими входами	157

СЕКЦИЯ 10. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МЕТОДЫ И НЕЙРОИНФОРМАТИКА

<i>Боковой А.В., Яковлев К.С.</i> Использование сверточных нейронных сетей в задаче одновременного картирования и локализации по видеопотоку ..	165
<i>Брында А.А., Корлякова М.О.</i> Анализ эффективности фрактальной субдискретизации сверточных нейронных сетей	174
<i>Войцицкая А.С., Луферов В.С., Федулов Я.А.</i> Метод и информационно-измерительная система для получения данных о массе жидких веществ с применением искусственных нейронных сетей	181
<i>Гаврилов Д.А.</i> Нейросетевой алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения объекта интереса в видеосигнале	188
<i>Коришнуова К.П.</i> Нейросетевая модель автоматического описания изображений на основе состязательного обучения	196
<i>Куливец С.Г.</i> Программная среда для поиска ансамблей и ритмической активности в нейронных сетях	205
<i>Яшин Д.В.</i> Использование нейронной сети для выбора методов прогнозирования временного ряда в гибридной комбинированной модели	213

СЕКЦИЯ 11. ПРИКЛАДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Варшавский П.Р., Алехин Р.В., Кожевников А.В.</i> Разработка прецедентного модуля для идентификации сигналов при акустико-эмиссионном контроле сложных технических объектов	222
<i>Ветров А.Н., Емельянова И.И., Мальков А.А., Палюх Б.В.</i> Оценка неопределенности в экспертной системе эволюционного управления многостадийным технологическим процессом	230
<i>Куриленко И.Е.</i> Применение рассуждений на основе прецедентов для реализации виртуального сотрудника отдела сопровождения программного обеспечения	238
<i>Ройзензон Г.В.</i> Проблемы формализации понятия этики в искусственном интеллекте	245
<i>Семенов Н.А., Бурдо Г.Б.</i> Интеллектуальный анализ маркетинговых данных	253
<i>Соснин П.И.</i> Ориентированные на опыт концептуальные пространства проектирования автоматизированных систем	260
Список авторов	269
Аннотации статей, опубликованные в сборнике трудов КИИ-2018 издательством Springer	270

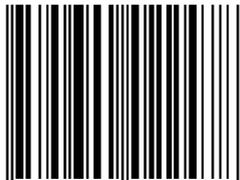
Научное издание

Сборник трудов
XVI Национальной конференции по искусственному интеллекту
с международным участием (КИИ-2018)
Сборник трудов в 2-х томах
Том 2

Подписано в печать 27.08.2018 г.
Формат 60x84¹/₁₆. Тираж 300 экз. Усл. печ. л. 16,68.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20, тел.: 8 (495) 772-95-90 доб. 15285

ISBN 978-5-600-02247-8



9 785600 022478