

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

**Научный журнал Российской академии наук
(издается под руководством Отделения нанотехнологий
и информационных технологий РАН)**

Издается с 1989 года

Журнал выходит ежеквартально

Учредитель:

**Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии наук**

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

академик РАН И. А. Соколов — председатель Редакционного совета

академик РАН Г. И. Савин

академик РАН А. Л. Стемпковский

профессор Ш. Долев (S. Dolev, Beer-Sheva, Israel)

профессор Ю. Кабанов (Yu. Kabanov, Besancon, France)

профессор В. Ротарь (V. Rotar, San-Diego, USA)

профессор М. Финкельштейн (M. Finkelstein, Bloemfontein, South Africa)

профессор В. Хофкирхнер (W. Hofkirchner, Wien, Austria)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

академик РАН И. А. Соколов — главный редактор

проф., д.ф.-м.н. С. Я. Шоргин — заместитель главного редактора

д.т.н. В. Н. Захаров

д.ф.-м.н. В. И. Синицын

проф., д.ф.-м.н. А. И. Зейфман

проф., д.т.н. И. Н. Синицын

проф., д.т.н. В. Д. Ильин

проф., д.ф.-м.н. В. Г. Ушаков

проф., д.т.н. К. К. Колин

д.ф.-м.н. А. К. Горшенин — отв. секретарь

проф., д.ф.-м.н. В. Ю. Королев

к.ф.-м.н. С. А. Христочевский

д.ф.-м.н. Р. В. Разумчик

Редакция

к.ф.-м.н. Е. Н. Арутюнов

С. Н. Стригина

© Федеральный исследовательский центр «Информатика
и управление» Российской академии наук, 2025

Журнал включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI),
интегрированную с Web of Science, и в «Белый список» научных журналов

Журнал входит в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в базу данных CrossRef (систему DOI — Digital Object Identifier),

в базу данных Ulrich's periodicals directory

и в информационную систему «Общероссийский математический портал Math-Net.Ru»

Журнал реферируется в «Реферативном журнале» ВИНИТИ

и в системе Google Scholar

Журнал включен в сформированный Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

<http://www.ipiran.ru/journal/collected>

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 35 № 2 Год 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Комбинированное кодирование в элементах программируемых логических интегральных схем С. Ф. Тюрин, И. А. Васенин, Ю. А. Степченко, Ю. Г. Дьяченко	3
Алгоритм моделирования векторного стохастического процесса посредством его канонического разложения на основе многослойной вейвлет-нейронной сети И. Н. Сеницын, В. И. Сеницын, Э. Р. Корепанов, Т. Д. Конашенкова	17
Об универсальных моделях состояния для задач слежения и навигации беспилотных движущихся объектов И. В. Урюпин	31
Безызыбыточное самосинхронное кодирование: реализация информационного канала Ю. А. Степченко	45
Оценка доступности атмосферной оптической связи в различных субъектах Российской Федерации С. Ю. Казанцев, М. В. Сапожников, Д. Н. Терехин, Ю. Б. Миронов, Б. М. Шабанов	61
Анализ подходов к гибридизации метода рассуждений по прецедентам в системах поддержки принятия врачебных решений С. В. Листопад, А. С. Лучко	81
Метод автоматизированного выявления асимметрии пунктуации в параллельных текстах С. Д. Игнатова, А. А. Гончаров, Н. В. Бунтман	103
Некоторые подходы к управлению мониторингом ситуационной обстановки А. П. Сучков	116
ИСТОРИЯ. ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ. СОБЫТИЯ	
К 90-летию заслуженного деятеля науки Российской Федерации К. К. Колина И. А. Соколов, И. И. Быстров, С. Н. Гринченко, А. А. Зацаринный, И. М. Зацман, В. Н. Захаров, С. В. Козлов	127
Об авторах	132
Правила подготовки рукописей статей	134
Requirements for manuscripts	138

КОМБИНИРОВАННОЕ КОДИРОВАНИЕ В ЭЛЕМЕНТАХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

С. Ф. Тюрин¹, И. А. Васенин², Ю. А. Степченко³, Ю. Г. Дьяченко⁴

Аннотация: Рассматривается комбинированное кодирование переменных логического элемента LUT (Lookup Table) и настроек мультиплексора — коммутатора связей межсоединений (мультиплексора маршрутизации) программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа FPGA (Field-Programmable Gate Array). Предлагаемый метод комбинирования позиционного и унитарного кодирования позволяет снизить временную задержку вычисления логической функции при заданных аппаратных ограничениях либо уменьшить аппаратные затраты коммутатора связей при ограничениях на временную задержку. Описываются модель такого кодирования и метод синтеза соответствующего элемента, приводятся оценки сложности в числе транзисторов и результаты схемотехнического и топологического моделирования. Моделирование подтверждает работоспособность предлагаемого элемента. Анализ показывает эффективность принятого подхода по сложности в числе транзисторов и площади кристалла, временной задержке и потребляемой мощности. Разработанный элемент с комбинированным кодированием позволяет существенно снизить временную задержку при вычислении функций большого числа переменных и затраты конфигурационной памяти межсоединений.

Ключевые слова: элементы ПЛИС (FPGA); LUT; мультиплексор маршрутизации; унитарное и позиционное кодирование

DOI: 10.14357/08696527250201

EDN: NCZKUW

1 Введение

Программируемые логические интегральные схемы — бурно развивающаяся элементная база для проектирования и макетирования цифровой аппаратуры, в том числе в области перспективных вычислительных архитектур [1–3]. Количество логических элементов в ПЛИС, которое в 1980-е гг. составляло десятки и сотни, теперь достигает уже миллионов и десятков миллионов, а число переменных логических функций, реализуемых в одном элементе, начинавшееся с трех–четырех, увеличилось до восьми. Однако при восьми переменных уже

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Пермский государственный национальный исследовательский университет, tyurin@sergey@yandex.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, vasenin.ioann@yandex.ru

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, YStepchenkov@ipiran.ru

⁴Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, diauga@mail.ru

реализуются не все возможные функции [4–6]. Следует ожидать дальнейшего увеличения числа элементов и переменных, что порождает, с одной стороны, проблемы роста временной задержки при вычислении функций, а с другой — повышение аппаратных затрат, в том числе и на коммутацию межсоединений. Впечатляющими темпами совершенствуются китайские ПЛИС [7, 8]. Имеются и отечественные ПЛИС [9], но известные ограничения сдерживают темпы роста их производства. В то же время научные исследования в области ПЛИС, пытающиеся разрешить возникающие проблемы, уже затрагивают не только бинарные, но и троичные варианты логических элементов [10]. Тем не менее пока используются два основных вида бинарного кодирования переменных или связей: позиционное и унитарное, когда активен (равен единице или нулю) только один бит (в англоязычной литературе *unitary code*, *one-hot*, *one-cold*). Другие виды кодов используются в ПЛИС в основном для обеспечения помехоустойчивости при передаче и хранении информации. Например, код Грея, рассмотренный в [11], представляет собой другую последовательность позиционных наборов и не изменяет структуру элемента.

Унитарный способ кодирования характеризуется большими аппаратными затратами при реализации ПЛИС [12–15] в технологии металл–диэлектрик–полупроводник (МДП). Позиционный способ приводит к значительной задержке переключения сигналов в ПЛИС при реализации логических функций от большого числа переменных n из-за n последовательно соединенных МДП-транзисторов в схеме логического элемента ПЛИС. Поэтому разработка способа кодирования логического элемента ПЛИС, оптимального по быстродействию и аппаратным затратам, становится актуальной задачей.

Статья посвящена разработке комбинированного варианта кодирования логического элемента ПЛИС, обеспечивающего наилучшее отношение «аппаратные затраты/задержка». Актуальность этого направления в РФ обусловлена острой необходимостью импортозамещения электронной компонентной базы, в том числе в области ПЛИС.

2 Типовые реализации логического элемента программируемой логической интегральной схемы

В компактной линейной форме выражение для существующего n -LUT с позиционным кодированием имеет вид [16–18]:

$$f(d_0, d_1, \dots, d_{2^n-1}, x_n, \dots, x_2, x_1) = \bigvee_{j=0}^{2^n-1} \left(\left[\bigwedge_{i=1}^n x_i^{1-B(i,j)} \right] \& d_j \right), \quad (1)$$

где $B(i, j) \in \{0, 1\}$ — бинарное представление i -й переменной x_i в j -й конституенте совершенной дизъюнктивной нормальной формы функции f от n переменных, реализуемой логическим элементом; $d_j \in \{0, 1\}$ — конфигурационный бит, значение заданной логической функции в j -й строке таблицы истинности функции f ; $\&$ — конъюнкция; $\vee$ — дизъюнкция.

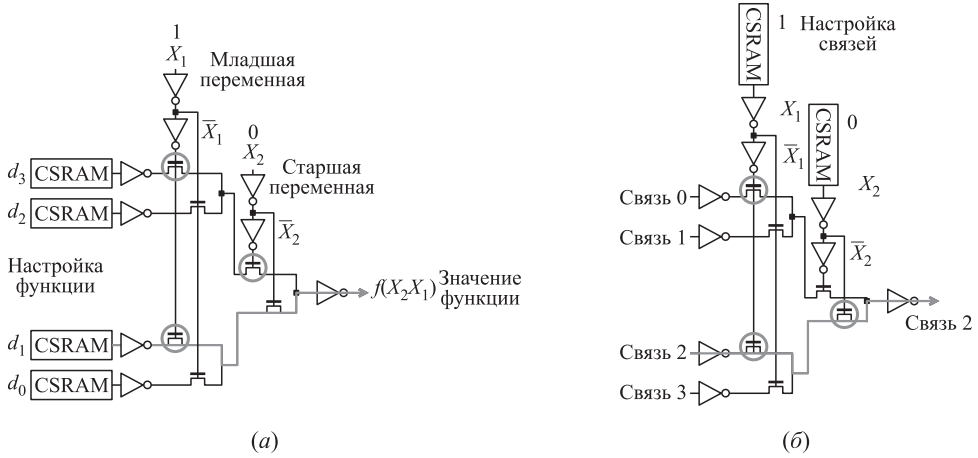


Рис. 1 Существующие элементы: (а) 2-LUT для формирования функции; (б) 2-LUT для коммутации связей (мультиплексор маршрутизации связей)

В (1) набор переменных x_i представляет собой позиционный двоичный код, фиксирующий все элементы соответствующего булеана от $000\dots 0b$ до $111\dots 1b$, в десятичном коде от 0 до $2^n - 1$. Временная задержка формирования значения функции зависит от n , поскольку сигнал настройки проходит не менее чем n МДП-транзисторов. Пример 2-LUT для реализации функций двух переменных x_2 и x_1 показан на рис. 1, а. Здесь CSRAM — конфигурационная статическая оперативная память, в которую записываются требуемые значения функции. При использовании этого элемента (будем его называть так же — LUT) для коммутации межсоединений ПЛИС вместо значений функции d_j подключаются связи q_j , а настройка на одну из заданных связей осуществляется позиционным кодом по входам переменных:

$$f[(q_0, q_1, \dots, q_{2^n-1}) \{(d_n \& x_n), \dots, (d_1 \& x_1)\}] = \bigvee_{j=0}^{2^n-1} \left(\bigwedge_{i=1}^n [d_i \& x_i^{1-B(i,j)}] \& q_j \right). \quad (2)$$

В (2) объем конфигурационной памяти связей равен n ячейкам. Пример 2-LUT для реализации коммутатора четырех связей показан на рис. 1, б. Здесь CSRAM — конфигурационная память, хранящая требуемую настройку связей.

Унитарное кодирование используется в мультиплексоре связей q_j , причем мощность множества связей Q не обязательно равна 2^n . С настройкой $d_i \in \{0, 1\}$ оно описывается формулой:

$$f[(d_{|Q|-1} \& q_{|Q|-1}), \dots, (d_0 \& q_0)] = \bigvee_{i=0}^{|Q|-1} (d_i \& q_i); \exists! (d_i = 1). \quad (3)$$

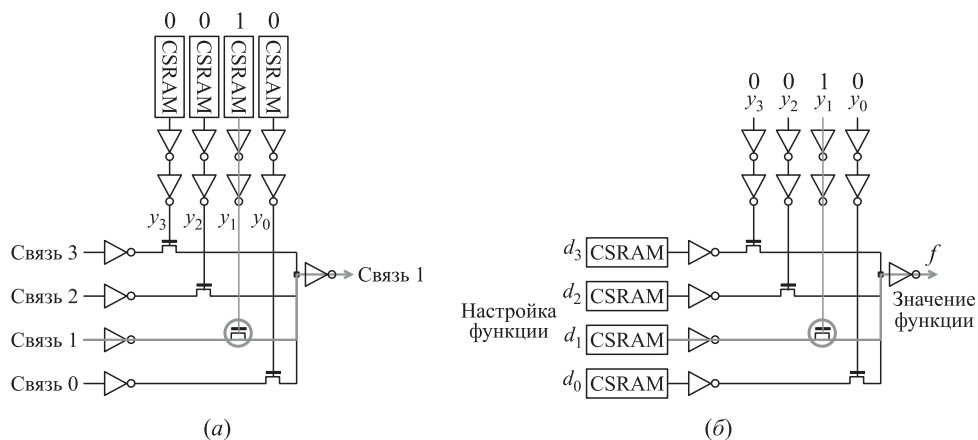


Рис. 2 Унитарные элементы: (а) мультиплексор маршрутизации связей; (б) вычислитель логической функции двух переменных

В $(3) |Q|$ — мощность множества Q , $\exists!$ — существует ровно один, используется код с одной и только одной единицей в наборе (*One-Hot*, например 01000000b), что обеспечивает путь всего из одного МДП-транзистора, но увеличивается объем конфигурационной памяти связей до 2^n . Пример унитарного коммутатора для четырех связей показан на рис. 2, а. При использовании этого элемента для реализации логической функции f получим:

$$f[(d_{2^n-1}, \dots, d_0)(x_{2^n-1}, \dots, x_0)] = \bigvee_{i=0}^{2^n-1} (x_i \& d_i); \exists! (d_i = 1). \quad (4)$$

В случае (4), как и в (1), объем конфигурационной памяти логического элемента равен 2^n ячеек, но задержка определяется только одним МДП-транзистором, как показано на рис. 2, б для функции двух бинарных переменных. Поэтому существуют две противоположные тенденции: для реализации логических функций, особенно большого числа аргументов [12–14], необходимо снижать временную задержку при приемлемых аппаратных затратах, а для реализации большого числа межсоединений требуется минимизировать аппаратные затраты, не выходя за ограничение на временную задержку и ограничения Мида–Конвей [19].

3 Метод синтеза элемента программируемой логической интегральной схемы с комбинированным кодированием

Входные переменные (или входы настройки) элемента делятся на две группы, используемые в блоках разного типа: n_1 (позиционный блок, n_1 LUT с n_1

входами) и n_2 (унитарный блок, n_2 LUT с 2^{n_2} входами). При этом $n_1 + n_2 = n$. В линейной форме получим модель при унитарном блоке слева:

$$\begin{aligned} f \{ (d_{2^{n_2}-1,0} d_{2^{n_2}-2,0} \dots d_{1,0} d_{0,0}) \dots (d_{2^{n_2}-1,2^{n_1}-1} d_{2^{n_2}-1,2^{n_1}-1} \dots \\ \dots d_{1,2^{n_1}-1} d_{0,2^{n_1}-1}) (x_{2,2^{n_2}-1} \dots x_{2,0}) [x_{1,n_1} \dots x_{1,1}] \} = \\ = \bigvee_{\delta=0}^{2^{n_2}-1} \left[(x_{2,\delta} d_{2,\delta}) \& \bigvee_{j=0}^{2^{n_1}-1} \left(\bigwedge_{i=1}^{n_1} x_{1,i}^{1-B(i,j)} \right) \right], \end{aligned}$$

где $d_k \in \{0, 1\}$ — конфигурационный бит унитарного блока или значение функции в соответствующей строке таблицы истинности функции f .

Рассмотрим пример: пусть для функции от трех переменных одна переменная a используется для позиционного кодирования. Тогда получим:

$$\begin{aligned} f \{ (d_{3,1} d_{2,1} d_{1,1} d_{0,1}) (d_{3,0} d_{2,0} d_{1,0} d_{0,0}) [(u_3 u_2 u_1 u_0) (a)] \} = \\ = d_{3,1} u_3 a \vee d_{2,1} u_2 a \vee d_{1,1} u_1 a \vee d_{0,1} u_0 a \vee d_{3,0} u_3 \bar{a} \vee d_{2,0} u_2 \bar{a} \vee d_{1,0} u_1 \bar{a} \vee d_{0,0} u_0 \bar{a} = \\ = d(7) u_3 a \vee d(6) u_2 a \vee d(5) u_1 a \vee d(4) u_0 a \vee \\ \vee d(3) u_3 \bar{a} \vee d(2) u_2 \bar{a} \vee d(1) u_1 \bar{a} \vee d(0) u_0 \bar{a}, \quad (5) \end{aligned}$$

где $u_0, \dots, u_3$ — унитарное кодирование двух переменных. С целью получения требуемой комбинации унитарного и позиционного блоков в одном элементе метод предполагает соединение элементарных деревьев-мультиплексоров $j.1.f_1$ с корнем f_1 с соответствующими входами: неинверсным x_{n_1} и инверсным x'_{n_1} — и соответствующими транзисторами по входам переменных $j.1.x, j.1.x'$:

$$\left[\begin{array}{l} j.1.s_1 - (j.1.x') x'_{n_1} \\ j.1.s_2 - (j.1.x) x_{n_1} \end{array} \right] (\vee \bullet) j.1.f_1, \quad (6)$$

где $(\vee \bullet)$ обозначает корень дерева, схемотехнически реализующий операцию монтажного ИЛИ (*Wired OR*), «—» — связь между частями мультиплексора. В (6) имеется один вход позиционной переменной x_{n_1} . Унитарный блок строится путем соединения корней с помощью монтажного ИЛИ. Например, на второй итерации получаем выражение:

$$\left[\begin{array}{l} j.1.s_1 - (j.1.x') x_{n_2} \\ j.1.s_2 - (j.1.x) x_{n_2} \\ j.2.s_1 - (j.2.x') x_{n_2} \\ j.2.s_2 - (j.2.x) x_{n_2} \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} (\vee \bullet) j.1.f_1 \\ (\vee \bullet) j.2.f_2 \end{array} \right] (\vee \bullet), \quad (7)$$

где имеются 4 входа унитарных переменных x_{n_2} по каждой ветви. Пусть, например, позиционный блок имеет одну переменную $n_1 = 1$, а унитарный — две $n_2 = 2$ в соответствии с выражением (5). После построения требуемых блоков осуществляется их соединение:

$$\left(\begin{array}{c} j.1.s_1 - (j.1.x')x_{n_2} \\ j.1.s_2 - (j.1.x)x_{n_2} \\ j.2.s_1 - (j.2.x')x_{n_2} \\ j.2.s_2 - (j.2.x)x_{n_2} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} (\vee \bullet)j.1.f_1 \\ (\vee \bullet)j.2.f_2 \\ (\vee \bullet)j.1.f_1 \\ (\vee \bullet)j.2.f_2 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} (\vee \bullet) \\ (\vee \bullet) \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} j.1.s_1 - (j.1.x')x_{n_1} \\ j.1.s_2 - (j.1.x)x_{n_1} \end{array} \right) (\vee \bullet)j.1.f_1. \quad (8)$$

В (8) к одному позиционному блоку (6) подключены два одинаковых унитарных (7). Далее метод предполагает подключение переменных (связей) и/или настроек. Альтернативный вариант представляет собой выражение, в котором унитарный и позиционный блоки меняются местами.

Предлагаемая схема комбинированного элемента для трех переменных по (5) и (8) представлена на рис. 3. Здесь $n_1 = 1$ (это a), $n_2 = 2$ (пусть это bc); $(u_3 u_2 u_1 u_0)$ — унитарный код переменных bc . Так, если набор $bc = 00b$, получаем код $0001b$, т. е. ($u_3 = 0, u_2 = 0, u_1 = 0, u_0 = 1$). Если набор $bc = 11b$, получаем код $1000b$, т. е. ($u_3 = 1, u_2 = 0, u_1 = 0, u_0 = 0$). На рис. 4, a показана предлагаемая схема комбинированного элемента в системе моделирования Multisim, желтыми линиями выделена реализация набора $(u_3 u_2 u_1 u_0)(a) = (1000b)(1b)$. Рисунок 4, b иллюстрирует результат топологической реализации этой же схемы комбинированного элемента в системе MicroWind.

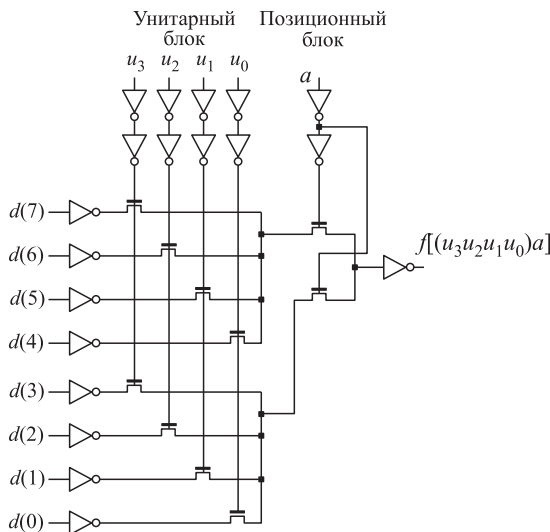


Рис. 3 Схема комбинированного элемента по (8)

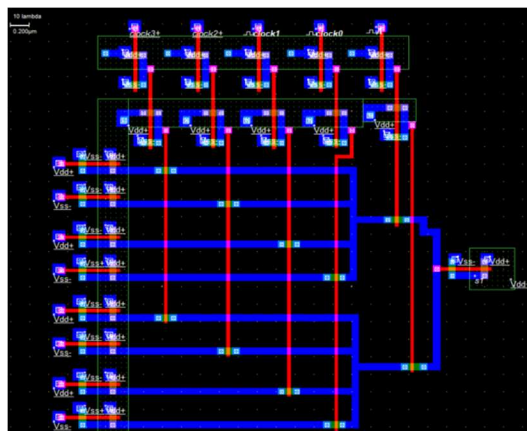
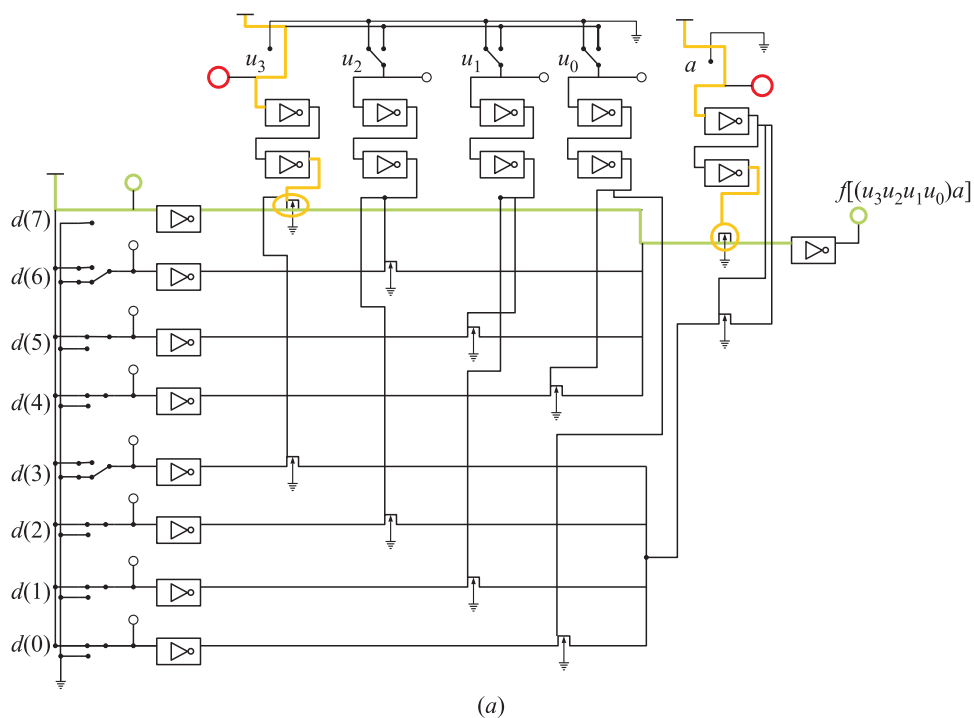


Рис. 4 Модель предлагаемого элемента по (8) в системе моделирования Multisim (a) и в системе MicroWind (б)

Таблица 1 Параметры известного и предлагаемого элементов 3-LUT при напряжении источника питания 0,35 В и частоте 0,5 ГГц (модель BSim4, технология CMOS 32nm)

№ п/п	Название	Задержка по фронту, пс	Задержка по срезу, пс	Пло- щадь, нм ²	Потребля- емая мощ- ность, мкВт	Число ли- ний связи для пере- менных LUT или объем памяти для комму- татора
1	Позиционный 3-LUT	62,1	911	78,2	2,245	3
2	Унитарный 3-LUT	50,7	354	88,8	1,833	8
3	Комбинированный 3-LUT	62,1	507	121,5	1,980	5

Статическое и динамическое моделирования подтвердили работоспособность предлагаемого элемента. В табл. 1 представлены результаты моделирования топологической реализации элемента, показанной на рис. 4, в системе MicroWind ver.3.5 (учебная версия, свободно распространяемая по запросу) [20].

Предлагаемый комбинированный элемент (см. патент РФ [21]) характеризуется уменьшением числа линий связи для переменных соответствующего логического элемента либо уменьшением объема памяти конфигураций соответствующего коммутатора.

4 Оценка эффективности предлагаемого метода при увеличении числа переменных

Сравним варианты комбинированной реализации в зависимости от значений n_1 и n_2 . Сложность реализации в МДП-транзисторах позиционного блока с n_1 входами в составе комбинированного LUT описывается формулой:

$$L_{n_1} = 6 \cdot 2^{n_1} + 4n_1 - 2 + L_{CM} \cdot 2^{n_1},$$

где L_{CM} — число МДП-транзисторов в ячейке конфигурационной памяти. Сложность реализации в МДП-транзисторах унитарного блока с n_2 входами в составе комбинированного LUT описывается формулой:

$$L_{n_2} = 7 \cdot 2^{n_2} + L_{CM} \cdot 2^{n_2}.$$

Суммарная сложность реализации комбинированного LUT с расположением позиционного блока справа от унитарного (аппаратные затраты на конфигурационную память в позиционном блоке не учитываются):

$$L_{n,UP} = 6 \cdot 2^{n_1} + 4n_1 + 2^{n_2+2} + 2^n (L_{CM} + 3). \quad (9)$$

Таблица 2 Сравнение сложности вариантов предлагаемого LUT с типовыми позиционными и унитарными реализациями

№	n	L_P	L_U	Комбинированный вариант		
				n_1	n_2	L_C
1	4	110	112	2	2	96
2	5	210	224	2	3	140
3				3	2	172
4	6	406	462	2	4	288
5				3	3	284
6				4	2	320
7	7	794	896	2	5	544
8				3	4	508
9				4	3	528
10				5	2	612
11	8	1562	1792	2	6	1056
12				3	5	956
13				4	4	944
14				5	3	1012
15				6	2	1192

Суммарная сложность реализации комбинированного LUT с расположением позиционного блока слева от унитарного (аппаратные затраты на конфигурационную память в унитарном блоке не учитываются):

$$L_{n.PU} = 2^n (L_{CM} + 6) + 2^{n_2} (4n_1 + 5) + 2. \quad (10)$$

Сравнительный анализ (9) и (10) показывает следующее:

- аппаратные затраты на реализацию конфигурационной памяти одинаковы при любом взаимном расположении позиционного и унитарного блоков;
- сложность комбинированного LUT в МДП-транзисторах при расположении позиционного блока справа от унитарного оказывается меньше, чем при обратном их взаимном расположении, при любых соотношениях n_1 и n_2 .

Действительно, разность аппаратных затрат, описываемых (9) и (10):

$$L_{n.PU} - L_{n.UP} = 3 \cdot 2^{n_1} (2^{n_2} - 2) + 2^{n_2} + 4n_1 (2^{n_2} - 1) + 2 > 0$$

при любых $n_1 > 0$ и $n_2 > 0$. В табл. 2 представлены результаты оценки сложности реализации LUT, использующих позиционное (L_P), унитарное (L_U) и предлагаемое комбинированное (L_C) кодирование с расположением позиционного блока справа от унитарного для разных сочетаний n_1 и n_2 . Аппаратная

сложность приведена в МДП-транзисторах без учета сложности конфигурационной памяти.

Анализ табл. 2 показывает, что предлагаемый вариант реализации LUT имеет меньшие аппаратные затраты, чем любой из типовых вариантов. При $n = 4$ минимальный выигрыш составляет около 13%. С увеличением n преимущество комбинированного кодирования возрастает и при $n = 8$ достигает 40%. Задержка во всех случаях равна суммарной задержке на $(n_1 + 1)$ проходных транзисторах и двух инверторах.

5 Заключение

Комбинированное кодирование элементов ПЛИС позволяет уменьшить временную задержку вычисления логических функций большого числа переменных и сократить аппаратные затраты примерно на 13%–40% относительно известных подходов. Наиболее предпочтительным вариантом представляется использование нескольких унитарных блоков на входе и одного позиционного блока на выходе. Для мультиплексоров маршрутизации метод обеспечивает снижение конфигурационной памяти до 25% при ограничении на допустимую задержку.

Литература

1. Степченков Ю. А., Морозов Н. В., Дьяченко Ю. Г., Хилько Д. В., Степченков Д. Ю. Развитие гибридной многоядерной рекуррентной архитектуры на ПЛИС // Системы и средства информатики, 2020. Т. 30. № 4. С. 95–101. doi: 10.14357/08696527200409. EDN: ALLSBO.
2. Тюрин С. Ф., Советов С. И., Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г. Новый подход к реализации логических функций в программируемых логических интегральных схемах // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 4. С. 3–15. doi: 10.14357/08696527240401. EDN: TCWBAG.
3. Соколов И. А., Тюрин С. Ф., Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Никитин М. С., Советов С. И. Новая концепция ПЛИС с выбором режима работы и двухрежимный базисный логический элемент // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. № 2. С. 56–64. doi: 10.18127/j20729472-202402-04. EDN: YHCZJP.
4. Строгонов А., Кривчун М., Городков П. Обзор программных средств с открытым исходным кодом для исследования современных архитектур ПЛИС XILINX // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2020. № 1(192). С. 100–107. doi: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.100.107. EDN: UPNZSW.
5. Строгонов А., Городков П. Современные тенденции развития ПЛИС: от системной интеграции к искусственному интеллекту // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2020. № 4(195). С. 46–56. doi: 10.22184/1992-4178.2020.195.4.46.56. EDN: QOABOZ.
6. Строгонов А. Проектирование конечных автоматов в приложении STATEFLOW системы MATLAB/SIMULINK с последующей реализацией в базисе ПЛИС // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2023. № 3(224). С. 134–147. doi: 10.22184/1992-4178.2023.224.3.134.146. EDN: BDJLBU.

7. *Строгонов А., Городков П.* ПЛИС компании Guangdong Gowin Semiconductor Corporation // Компоненты и технологии, 2020. № 1(222). С. 84–86. EDN: BIUCZX.
8. *Строгонов А., Городков П.* Обзор ПЛИС китайских производителей // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2022. № 4(215). С. 66–75. doi: 10.22184/1992-4178.2022.215.4.66.74. EDN: ZFMFUX.
9. *Арбузов И., Строгонов А., Городков П.* Пример разработки проекта в базе ПЛИС 5578ТС024 // Компоненты и технологии, 2019. № 7(216). С. 66–69. EDN: GGJBLH.
10. *Mahendra P., Ramesh S.R.* FPGA implementation of high performance precise signed and unsigned multiplier using ternary 6-LUT architecture // Conference (International) on Inventive Computation Technologies Proceedings. — IEEE, 2022. P. 202–207. doi: 10.1109/ICICT54344.2022.9850686.
11. *Пирогов А. А., Пирогова Ю. А., Башкиров А. В., Чепелев М. Ю., Жилин Б. И.* Методика проектирования преобразователя кода Грея на ПЛИС // Вестник Воронежского института ФСИН России, 2020. № 3. С. 9–14. EDN: QHAANU.
12. *Строгонов А. В., Цыбин С. А.* Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри // Компоненты и технологии, 2010. № 11(112). С. 56–62. EDN: NEIPHH.
13. *Тюрин С. Ф., Васенин И. А., Советов С. И.* Логические элементы ПЛИС FPGA на основе комбинированного кодирования переменных // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2023. № 46. С. 83–107. doi: 10.15593/2224-9397/2023.2.04. EDN: XOKIEK.
14. *Vasenin I. A., Sovetov S. I., Oputin N. E., Tyurin S. F.* Advanced logic gates for FPGAs // 24th Conference (International) of Young Professionals in Electron Devices and Materials Proceedings. — IEEE, 2023. P. 110–115. doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225215.
15. *Zhang J., Zhu K., Shi K., Wang L., Zhou H.* Efficient FPGA routing architecture exploration based on two-stage MUXes // 15th Conference (International) on ASIC Proceedings. — IEEE, 2023. Art. 10395964. 4 p. doi: 10.1109/ASICON58565.2023.10395964.
16. *Vikhorev R.* Universal logic cells to implement systems functions // NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference Proceedings. — IEEE, 2016. P. 373–375. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448197.
17. *Vikhorev R.* Improved FPGA logic elements and their simulation // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Proceedings. — IEEE, 2018. P. 259–264. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317080.
18. *Tyurin S. F., Vikhorev R. V.* A decoder — look up tables for FPGAs // Int. J. Computing, 2021. Vol. 20. No. 3. P. 365–373. doi: 10.47839/ijc.20.3.2282.
19. *Mead C. A., Conway L.* Introduction to VLSI systems. — 2nd ed. — Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1979. 396 p.
20. MicroWind ver.3.5. <https://microwind.net/downloads>.
21. *Тюрин С. Ф., Васенин И. А., Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Советов С. И.* Программируемое логическое устройство. Патент на изобретение № 2811404 с приоритетом от 02.08.2023. Опубл. 11.01.2024, бюл. № 2. EDN: COOGKL.

Поступила в редакцию 27.12.2024

Принята к публикации 15.04.2025

COMBINED ENCODING IN ELEMENTS OF FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAYS

S. F. Tyurin^{1,2}, I. A. Vasenin¹, Yu. A. Stepchenkov³, and Yu. G. Diachenko³

¹Perm National Research Polytechnic University, 7 Prof. Pozdeev Str., Perm 614013, Russian Federation

²Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russian Federation

³Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The authors consider the variables’ combined coding of a Lookup Table (LUT) logical element and a routing multiplexer that is an interconnect switch of the Field-Programmable Gate Array (FPGA). The proposed method of combining positional and unitary coding ensures the reduction of the logical function calculation delay under given hardware limitations or the reduction of the communication switch hardware costs under restrictions on the delay. The paper describes a model of such encoding and a method for synthesizing the corresponding element. It provides complexity estimates in terms of transistors and results of circuit and layout simulation. Simulation proves the proposed element’s performance. The analysis shows the effectiveness of the adopted approach in terms of complexity, layout area, time delay, and power consumption. The developed element with combined encoding can significantly reduce the time delay when calculating functions of a large variable number and the interconnect configuration memory volume.

Keywords: FPGA’s elements; LUT; routing multiplexer; unitary and positional encoding

DOI: 10.14357/08696527250201

EDN: NCZKUW

References

1. Stepchenkov, Yu. A., N. V. Morozov, Yu. G. Diachenko, D. V. Khilko, and D. Yu. Stepchenkov. 2020. Razvitie gibridnoy mnogoyadernoy rekurrentnoy arkhitektury na PLIS [Multicore hybrid recurrent architecture expansion on FPGA]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 30(4):95–101. doi: 10.14357/08696527200409. EDN: ALLSBO.
2. Tyurin, S. F., S. I. Sovetov, Yu. A. Stepchenkov, and Yu. G. Diachenko. 2024. Novyy podkhod k realizatsii logicheskikh funktsiy v programmiruemyykh logicheskikh integral’nykh skhemakh [A new approach to implementing logical functions in field-programmable gate arrays]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(4):3–15. doi: 10.14357/08696527240401. EDN: TCWBAG.
3. Sokolov, I. A., S. F. Tyurin, Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, M. S. Nikitin, and S. I. Sovetov. 2024. Novaya kontseptsiya PLIS s vyborom rezhima raboty i dvukh-rezhimnyy bazisnyy logicheskiy element [Novel FPGA clock concept and dual-mode basic logic gate]. *Sistemy vysokoy dostupnosti [Highly Available Systems]* 20(2):56–64. doi: 10.18127/j20729472-202402-04. EDN: YHCZJP.

4. Strogonov, A., M. Krivchun, and P. Gorodkov. 2020. Obzor programmnykh sredstv s otkrytym iskhodnym kodom dlya issledovaniya sovremennykh arkhitektur PLIS XILINX [Overview of open source software tools for researching modern XILINX FPGA architectures]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, and Business] 1(192):100–107. doi: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.100.107. EDN: UPNZSW.
5. Strogonov, A., and P. Gorodkov. 2020. Sovremennye tendentsii razvitiya PLIS: ot sistemnoy integratsii k iskusstvennomu intellektu [Current trends in FPGA development: From system integration to artificial intelligence]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, and Business] 4(195):46–56. doi: 10.22184/1992-4178.2020.195.4.46.56. EDN: QOABOZ.
6. Strogonov, A. 2023. Proektirovanie konechnykh avtomatov v prilozhenii STATE-FLOW sistemy MATLAB/SIMULINK s posleduyushchey realizatsiei v bazise PLIS [Designing finite-state machine in MATLAB/SIMULINK system's stateflow tool with subsequent implementation at the FPGA basis]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, and Business] 3(224):134–147. doi: 10.22184/1992-4178.2023.224.3.134.146. EDN: BDJLBU.
7. Strogonov, A., and P. Gorodkov. 2020. PLIS kompanii Guangdong Gowin Semiconductor Corporation [FPGA from Guangdong Gowin Semiconductor Corporation]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies] 1(222):84–86. EDN: BIUCZX.
8. Strogonov, A., and P. Gorodkov. 2022. Obzor PLIS kitayskikh proizvoditeley [Overview of FPGAs from Chinese manufacturers]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, and Business] 4(215):66–75. doi: 10.22184/1992-4178.2022.215.4.66.74. EDN: ZFMFUX.
9. Arbuzov, I., A. Strogonov, and P. Gorodkov. 2019. Primer razrabotki proekta v bazise PLIS 5578TC024 [An example of project development based on FPGA 5578TS024]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies] 7(216):66–69. EDN: GGJBLH.
10. Mahendra, P., and S. R. Ramesh. 2022. FPGA implementation of high performance precise signed and unsigned multiplier using ternary 6-LUT architecture. *Conference (International) on Inventive Computation Technologies Proceedings*. IEEE. 202–207. doi: 10.1109/ICICT54344.2022.9850686.
11. Pirogov, A. A., Yu. A. Pirogova, A. V. Bashkirov, M. Yu. Chepelev, and B. I. Zhilin. 2020. Metodika proektirovaniya preobrazovatelya koda Greya na PLIS [Design procedure of the Gray code converter on FPGA]. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii* [Vestnik of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service] 3:9–14. EDN: QHAANU.
12. Strogonov, A. V., and S. A. Tsybin. 2010. Programmiruemaya kommutatsiya PLIS: vzglyad iznutri [FPGA programmable switching: An inside look]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies] 11(112):56–62. EDN: NEIPHH.
13. Tyurin, S. F., I. A. Vasenin, and S. I. Sovetov. 2023. Logicheskie elementy PLIS FPGA na osnove kombinirovannogo kodirovaniya peremennykh [FPGA gates using combined variables coding]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [PNRPU Bulletin. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems] 46:83–107. doi: 10.15593/2224-9397/2023.2.04. EDN: XOKIEK.

14. Vasenin, I. A., S. I. Sovetov, N. E. Oputin, and S. F. Tyurin. 2023. Advanced logic gates for FPGAs. *24th Conference (International) of Young Professionals in Electron Devices and Materials Proceedings*. IEEE. 110–115. doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225215.
15. Zhang, J., K. Zhu, K. Shi, L. Wang, and H. Zhou. 2023. Efficient FPGA routing architecture exploration based on two-stage MUXes. *15th Conference (International) on ASIC Proceedings*. IEEE. Art. 10395964. 4 p. doi: 10.1109/ASICON58565.2023.10395964.
16. Vikhorev, R. 2016. Universal logic cells to implement systems functions. *NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference Proceedings*. IEEE. 373–375. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448197.
17. Vikhorev, R. 2018. Improved FPGA logic elements and their simulation. *Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Proceedings*. IEEE. 259–264. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317080.
18. Tyurin, S. F., and R. V. Vikhorev. 2021. A decoder — look up tables for FPGAs. *Int. J. Computing* 20(3):365–373. doi: 10.47839/ijc.20.3.2282.
19. Mead, C. A., and L. Conway. 1979. *Introduction to VLSI systems*. 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley. 396 p.
20. MicroWind ver.3.5. Available at: <https://microwind.net/downloads> (accessed March 31, 2025).
21. Tyurin, S. F., I. A. Vasenin, Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, and S. I. Sovetov. 02.08.2023. Programmiruemoie logicheskoe ustroystvo [Programmable logic device]. Patent RF No. 2811404. EDN: COOGKL.

Received December 27, 2024

Accepted April 15, 2025

Contributors

Tyurin Sergey F. (b. 1953) — Doctor of Science in technology, Honored inventor of RF, professor, Perm National Research Polytechnic University, 7 Prof. Pozdeev Str., Perm 614013, Russian Federation; professor, Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russian Federation; tyurinsergfeo@yandex.ru

Vasenin Ivan A. (b. 1998) — PhD student, Perm National Research Polytechnic University, 7 Prof. Pozdeev Str., Perm 614013, Russian Federation; vasenin.ioann@yandex.ru

Stepchenkov Yuri A. (b. 1951) — Candidate of Science (PhD) in technology, head of department, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; YStepchenkov@ipiran.ru

Diachenko Yuri G. (b. 1958) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; diaura@mail.ru

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕКТОРНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОСРЕДСТВОМ ЕГО КАНОНИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ВЕЙВЛЕТ-НЕЙРОННОЙ СЕТИ*

И. Н. Синицын¹, В. И. Синицын², Э. Р. Корепанов³, Т. Д. Конашенкова⁴

Аннотация: Построено каноническое разложение (КР) векторного стохастического процесса (СтП), заданного на конечном промежутке времени, с применением технологии вейвлет-нейронной сети (ВНС). Задача построения КР матрицы ковариационных функций векторного СтП рассматривается как задача аппроксимации элементов матрицы ковариационных функций квадратичными формами базисных вейвлетов с компактными носителями. Для ее решения разработана архитектура многослойной ВНС. Обучение с учителем ВНС осуществляется методом обратного распространения ошибки. Каноническое разложение матрицы ковариационных функций соответствует КР векторного СтП в виде линейной комбинации случайных величин (СВ) с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями. Координатные функции КР задаются в виде линейной комбинации базисных вейвлет-функций с весовыми коэффициентами, оптимальные значения которых определяются при функционировании ВНС методом градиентного спуска. Описан алгоритм построения КР векторного СтП на основе ВНС. Разработанный метод применен для моделирования типового нестационарного двумерного СтП.

Ключевые слова: вейвлет; вейвлет-нейронная сеть; каноническое разложение; ковариационная матрица; ковариационная функция; моделирование; стохастический процесс

DOI: 10.14357/08696527250202

EDN: TFDTXJ

1 Введение

Роль математического моделирования СтП при решении прикладных задач различного назначения неуклонно возрастает [1–5]. Одним из актуальных на-

*Работа выполнена с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, sinitsin@dol.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, vsinitsin@ipiran.ru

³Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ekoeranov@ipiran.ru

⁴Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, tkonashenkova64@mail.ru

правлений стал метод КР, который представляет СтП в виде линейной комбинации СВ с коэффициентами, выраженными детерминированными функциями [6–9]. Такое представление СтП упрощает выполнение различных математических операций над СтП, поэтому КР СтП широко применяют в задачах анализа и синтеза стохастических систем (СтС) различного назначения [6–9].

В [6–9] изложены общие методы построения КР, в том числе на основе произвольной системы функций. В [10, 11] для нестационарного СтП были построены вейвлет-канонические разложения (ВЛКР) на основе ортонормированного базиса вейвлетов с компактными носителями [12]. В [13–17] ВЛКР применены для решения задачи синтеза оптимальных по байесовым критериям линейных и нелинейных СтС. В [18, 19] описан новый метод построения ВЛКР одномерного нестационарного СтП с применением нейросетевых технологий [20–22]. Разработана архитектура трехслойной ВНС с одним скрытым слоем. Функции активации скрытого слоя задаются на основе выбранного ортонормированного базиса вейвлетов с компактными носителями. Для обучения ВНС применяется алгоритм обратного распространения ошибки. Коррекция весовых коэффициентов ВНС осуществляется методом градиентного спуска. Сравнительный анализ метода построения КР для одномерных или приводимых к одномерным СтП на основе ВНС (далее — КРВНС) с рекуррентным методом построения ВЛКР нестационарного СтП показал их одинаковую вычислительную точность [18]. Преимущество КРВНС заключается в его простоте в исполнении и отсутствии предварительных аналитических выкладок.

В настоящей статье авторы применяют нейросетевой подход, предложенный в [18, 19], для построения КРВНС нестационарного векторного СтП. В разд. 2 дана постановка задачи. В разд. 3 приведен алгоритм построения КРВНС матрицы ковариационных функций векторного СтП, описана архитектура многослойной ВНС с двумя скрытыми слоями. Для обучения ВНС применяется алгоритм обратного распространения ошибки. Коррекция весовых коэффициентов осуществляется методом градиентного спуска. Дано обоснование процесса моделирования векторного СтП посредством его КРВНС. В разд. 4 приведен пример нейросетевого моделирования типового двумерного нестационарного СтП. Заключение содержит основные выводы и направления дальнейших исследований.

2 Постановка задачи

Пусть N_X -мерный действительный СтП

$$X(t) = [X_1(t) \ X_2(t) \ \cdots \ X_{N_X}(t)]^T \quad (t \in T)$$

задан на вероятностном пространстве $(\mathcal{H}, \mathcal{A}, \mathcal{P})$,

$$\mathcal{H} = \underbrace{\mathcal{L}^2(T) \times \mathcal{L}^2(T) \times \cdots \times \mathcal{L}^2(T)}_{N_X}.$$

Здесь $\mathcal{L}^2(T)$ — гильбертово пространство функций $\xi(t)$ ($t \in T$) с нормой $\|\xi\| = [\int_T |\xi(t)|^2 dt]^{1/2}$; $\mathcal{A}$ — σ -алгебра в $\mathcal{H}$; $\mathcal{P}(X(t) = [\xi_1(t) \xi_2(t) \cdots \xi_{N_X}(t)]^T)$ — вероятность события $X(t) = [\xi_1(t) \xi_2(t) \cdots \xi_{N_X}(t)]^T$, $\xi_h(t) \in \mathcal{L}^2(T)$, $h = \overline{1, N_X}$. Известно, что векторный, в общем случае нестационарный, СтП $X(t)$ имеет нулевое математическое ожидание и известную матрицу ковариационных функций $K(t_1, t_2) = \mathbf{M}[X(t_1)X^T(t_2)]$ ($t_1 \in T, t_2 \in T$) с элементами $K_{hl}(t_1, t_2) \in \mathcal{L}^2(T \times T)$ ($h, l = \overline{1, N_X}$).

В пространстве $\mathcal{L}^2(T)$ зададим ортонормированный базис вейвлетов с компактными носителями вида

$$\{\varphi_{00}(t), \psi_{jk}(t)\}, \quad (1)$$

где $\varphi_{00}(t) = \varphi(t)$ — масштабирующая функция; $\psi_{00}(t) = \psi(t)$ — материнский вейвлет; $\psi_{jk}(t) = \sqrt{2^j} \psi(2^j t - k)$ — вейвлеты уровня j для $j = 1, 2, \dots$; $k = \overline{0, 2^j - 1}$. Для удобства представим вейвлет-базис (1) в виде

$$\begin{aligned} f_1(t) &= \varphi_{00}(t); \quad f_2(t) = \psi_{00}(t); \\ f_v(t) &= \psi_{jk}(t), \quad j = 1, 2, \dots; \quad k = \overline{0, 2^j - 1}; \quad v = 2^j + k + 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Для вейвлет-базисов (1) или (2) зададим максимальный уровень вейвлет-разрешения J . Тогда число базисных вейвлет-функций будет равно $L = 2^{J+1}$ [12].

Согласно [11], на основе этого базиса можно построить ВЛКР векторного СтП $X(t)$:

$$X^L(t) = \sum_{v=1}^L V_v x_v^L(t), \quad (3)$$

где V_v — некоррелированные СВ с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями $D_v = 1$, $x_v^L(t) = [x_{v1}^L(t) x_{v2}^L(t) \cdots x_{vN_X}^L(t)]^T$ — координатные функции, причем скалярные координатные функции представляют собой линейные комбинации базисных вейвлет-функций

$$x_{vh}^L(t) = \sum_{\mu=1}^L c_{\mu}^{vh} f_{\mu}(t). \quad (4)$$

Если ввести векторы $c^{vh} = [c_1^{vh} c_2^{vh} \cdots c_L^{vh}]^T$ ($v = \overline{1, L}$; $h = \overline{1, N_X}$) и $f^L(t) = [f_1(t) f_2(t) \cdots f_L(t)]^T$, то (4) можно представить в виде:

$$x_{vh}^L = (c^{vh})^T f^L(t) \quad (v = \overline{1, L}; \quad h = \overline{1, N_X}).$$

Согласно прямой теореме Пугачёва [6–9], КР СтП $X(t)$ вида (3) соответствует КР матрицы ковариационных функций $K^L(t_1, t_2) = \|K_{hl}^L(t_1, t_2)\|_{h,l=1}^{N_X}$:

$$\left. \begin{aligned} K^L(t_1, t_2) &= \sum_{v=1}^L x_v^L(t_1) (x_v^L(t_2))^T ; \\ K_{hl}^L(t_1, t_2) &= \sum_{v=1}^L x_{vh}^L(t_1) x_{vl}^L(t_2) \quad (h, l = \overline{1, N_X}) . \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Согласно обратной теореме Пугачёва [6–9], КР матрицы ковариационных функций (5) соответствует КР СтП $X(t)$ вида (3).

Рассмотрим задачу построения КР матрицы ковариационных функций (5) как задачу аппроксимации элементов $K_{hl}(t_1, t_2)$ ($h, l = \overline{1, N_X}$) матрицы ковариационных функций $K(t_1, t_2)$ квадратичными формами относительно базисных вейвлет-функций f_v ($v = \overline{1, L}$) с неизвестными векторными коэффициентами c^{vh} ($v = \overline{1, L}$; $h = \overline{1, N_X}$) вида

$$K_{hl}^L(t_1, t_2) = \sum_{v=1}^L (c^{vh})^T f^L(t_1) (f^L(t_2))^T c^{vl} \quad (h, l = \overline{1, N_X}) .$$

Следуя [18, 19], решим эту задачу на основе нейросетевых технологий [20–22].

3 Алгоритм моделирования векторного стохастического процесса

Для применения нейросетевых технологий необходимо задать множество обучающих примеров. Учитывая опыт построения КРВНС одномерного СтП [18, 19], число точек по оси времени возьмем равным числу базисных вейвлет-функций, что обеспечит максимальную скорость обучения ВНС без потери устойчивости вычислений. Тогда число примеров $N = L^2$:

$$\begin{aligned} \{(\tau^i, d^i)\}_{i=1}^N ; \quad \tau^i &= \begin{bmatrix} t_1^i & t_2^i \end{bmatrix}^T ; \quad i_1 = i_2 = \overline{1, L} ; \quad i = (i_1 - 1)L + i_2 ; \\ d^i &= [d_1^i, d_2^i, \dots, d_{N_d}^i]^T ; \quad d_j^i = K_{hl}(t_1^i, t_2^i) ; \\ j &= (h - 1)N_X + l ; \quad h, l = \overline{1, N_X} ; \quad N_d = N_X^2 . \end{aligned}$$

Обозначим через вектор $y^i = [y_1^i y_2^i \dots y_{N_d}^i]^T$ реальную реакцию ВНС на подачу i -го примера. Выходной сигнал y^i для каждого i -го примера сравнивается с соответствующим желаемым откликом ВНС d^i . Их разность определяет сигнал ошибки $e^i = d^i - y^i$, $e^i = [e_1^i e_2^i \dots e_{N_d}^i]^T$, $e_j^i = d_j^i - y_j^i$ ($i = \overline{1, N}$; $j = \overline{1, N_d}$). Функцию стоимости зададим в виде среднеквадратичной ошибки (СКО) для всего набора примеров:

$$E(c^{vh}) = \frac{1}{2NN_d} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_d} (e_j^i)^2 , \quad (6)$$

или в подробной записи

$$E(c^{vh}) = \frac{1}{2NN_d} \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^{N_X} \sum_{l=1}^{N_X} \left(d_{(h-1)N_X+l}^i - K_{hl}^L(t_1^i, t_2^i) \right)^2.$$

Архитектуру ВНС можно описать следующим образом:

- входной сигнал — $\tau^i = [t_1^{i1} \ t_2^{i2}]^T$; $i_1, i_2 = \overline{1, L}$; $i = (i_1 - 1)L + i_2$;
- первый скрытый слой задает пространство признаков в виде значений базисных вейвлет-функций — $f_v(t_1^{i1}), f_v(t_2^{i2})$ ($v = \overline{1, L}$; $i_1, i_2 = \overline{1, L}$);
- второй скрытый слой вычисляет значения координатных функций КР — $x_{vh}^L(t_1^{i1}) = \sum_{\mu=1}^L c_{\mu}^{vh} f_{\mu}(t_1^{i1})$; $x_{vh}^L(t_2^{i2}) = \sum_{\mu=1}^L c_{\mu}^{vh} f_{\mu}(t_2^{i2})$ ($v = \overline{1, L}$; $h = \overline{1, N_X}$); векторы c^{vh} ($v = \overline{1, L}$; $h = \overline{1, N_X}$) — неизвестные весовые коэффициенты;
- выходной слой вычисляет значения элементов ковариационной матрицы — $K_{hl}^L(t_1^{i1}, t_2^{i2}) = \sum_{v=1}^L x_{vh}^L(t_1^{i1}) x_{vl}^L(t_2^{i2})$ ($h, l = \overline{1, N_X}$; $i_1, i_2 = \overline{1, L}$).

Отсюда видно, что ВНС содержит четыре слоя, в том числе два скрытых. Для обучения ВНС с учителем применим алгоритм обратного распространения ошибки [22]. Пусть исходные значения весовых коэффициентов $c^{vh}(0) = c^{vh0}$ ($v = \overline{1, L}$; $h = \overline{1, N_X}$). Далее генерируется последовательность весовых коэффициентов $c^{vh}(1), c^{vh}(2), \dots$ такая, что значение функции стоимости уменьшается при каждой итерации алгоритма: $E(c^{vh}(n+1)) < E(c^{vh}(n))$. Признаком окончания вычислений можно взять условие $|E(c^{vh}(n))| \leq E_a$, где E_a — задаваемая константа, характеризующая точность вычислений. Для корректировки неизвестных весовых коэффициентов c^{vh} ($v = \overline{1, L}$; $h = \overline{1, N_X}$) применим формулу

$$c^{vh}(n+1) = c^{vh}(n) - \eta r^{vh}(n), \quad (7)$$

где $\eta = \text{const}$ — параметр скорости обучения, $0 < \eta < 1$;

$$r^{vh} = \nabla E(c^{vh}) = \left[\frac{\partial E}{\partial c_1^{vh}} \frac{\partial E}{\partial c_2^{vh}} \dots \frac{\partial E}{\partial c_L^{vh}} \right]^T \quad (v = \overline{1, L}; h = \overline{1, N_X}). \quad (8)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial c_{\mu}^{vh}} &= \\ &= -\frac{1}{NN_d} \sum_{i=1}^N \left[\sum_{l=1}^{N_X} e_{(h-1)N_X+l}^i \frac{\partial K_{hl}^L(t_1^i, t_2^i)}{\partial c_{\mu}^{vh}} + \sum_{k=1}^{N_X} e_{(k-1)N_X+h}^j \frac{\partial K_{kl}^L(t_1^i, t_2^i)}{\partial c_{\mu}^{vh}} \right] \\ &\quad (\mu = \overline{1, L}), \quad (9) \end{aligned}$$

где

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial K_{hl}^L(t_1^i, t_2^i)}{\partial c_{\mu}^{vh}} &= f_{\mu}(t_1^i) x_{vl}^L(t_2^i) \quad (h, l = \overline{1, N_X}; h \neq l); \\ \frac{\partial K_{kh}^L(t_1^i, t_2^i)}{\partial c_{\mu}^{vh}} &= f_{\mu}(t_2^i) x_{vk}^L(t_1^i) \quad (k, h = \overline{1, N_X}; k \neq h); \\ \frac{\partial K_{hh}^L(t_1^i, t_2^i)}{\partial c_{\mu}^{vh}} &= f_{\mu}(t_1^i) x_{vh}^L(t_2^i) + f_{\mu}(t_2^i) x_{vh}^L(t_1^i) \quad (h = \overline{1, N_X}). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В результате получаем следующий алгоритм построения приближенного КР матрицы ковариационных функций векторного СтП на основе обучения много-слойной ВНС.

Алгоритм. Построение КРВНС матрицы ковариационных функций векторного СтП

1. Задание множества обучающих примеров.
2. Задание параметра скорости обучения $0 < \eta < 1$.
3. Вычисление функций первого скрытого слоя: $f_v(t_1^{i_1}), f_v(t_2^{i_2})$ ($v = \overline{1, L}; i_1, i_2 = \overline{1, L}$).
4. Инициализация весовых коэффициентов: $c^{vh}(0) = c^{vh0}$ ($v = \overline{1, L}; h = \overline{1, N_X}$) при $n = 0$. Последующие шаги начинаются с $n = 1, 2, \dots$
5. Вычисление функций второго скрытого слоя: $x_{vh}^L(t_j^{i_j}) = (c^{vh}(n))^T f^L(t_j^{i_j})$ ($v = \overline{1, L}; h = \overline{1, N_X}; i_j = \overline{1, L}, j = 1, 2$).
6. Вычисление фактического отклика: $y^i(n) = \sum_{v=1}^L x_{vh}^L(t_1^i) x_{vl}^L(t_2^i)$ ($i = \overline{1, N}$).
7. Вычисление ошибки $e^i(n) = d^i - y^i(n)$ для каждого примера и СКО для всего набора обучающих примеров. Начиная со второго шага проверка условия окончания адаптации весовых коэффициентов: $|E(c^{vh}(n))| \leq E_a$. Если условие выполняется, выход из алгоритма, в противном случае переход к следующему действию.
8. Изменение весовых коэффициентов c^{vh} ($v = \overline{1, L}; h = \overline{1, N_X}$) по формулам (7)–(10).
9. Увеличиваем номер итерации n на 1 и возвращаемся к п. 5.

При выполнении алгоритма весовые коэффициенты c^{vh} ($v = \overline{1, L}; h = \overline{1, N_X}$) стабилизируются около некоторого оптимального значения c^{vh*} ($v = \overline{1, L}; h = \overline{1, N_X}$), при котором функция стоимости (6) принимает минимальное значение.

Этим оптимальным значениям весовых коэффициентов соответствует КРВНС матрицы ковариационных функций $K^{L*}(t_1, t_2) = \|K_{hl}^{L*}(t_1, t_2)\|_{h,l=1}^{N_X}$:

$$\left. \begin{aligned} K^{L*}(t_1, t_2) &= \sum_{v=1}^L x_v^{L*}(t_1) \left(x_v^{L*}(t_2)\right)^T ; \\ K_{hl}^{L*}(t_1, t_2) &= \sum_{v=1}^L x_{vh}^{L*}(t_1) x_{vl}^{L*}(t_2) \quad (h, l = \overline{1, N_X}) , \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где

$$x_v^{L*}(t) = \left[x_{v1}^{L*}(t), x_{v2}^{L*}(t), \dots, x_{vN_X}^{L*}(t) \right]^T ; \quad x_{vh}^{L*}(t) = \left(c^{vh*} \right)^T f^L(t) \quad (v = \overline{1, L} ; h = \overline{1, N_X}) . \quad (12)$$

Согласно обратной теореме Пугачёва [6–9], имеем соответствующее КРВНС векторного СтП $X(t)$:

$$X^{L*}(t) = \sum_{v=1}^L V_v x_v^{L*}(t) , \quad (13)$$

где СВ V_v ($v = \overline{1, L}$) имеют нулевые математические ожидания и единичные дисперсии. Точность аппроксимации матрицы ковариационных функций ее КРВНС (11)–(12) и векторного СтП $X(t)$ его КРВНС (13) определяется СКО

$$E_{\min} = E \left(c^{vh*} \right) = \frac{1}{2NN_d} \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^{N_X} \sum_{l=1}^{N_X} \left(K_{hl}(t_1^i, t_2^i) - K_{hl}^{L*}(t_1^i, t_2^i) \right)^2 .$$

На практике часто для оценки точности используют модуль абсолютной ошибки оценки дисперсий элементов векторного СтП

$$\Delta D_h^X(t) = \left| K_{hh}(t, t) - K_{hh}^{L*}(t, t) \right| \quad (h = \overline{1, N_X})$$

или дисперсионный след (trace)

$$\Delta D^X(t) = \text{tr} \left[K(t, t) - K^{L*}(t, t) \right] = \sum_{h=1}^{N_X} \Delta D_h^X(t) .$$

Использование КРВНС нестационарного СтП (13) позволяет свести выполнение различных линейных операций над СтП к обычным операциям математического анализа над неслучайными координатными функциями. Случайные

величины V_v ($v = \overline{1, L}$) с $M[V_v] = 0$ и $D[V_v] = 1$ имеют то же распределение, что и СтП $X(t)$. Если распределение СтП $X(t)$ неизвестно, то, как правило, СВ V_v ($v = \overline{1, L}$) считают нормально распределенными. При моделировании реализаций СтП $X(t)$, представленного его КРВНС (13), значения СВ V_v ($v = \overline{1, L}$) получают с помощью соответствующего датчика случайных чисел.

4 Пример

Построить КРВНС двумерного СтП $X(t) = [X_1(t) X_2(t)]^T$ на промежутке $[t_0, t_0 + T]$ с нулевым математическим ожиданием и матрицей ковариационных функций $K(t_1, t_2) = \|K_{ij}(t_1, t_2)\|_{i,j=1}^2$ для

$$\begin{aligned} K_{ii}(t_1, t_2) &= D_i \exp \{-\alpha_i |t_2 - t_1| + \beta_i(t_2 + t_1)\} \quad (i = 1, 2); \\ K_{12}(t_1, t_2) &= K_{21}(t_1, t_2) = D_{12} \exp \{-\alpha_{12} |t_2 - t_1| + \beta_{12}(t_2 + t_1)\}. \end{aligned}$$

Для построения КРВНС ковариационной матрицы СтП $X(t)$ разработано инструментальное программное обеспечение КРВНС.2 в среде MATLAB. Экспериментально было установлено, что разработанный алгоритм обеспечивает максимальную скорость обучения ВНС без потери устойчивости при параметре скорости обучения $\eta = 0,01$ и при детерминированном задании начальных значений для весовых коэффициентов $c_\mu^{vh}(0) = 0,1$ ($v, \mu = \overline{1, L}; h = \overline{1, 2}$).

Исходные данные: $D_i = 1$ ($i = 1, 2$); $D_{12} = 0,5$; $\alpha_1 = \alpha_{12} = 1$; $\alpha_2 = 0,5$; $\beta_i = \beta_{12} = 0,1$ ($i = 1, 2$); $J = 2$; $L = 8$; $t_0 = 0$; $T = 8$.

Результаты представлены на рис. 1–4. При решении задачи для $E_a = 0,0042$ при $n \geq 165$ были получены графики точных значений D1tr и D2tr дисперсий $K_{11}(t, t)$ и $K_{22}(t, t)$ и их приближенных значений D1ap и D2ap, а также графики реализаций $X_1(t)$ и $X_2(t)$ СтП $X(t)$. В таблице даны значения модулей

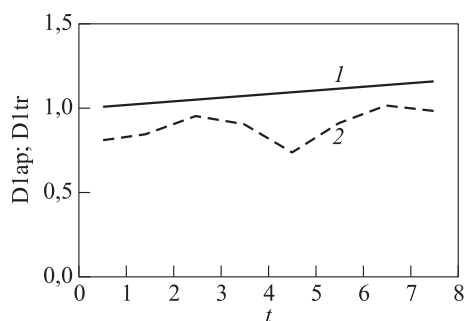


Рис. 1 Графики точных значений D1tr дисперсии $K_{11}(t, t)$ (1) и ее оценки D1ap (2)

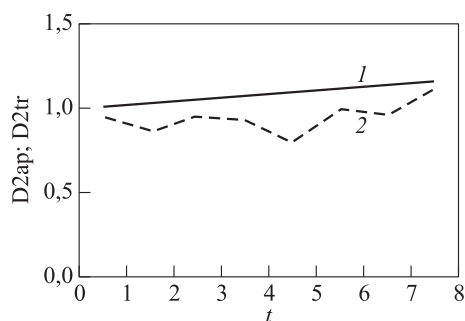


Рис. 2 Графики точных значений D2tr дисперсии $K_{22}(t, t)$ (1) и ее оценки D2ap (2)

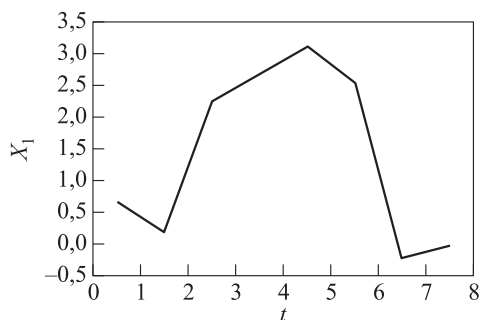


Рис. 3 График реализации $X_1(t)$

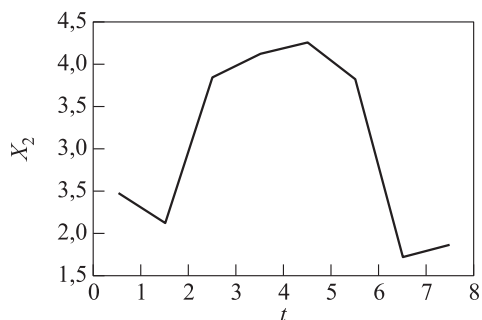


Рис. 4 График реализации $X_2(t)$

Характеристики точности КРВНС СтП $X(t)$

t	ΔD_1^X	ΔD_2^X	ΔD^X
0,5	0,2007	0,0658	0,2665
1,5	0,1777	0,1661	0,3438
2,5	0,0955	0,1086	0,2041
3,5	0,1701	0,1544	0,3245
4,5	0,3565	0,3045	0,6610
5,5	0,2003	0,1240	0,3243
6,5	0,1201	0,1833	0,3034
7,5	0,1815	0,0520	0,2335

абсолютных ошибок оценок дисперсий $\Delta_i^X(t)$ ($i = 1, 2$) компонентов $X_1(t)$ и $X_2(t)$ и дисперсионного следа $\Delta D^X(t)$ СтП $X(t)$.

5 Заключение

Разработан новый метод построения КР векторного СтП, заданного на конечном промежутке времени, на основе многослойной ВНС. Данный метод представляет собой обобщение аналогичного метода, предложенного в [18, 19] для моделирования скалярного СтП. Для построения КРВНС векторного СтП разработана архитектура многослойной ВНС. Для обучения с учителем ВНС применяется алгоритм обратного распространения ошибки, а для коррекции весовых коэффициентов выбран метод градиентного спуска. Как известно, этот метод сильно зависит от выбора начальных значений весовых коэффициентов и от параметра скорости обучения, что и подтвердили вычислительные эксперименты. В основе метода лежит аппроксимация элементов ковариационной матрицы СтП квадратичными формами базисных вейвлетов с компактными носителями.

Преимуществом КРВНС по сравнению с другими приближенными методами построения КР векторного СтП заключается в его простоте в математическом

и алгоритмическом планах. Метод КРВНС был применен для моделирования типовых двумерных СтП. В статье приведен один пример моделирования двумерного нестационарного СтП. Для повышения скорости сходимости алгоритма и точности аппроксимации ковариационной матрицы целесообразно рассмотреть другие методы коррекции весовых коэффициентов.

Важное практическое значение имеют задачи разработки методов статистической линеаризации и аппроксимации типовых нелинейных преобразований СтП, а также методов их фильтрации на основе КРВНС.

Литература

1. Shebanin V., Atamanuk I., Kondratenko Yu. Simulation of vector random sequences based on polynomial degree canonical decomposition // Eastern-European J. Enterprise Technologies, 2016. Vol. 5. Iss. 4(83). P. 4–12. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80786. EDN: XFXVXAR.
2. Тырсин А. Н. Векторное энтропийное моделирование многомерных стохастических систем. — М.: Наука, 2022. 231 с.
3. Alekseev A. K., Bondarev A. E., Pyatakova Yu. S. On the visualization of multidimensional functions using canonical decomposition // Scientific Visualization, 2022. Vol. 14. Iss. 3. P. 73–91. doi: 10.26583/sv.14.3.06. EDN: NMLXBM.
4. Рыбаков К. А. Алгоритмическое обеспечение численно-спектральных методов моделирования стохастических динамических систем // Моделирование и анализ данных, 2023. Т. 13. № 3. С. 79–95. doi: 10.17759/mda.2023130306. EDN: HCVUUU.
5. Cao H., Peng Xi., Xu B., Qin F., Yang Q. Enhanced subspace iteration technique for probabilistic modal analysis of statically indeterminate structures // Mathematics, 2024. Vol. 12. Iss. 22. Art. 3486. 23 p. doi: 10.3390/math12223486. EDN: IQLJNC.
6. Пугачёв В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. — М.: Физматгиз, 1962. 884 с.
7. Сеницын И. Н. Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. 768 с. EDN: USRCYN.
8. Сеницын И. Н. Канонические представления случайных функций. Теория и применения. — 2-е изд. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2023. 816 с.
9. Sinitsyn I. N. Developing the theory of stochastic canonic expansions and its applications // Pattern Recognition Image Analysis, 2023. Vol. 33. Iss. 4. P. 862–887. doi: 10.1134/S1054661823040429. EDN: QOWFBU.
10. Сеницын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (IV) // Системы высокой доступности, 2017. Т. 13. № 3. С. 55–59. EDN: ZSQHLR.
11. Сеницын И. Н., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (V) // Системы высокой доступности, 2018. Т. 14. № 1. С. 59–70. EDN: YVXNBW.

12. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / Пер. с англ. — М.: Ижевск: НИИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 464 с. (*Daubechies I. Ten lectures on wavelets. — Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 352 p.*)
13. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Оптимизация линейных стохастических систем на основе вейвлет канонических разложений // Автоматика и телемеханика, 2020. № 11. С. 136–154. doi: 10.31857/S0005231020110082. EDN: MZUQYN.
14. Sinitsyn I., Sinitsyn V., Korepanov E., Konashenkova T. Bayes synthesis of linear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions // Mathematics, 2022. Vol. 10. Iss. 9. Art. 1517. 14 p. doi: 10.3390/math10091517. EDN: GACWCC.
15. Sinitsyn I., Sinitsyn V., Korepanov E., Konashenkova T. Synthesis of nonlinear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions // Mathematics, 2023. Vol. 11. Iss. 9. Art. 2059. 18 p. doi: 10.3390/math11092059. EDN: LZQEDA.
16. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Синтез оптимальных по функциональным байесовым критериям стохастических систем методом вейвлет-канонических разложений // Системы высокой доступности, 2023. Т. 19. № 4. С. 37–50. doi: 10.18127/j20729472-202304-03. EDN: WYQSQT.
17. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Байесов синтез многомерной стохастической системы высокой доступности методом вейвлет-канонических разложений // Системы высокой доступности, 2024. Т. 20. № 1. С. 55–66. doi: 10.18127/j20729472-202401-06. EDN: OMIDZW.
18. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Моделирование нестационарного стохастического процесса посредством его канонического разложения на основе вейвлет-нейронной сети // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 2. С. 21–39. doi: 10.14357/08696527240202. EDN: YFHFIN.
19. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Конашенкова Т. Д. Нейросетевой синтез оптимальной линейной стохастической системы по критерию минимума среднеквадратичной ошибки // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 87–108. doi: 10.14357/08696527240307. EDN: FVQWBN.
20. Терехов С. А. Вейвлеты и нейронные сети // Научная сессия МИФИ-2001: III Всерос. научн.-техн. конф. «Нейроинформатика-2001»: лекции по нейроинформатике. — М.: МИФИ, 2001. С. 142–181.
21. Veitch D. Wavelet neural networks and their application in the study of dynamical system // Networks, 2005. Vol. 1. No. 8. P. 313–320.
22. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Пер. с англ. — 2-е изд. — СПб.: Диалектика, 2020. 1104 с. (*Haykin S. Neural networks. A comprehensive foundation. — 2nd ed. — Prentice-Hall of India Pvt. Ltd., 1999. 842 p.*)

Поступила в редакцию 29.01.2025

Принята к публикации 15.04.2025

MODELING ALGORITHMS FOR VECTOR STOCHASTIC PROCESS BY CANONICAL EXPANSIONS BASED ON MULTILAYER WAVELET NEURAL NETWORK

I. N. Sinitsyn, V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The paper is devoted to modeling methods and algorithms for vector stochastic process (StP) based on multilayer canonical expansions (CE) of wavelet neural network (WNN). Stochastic process is defined on a fixed time interval. Canonical expansion for matrix covariance functions construction is considered as approximation problem for elements of covariance functions by quadratic forms of basic wavelet with compact carriers. For its solution, multilayer architecture of WNN is developed. Training with teacher is realized by inverse error extension method. The CE of coordinate functions are taken in linear combination of basic wavelet functions with weighting coefficients whose optimal values are defined during WNN functioning. Special attention is paid to two-dimensional typical nonstationary StP. Advantages of CE of WNN algorithms are discussed.

Keywords: canonical expansion; covariance function; covariance matrix; modeling; stochastic process; wavelet; wavelet-neural network

DOI: 10.14357/08696527250202

EDN: TFDTXJ

Acknowledgments

The research was carried out using the infrastructure of the Shared Research Facilities “High Performance Computing and Big Data” (CKP “Informatics”) of FRC CSC RAS (Moscow).

References

1. Shebanin, V., I. Atamanuk, and Yu. Kondratenko. 2016. Simulation of vector random sequences based on polynomial degree canonical decomposition. *Eastern-European J. Enterprise Technologies* 5(4-83):4–12. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80786. EDN: XFVXAR.
2. Tyrsin, A. N. 2022. *Vektornoe entropiynoe modelirovanie mnogomernykh stokhasticheskikh sistem* [Vector entropy modeling of multidimensional stochastic systems]. Moscow: Nauka. 231 p.
3. Alekseev, A. K., A. E. Bondarev, and Yu. S. Pyatakova. 2022. On the visualization of multidimensional functions using canonical decomposition. *Scientific Visualization* 14(3):73–91. doi: 10.26583/sv.14.3.06. EDN: NMLXBM.
4. Rybakov, K. A. 2023. Algoritmicheskoe obespechenie chislenno-spektral'nykh metodov modelirovaniya stokhasticheskikh dinamicheskikh sistem [Algorithms of numerical-spectral methods for modeling stochastic dynamical systems]. *Modelirovanie i analiz dannykh* [Modeling and Data Analysis] 13(3):79–95. doi: 10.17759/mda.2023130306. EDN: HCVUUU.

5. Cao, H., X. Peng, B. Xu, F. Qin, and Q. Yang. 2024. Enhanced subspace iteration technique for probabilistic modal analysis of statically indeterminate structures. *Mathematics* 12(22):3486. 23 p. doi: 10.3390/math12223486. EDN: IQLJNC.
6. Pugachev, V. S. 1962. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i ee primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of random functions and its application to automatic control problems]. Moscow: Fizmatgiz. 884 p.
7. Sinitsyn, I. N. 2009. *Kanonicheskie predstavleniya sluchaynykh funktsiy i ikh primeneniye v zadachakh komp'yuternoy podderzhki nauchnykh issledovaniy* [Canonical expansions of random functions and their application to scientific computer-aided support]. Moscow: TORUS PRESS. 768 p. EDN: USRCYN.
8. Sinitsyn, I. N. 2023. *Kanonicheskie predstavleniya sluchaynykh funktsiy. Teoriya i primeneniya* [Canonical expansions of random functions. Theory and applications]. 2nd ed. Moscow: TORUS PRESS. 816 p.
9. Sinitsyn, I. N. 2023. Developing the theory of stochastic canonic expansions and its applications. *Pattern Recognition Image Analysis* 33(4):862–887. doi: 10.1134/S1054661823040429. EDN: QOWFBU.
10. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2017. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (IV) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (IV)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 13(3):55–69. EDN: ZSQHLR.
11. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2018. Instrumental'noe programmnoe obespechenie analiza i sinteza stokhasticheskikh sistem vysokoy dostupnosti (V) [Software tools for analysis and synthesis of stochastic systems with high availability (V)]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 14(1):59–70. EDN: YVXNBW.
12. Daubechies, I. 1992. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics. 352 p.
13. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2020. Optimization of linear stochastic systems based on canonical wavelet expansions. *Automat. Rem. Contr.* 81(11):2046–2061. doi: 10.1134/S0005117920110077. EDN: EOJMHD.
14. Sinitsyn, I., V. Sinitsyn, E. Korepanov, and T. Konashenkova. 2022. Bayes synthesis of linear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions. *Mathematics* 10(9):1517. 14 p. doi: 10.3390/math10091517. EDN: GACWCC.
15. Sinitsyn, I., V. Sinitsyn, E. Korepanov, and T. Konashenkova. 2023. Synthesis of non-linear nonstationary stochastic systems by wavelet canonical expansions. *Mathematics* 11(9):2059. 18 p. doi: 10.3390/math11092059. EDN: LZQEDA.
16. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2023. Sintez optimal'nykh po funktsional'nym beyesovym kriteriyam stokhasticheskikh sistem metodom veyvlet-kanonicheskikh razlozheniy [Methodological support of functional Bayes synthesis of stochastic systems based on wavelet canonical expansions]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 19(4):37–50. doi: 10.18127/j20729472-202304-03. EDN: WYQSQT.
17. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2024. Bayesov sintez mnogomernoy stokhasticheskoy sistemy vysokoy dostupnosti metodom veyvlet kanonicheskikh razlozheniy [Bayes synthesis of multidimensional stochastic

- system with high availability by wavelet canonical expansions]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 20(1):55–66. doi: 10.18127/j20729472-202401-06. EDN: OMIDZW.
18. Sinitsyn, I. N., I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2024. Modelirovanie nestatsionarnogo stokhasticheskogo protsessa posredstvom ego kanonicheskogo razlozheniya na osnove veyvlet-neyronnoy seti [Nonstationary stochastic process modeling by canonical expansion and wavelet neutral network]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(2):21–39. doi: 10.14357/08696527240202. EDN: YFHFHIN.
 19. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, E. R. Korepanov, and T. D. Konashenkova. 2024. Neyrosetevoy sintez optimal'noy lineynoy stokhasticheskoy sistemy po kriteriyu minimuma srednekvadrachnoy oshibki [Neural network synthesis of an optimal linear stochastic system according to the criterion of minimum mean square error]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(3):87–108. doi: 10.14357/08696527240307. EDN: FVQWBN.
 20. Terekhov, S. A. 2001. Veyvlety i neyronnye seti [Wavelets and neural networks]. *Nauchnaya sessiya MIFI-2001: III Vseros. nauchn.-tekhn. konf. "Neyroinformatika-2001": lektsii po neyroinformatike* [Scientific session MEPhI-2001: 3rd All-Russian Scientific and Technical Conference "Neuroinformatics-2001": Lectures on neuroinformatics]. Moscow: MIFI. 142–181.
 21. Veitch, D. 2005. Wavelet neural networks and their application in the study of dynamical system. *Networks* 1(8):313–320.
 22. Haykin, S. 1999. *Neural networks. A comprehensive foundation*. 2nd ed. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd. 842 p.

Received January 29, 2025

Accepted April 15, 2025

Contributors

Sinitsyn Igor N. (b. 1940) — Doctor of Science in technology, professor, Honored scientist of RF, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; sinitsin@dol.ru

Sinitsyn Vladimir I. (b. 1968) — Doctor of Science in physics and mathematics, principal scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; vsinitsin@ipiran.ru

Korepanov Eduard R. (b. 1966) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; ekorepanov@ipiran.ru

Konashenkova Tatiana D. (b. 1964) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; tkonashenkova64@mail.ru

ОБ УНИВЕРСАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ СЛЕЖЕНИЯ И НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ*

*И. В. Урюпин*¹

Аннотация: Для постановки большинства навигационных задач требуется корректно сформулировать задачу фильтрации состояния стохастической динамической системы по косвенным наблюдениям. Если навигация выполняется в некооперативном сценарии, когда наблюдаемый объект и измерительная система не взаимодействуют, априорная информация о модели движения либо ограничена простыми описаниями цели и условиями среды, либо вообще отсутствует. Для таких случаев в статье предлагается несколько универсальных моделей, требующих минимального объема информации о параметрах движущегося объекта. В основе моделей лежит простое движение с постоянной скоростью. Отсутствие информации об этой скорости дополняет собственно навигацию задачами ее идентификации. Направление движения задается значением средней скорости, которое может изменяться от траектории к траектории, в том числе в зависимости от координат объекта в момент обнаружения. Неопределенность движения моделируется несколькими вариантами аддитивных (коррелированных и некоррелированных) возмущений, имитирующих хаотическое движение с сохранением общего направления. Более сложная модель исходит из предположения о периодической смене средней скорости движения, аналога движения с кусочно-постоянной скоростью. Такие изменения модели движения моделирует пуассоновский поток событий. Отмечается, что даже в условиях наличия априорной информации об этом потоке задача навигации сопровождается чрезвычайно сложной задачей идентификации, так как требуется оценивать изменившуюся среднюю скорость на коротком интервале наблюдения. Приведены характерные примеры рассчитанных траекторий.

Ключевые слова: навигация; слежение за целью; беспилотные движущиеся аппараты; стохастическая динамическая система наблюдения; аддитивные возмущения; марковские цепи; пуассоновский поток событий

DOI: 10.14357/08696527250203

EDN: WRGXLN

1 Введение

В числе приложений, требующих применения в решении методов стохастической фильтрации, значительное место всегда занимали задачи управления

*Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, uryupin93@yandex.ru

движущимися объектами. Вне зависимости от цели управления для ее достижения нужно понимать, в каком положении и/или состоянии находится движущийся объект. Точной информации об этом, как правило, нет, а доступны лишь косвенные наблюдения — измерения, выполненные теми или иными сенсорами, расположенными или на борту движущегося объекта, или вне его контроля. Новый уровень внимания к этой области в последние десятилетия вызван скачкообразным развитием технологий автономных движущихся объектов. К ним относят прежде всего беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [1, 2], автономные подводные аппараты [3] и беспилотные автомобили [4]. Эти новые или вновь ставшие актуальными технологии стали интересными приложениями для вполне традиционных навигационных задач [5]: от типовой задачи сопровождения цели до условно новых задач позиционирования по данным глобальных навигационных систем [6, 7] или современных сонаров — акустических сенсоров [8, 9]. Особенности поведения автономных аппаратов, а в большей степени особенности сред, в которых происходит движение, и специфика используемых измерительных средств не всегда позволяют применять типовые подходы к фильтрации. Поэтому встает необходимость развития существующих методологий оценивания и создания новых [10–16].

Корректная постановка задачи фильтрации предполагает наличие модели движения объекта. В кооперативном сценарии, когда наблюдаемый объект и измерительная система вместе решают общую навигационную задачу, информация о модели может быть весьма детальной вплоть до знания скоростей движения и вращения, заданных заранее или в виде обратной связи. В некооперативном, тем более антагонистическом, сценарии сведения о движении ограничены простыми описаниями цели и условий среды либо вообще отсутствуют. Именно такой вариант исследуется в статье, и для него предлагаются несколько универсальных моделей, требующих минимального объема информации.

2 Общая модель движения

Традиционно задаче моделирования поведения различных систем уделяется большое внимание [17–22]. Поведение перемещающихся в пространстве объектов — типичный пример таких систем. Принципиально модели движения автономных аппаратов можно разделить на два класса: учитывающие ориентацию или описывающие движение материальной точки. Традиционные средства, используемые в первом случае, включают гироскопы, построенные на разных физических принципах, которыми определяется и управляется вращение автономного аппарата. Обычно эти средства состоят из акселерометра, который измеряет ускорение по трем осям, гироскопа, который измеряет скорость вращения по трем осям, и иногда магнитометра, который определяет направление полета относительно магнитного поля Земли. Сенсоры, используемые для второго типа задач, обеспечивают измерение параметров положения аппарата в пространстве, решаются такие задачи, как слежение за объектом или глобальное позиционирование. Цель

статьи — задачи второго типа, в них модель движения, как правило, задается простыми законами типа «скорость — это интеграл ускорения» и «положение в пространстве — это интеграл от скорости». Обеспечивают «реальность» этим законам возмущения, которые обычно предполагаются аддитивными. Непрерывные модели дискретизируются, что можно объяснить дискретным характером поступления измерений, выполняемых сенсорами. Без ограничения общности можно предполагать, что частота поступления измерений как раз определяет шаг дискретизации уравнений движения. Таким образом, общая модель движения задается состоянием $X_t \in \mathbb{R}^{p_x}$ дискретной стохастической системы по наблюдениям $Y_t \in \mathbb{R}^{q_y}$ вида

$$\left. \begin{aligned} X_t &= \Phi_t^{(1)}(X_{t-1}) + \Phi_t^{(2)}(X_{t-1})W_t, \quad t = 1, 2, \dots, \quad X_0 = \eta; \\ Y_t &= \Psi_t^{(1)}(X_t) + \Psi_t^{(2)}(X_t)V_t, \quad t = 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь предполагается, что случайные последовательности X_t и Y_t имеют конечные ковариации (их наличие обеспечивается, например, линейными ограничениями на скорость роста функций $\Phi_t^{(1)}$, $\Phi_t^{(2)}$, $\Psi_t^{(1)}$ и $\Psi_t^{(2)}$); возмущения $W_t \in \mathbb{R}^{p_w}$ и ошибки измерений $V_t \in \mathbb{R}^{q_v}$ — независимые дискретные белые шумы второго порядка; вектор начальных условий $\eta \in \mathbb{R}^{p_x}$ не зависит от W_t и V_t и имеет конечную ковариацию. Соответствующие моменты первого и второго порядка (математическое ожидание и ковариация вектора) обозначаются, например для W_t , как $E\{W_t\} = m_W(t)$, $D\{W_t\} = D_W(t)$. Далее наблюдения Y_t не обсуждаются, а только уравнения состояния X_t .

3 Хаотическое движение с постоянной скоростью

Основная модель движения выбрана предельно простой. Будем исходить из предположения, что в среднем аппарат движется с постоянной скоростью, а на реальную скорость оказывают влияние неконтролируемые случайные факторы. Их воздействие приводит к независимым отклонениям скорости. Между очередными изменениями на интервалах дискретизации скорость остается постоянной и изменяется в каждый следующий такт времени. Описывается движение в декартовой системе координат $0xyz$, связанной с Землей. Состояние X_t задает вектор текущего положения: $(X(t), Y(t), Z(t))^T$. Интегрирование постоянной скорости после дискретизации даст

$$\Phi_t^{(1)}(X_{t-1}) = \text{diag}\{1, 1, 1\}X_{t-1}.$$

Таким образом, основного внимания требует функция $\Phi_t^{(2)}(X_{t-1})$.

Предполагается, что оценивание положения аппарата начинается в момент времени $t = 0$ и выполняется в дискретные моменты времени $1, 2, \dots, t, \dots$,

отвечающие разбиению интервала наблюдения с шагом δ с: $\delta, 2\delta, \dots, t\delta, \dots$. Начальное положение определяется вектором $\eta = (\eta_X, \eta_Y, \eta_Z)^T$.

Скорость движения аппарата описывается вектором

$$S(t) = (S_X(t), S_Y(t), S_Z(t))^T,$$

который складывается из некоторой постоянной средней скорости и аддитивных возмущений. Постоянная средняя скорость задается случайным вектором $(s_X, s_Y, s_Z)^T$. Этот параметр модели движения может предполагаться известным, но в реальной задаче его потребуются идентифицировать вместе с решением задачи фильтрации состояния. Поскольку все аппараты, для которых может решаться навигационная задача, не могут иметь одинаковой эту скорость, то значения s_X , s_Y и s_Z задаются моделированием реализации случайного вектора с известными двумя первыми моментами $(E\{s_X\}, E\{s_Y\}, E\{s_Z\})^T$ и $\text{diag}(D\{s_X\}, D\{s_Y\}, D\{s_Z\})$. Неизвестные и подлежащие идентификации параметры s_X , s_Y и s_Z нужно включать в расширенный вектор состояния, т. е. добавлять элементы к $(X(t), Y(t), Z(t))^T$ и оценивать на каждой траектории.

Неконтролируемые случайные факторы, влияющие на скорость движения, моделируются аддитивными возмущениями $w_X(t)$, $w_Y(t)$ и $w_Z(t)$, имеющими независимые нормальные распределения с единичной дисперсией (математическое ожидание $m_W(t) \neq 0$ и нужно, чтобы включить в запись оценки фильтрации известные аддитивные компоненты — среднюю постоянную скорость), так что в (1) вектор $W_t = (w_x(t), w_y(t), w_z(t))^T$, а функция

$$\Phi_t^{(2)}(X_{t-1}) = \delta \text{diag} \{ \sigma_{s_X}, \sigma_{s_Y}, \sigma_{s_Z} \}$$

выполняет роль стандартного отклонения аддитивного возмущения, которое предполагается известным и постоянным. Итоговая динамика имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= X(t-1) + \delta S_X(t), & S_X(t) &= s_X + \sigma_{s_X} w_X(t); \\ Y(t) &= Y(t-1) + \delta S_Y(t), & S_Y(t) &= s_Y + \sigma_{s_Y} w_Y(t); \\ Z(t) &= Z(t-1) + \delta S_Z(t), & S_Z(t) &= s_Z + \sigma_{s_Z} w_Z(t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Величины стандартных отклонений σ_{s_X} , σ_{s_Y} и σ_{s_Z} показывают, насколько внешние неконтролируемые воздействия могут отклонять скорость от постоянного среднего значения $(E\{s_X\}, E\{s_Y\}, E\{s_Z\})^T$. При отсутствии априорной информации об этих величинах можно выбирать отклонения проекция скорости $S(t)$ равными этим средним значениям, т. е. $\sigma_{s_X} = E\{s_X\}$; $\sigma_{s_Y} = E\{s_Y\}$; $\sigma_{s_Z} = E\{s_Z\}$. При больших скоростях аппарата движение получается сильно хаотическим, что вполне подходит для имитации жестких условий оценивания.

Нетрудно видеть, что моментные характеристики скорости $S(t)$ постоянны и равны

$$\begin{aligned} E\{S(t)\} &= (E\{s_X\}, E\{s_Y\}, E\{s_Z\})^T; \\ D\{S(t)\} &= \text{diag}\{D\{s_X\} + \sigma_{s_X}^2, D\{s_Y\} + \sigma_{s_Y}^2, D\{s_Z\} + \sigma_{s_Z}^2\} = \\ &= \text{diag}\{D\{s_X\} + (E\{s_X\})^2, D\{s_Y\} + (E\{s_Y\})^2, D\{s_Z\} + (E\{s_Z\})^2\} = \\ &= \text{diag}\{E\{s_X^2\}, E\{s_Y^2\}, E\{s_Z^2\}\}. \end{aligned}$$

4 Модель с коррелированными возмущениями

Модель (2) очень примитивна, поэтому нуждается в совершенствовании для большего соответствия реальным условиям. Для этого в модель будут внесены два дополнения. Первое — это зависимость «размера» возмущения от скорости. Это сделано по аналогии с хорошо известным аэродинамическим эффектом, когда сопротивление воздуха движущемуся объекту растет как квадрат скорости. При сохранении постоянной средней скорости $(s_X, s_Y, s_Z)^T$ «размер» возмущения вместо постоянных величин σ_{s_X} , σ_{s_Y} и σ_{s_Z} теперь определяют функции $\Sigma_{s_X}(S)$, $\Sigma_{s_Y}(S)$ и $\Sigma_{s_Z}(S)$, $S = S(t) = (S_X(t), S_Y(t), S_Z(t))^T$, которые продолжают выполнять роль стандартного отклонения, т. е. будут множителями для аддитивных возмущений $w_X(t)$, $w_Y(t)$ и $w_Z(t)$ с единичной дисперсией. Модель (2), таким образом, примет новый вид:

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= X(t-1) + \delta S_X(t), \quad S_X(t) = s_X + \Sigma_{s_X}(S(t-1))w_X(t); \\ Y(t) &= Y(t-1) + \delta S_Y(t), \quad S_Y(t) = s_Y + \Sigma_{s_Y}(S(t-1))w_Y(t); \\ Z(t) &= Z(t-1) + \delta S_Z(t), \quad S_Z(t) = s_Z + \Sigma_{s_Z}(S(t-1))w_Z(t). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для выбора вида функций $\Sigma_{s_X}(S)$, $\Sigma_{s_Y}(S)$ и $\Sigma_{s_Z}(S)$ можно использовать разные предположения. В качестве основного варианта предлагается задавать отклонение как часть (долю) абсолютной величины скорости по соответствующему направлению. Обозначим эти доли постоянными ε_{s_X} , ε_{s_Y} и ε_{s_Z} , т. е.

$$\Sigma_{s_X}(S) = \varepsilon_{s_X}|S_X|; \quad \Sigma_{s_Y}(S) = \varepsilon_{s_Y}|S_Y|; \quad \Sigma_{s_Z}(S) = \varepsilon_{s_Z}|S_Z|.$$

Нетрудно видеть, что определенные таким образом проекции $S_X(t)$, $S_Y(t)$ и $S_Z(t)$ скорости аппарата в модели (3) могут иметь примерно те же моменты, что и проекции скорости в предыдущей модели. Действительно, условия $E\{S_X(t)\} = E\{s_X\}$, $E\{S_Y(t)\} = E\{s_Y\}$ и $E\{S_Z(t)\} = E\{s_Z\}$ из модели (2) выполняются и в (3), если $w_X(t)$, $w_Y(t)$ и $w_Z(t)$ остаются независимыми стандартными гауссовскими. Выражения для дисперсии каждой проекции одинаковы. Запишем, например, $D[S_X(t)]$. С учетом независимости $w_X(t)$ и s_X имеем:

$$\begin{aligned} D[S_X(t)] &= D[s_X] + \varepsilon_{s_X}^2 E\{|S_X(t-1)|^2\} = \\ &= D[s_X] + \varepsilon_{s_X}^2 (E[s_X])^2 + \varepsilon_{s_X}^2 D[S_X(t-1)], \end{aligned}$$

т. е. дисперсия $D[S_X(t)]$ представляет собой сумму геометрической прогрессии. При $0 < \varepsilon_{s_X} < 1$ эта сумма сходится к $E\{s_X^2\}/(1 - \varepsilon_{s_X}^2) - (E[s_X])^2$. Выбирая

$$\varepsilon_{s_X}^2 = \frac{(E[s_X])^2}{(E[s_X])^2 + E\{s_X^2\}},$$

при достаточно больших t получим

$$D[S_X(t)] = \text{const} = E\{s_X^2\},$$

т. е. в точности как в модели (2). Если аналогично поступить с проекциями $S_Y(t)$ и $S_Z(t)$, то функция $\Phi_t^{(2)}$ в этой модели примет вид:

$$\Phi_t^{(2)}(X_{t-1}) = \delta \text{diag}\{\varepsilon_{s_X}|S_X(t-1)|, \varepsilon_{s_Y}|S_Y(t-1)|, \varepsilon_{s_Z}|S_Z(t-1)|\}$$

и первые два момента скорости $S(t)$ в обеих моделях совпадут.

Отметим принципиальную разницу в характере траекторий предложенных моделей. Несмотря на то что безусловные моментные характеристики скоростей в обеих моделях сделаны одинаковыми, условные характеристики, а значит, и характер хаотического движения на каждой траектории, существенно отличаются. В (2) отклонения от средней скорости всегда обладают одинаковыми характеристиками, а значит, точность оценки скорости никак не влияет на ошибку прогноза и, в свою очередь, на оценку положения аппарата. В модели (3) отклонения скорости зависят от ее абсолютной величины, а значит, чем точнее оценено положение аппарата и его мгновенная скорость, тем точнее будет прогноз.

5 Модель с марковскими скачками скорости

Второе усовершенствование модели (2) — это предположение о скачкообразном изменении постоянной средней скорости $(s_X, s_Y, s_Z)^T$. Даже при сохранении общего направления движения на некоторую известную цель аппарат может изменять скорость и по направлению, и по модулю, например с целью усложнить слежение за ним внешним наблюдателям, поэтому здесь будем считать, что $s_X = s_X(t)$, $s_Y = s_Y(t)$ и $s_Z = s_Z(t)$.

Пусть имеется не зависящий от положения X_t аппарата стандартный пуассоновский процесс $P(u)$ и задана интенсивность λ_u изменения его постоянной средней скорости (т. е. априорно известно среднее время между изменениями параметра). Дискретное время t связано с непрерывным u шагом дискретизации:

$u = t\delta$. Можно вектор состояния $X_t \in \mathbb{R}^{p_X}$ расширить $(p_X + 1)$ -м элементом, так что $X_{(p_X+1)t} = \lambda_{t\delta} P(t\delta)$.

Пусть $(s_X^p(t), s_Y^p(t), s_Z^p(t))^T$ — дискретный белый шум, сечения которого имеют те же распределения, что и параметр $(s_X, s_Y, s_Z)^T$ из предыдущей модели, $p(t) = X_{(p_X+1)t} - X_{(p_X+1)t-1}$ — индикатор скачка процесса $\lambda_{t\delta} P(t\delta)$ на текущем интервале дискретизации. Скачкообразное изменение постоянной средней скорости — новое значение средней скорости движения $S(t)$, появившееся в случайный момент времени, — можно описать следующей моделью:

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= X(t-1) + \delta S_X(t), & S_X(t) &= s_X(t) + \Sigma_{s_X}(S(t-1))w_X(t); \\ Y(t) &= Y(t-1) + \delta S_Y(t), & S_Y(t) &= s_Y(t) + \Sigma_{s_Y}(S(t-1))w_Y(t); \\ Z(t) &= Z(t-1) + \delta S_Z(t), & S_Z(t) &= s_Z(t) + \Sigma_{s_Z}(S(t-1))w_Z(t), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} s_X(t) &= (1 - p(t))s_X(t-1) + p(t)s_X^p(t); \\ s_Y(t) &= (1 - p(t))s_Y(t-1) + p(t)s_Y^p(t); \\ s_Z(t) &= (1 - p(t))s_Z(t-1) + p(t)s_Z^p(t). \end{aligned}$$

Таким образом, если нет скачка в пуассоновском процессе $p(t) = 0$, то постоянная средняя скорость на шаге t сохраняется такой же, как на шаге $t-1$. Если $p(t) = 1$, то параметр принимает новое значение $s_X^p(t)$.

Уравнения (4) записаны для варианта коррелированного возмущения из модели (3). Ясно, что функции $\Sigma_{s_X}(S)$, $\Sigma_{s_Y}(S)$ и $\Sigma_{s_Z}(S)$ здесь можно исключить, вернувшись к независимым шумам в модели (2).

Еще более интересным представляется усовершенствование модели (4) с точки зрения выбора направления на цель. В моделях (2) и (3) это направление фактически определяется в начальный момент времени выбором среднего $(E\{s_X\}, E\{s_Y\}, E\{s_Z\})^T$. Так, если цель поместить в начало координат, то предположение о движении аппарата к цели примет формальный вид:

$$E\{s_X\} = -\alpha E\{\eta_X\}; \quad E\{s_Y\} = -\alpha E\{\eta_Y\}; \quad E\{s_Z\} = -\alpha E\{\eta_Z\}, \quad \alpha > 0, \quad (5)$$

т. е. направление вектора средней скорости в начало координат. В модели (4) это направление можно менять при каждом скачке, заменяя стационарное условие (5) динамическим:

$$\left. \begin{aligned} E\{s_X^p(t)|X(t-1)\} &= -\alpha X(t-1); \\ E\{s_Y^p(t)|Y(t-1)\} &= -\alpha Y(t-1); \\ E\{s_Z^p(t)|Z(t-1)\} &= -\alpha Z(t-1), \quad \alpha > 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В таком варианте направление на цель будет уточняться при каждом скачке скорости, т. е. при каждом очередном маневре аппарата. При этом от белозумности $(s_X^p(t), s_Y^p(t), s_Z^p(t))^T$ придется отказаться.

В отношении моментов в модели (4) надо отметить, что если, как и в предыдущих моделях, не ставить задачу идентификации средней скорости, то в (4) надо предполагать известными все значения $s_x^p(t)$, $s_y^p(t)$ и $s_z^p(t)$, а значит, и $p(t)$. Из-за этого первые два момента скорости $S(t)$ и в этой модели будут теми же, что и в предыдущих. Динамическое условие (6), конечно, эту «одинаковость» нарушит. Но этот вариант более точно должен моделировать приближение аппарата к цели, если именно для этого выполняются маневры.

6 Численный эксперимент

В примере моделировалось обнаружение БПЛА, движущегося после обнаружения в направлении цели, расположенной в начале координат. Элементы вектора $\eta = (\eta_X, \eta_Y, \eta_Z)^T$ независимы и имеют равномерное распределение:

$$\eta_X \sim R[20, 40]; \quad \eta_Y \sim R[20, 40]; \quad \eta_Z \sim R[0, 5; 1, 5],$$

т. е. аппарат обнаруживается в среднем в точке $E\{\eta\} = (30, 30, 1)^T$ км.

Скорость БПЛА $S(t)$ описывается одной из моделей (2), (3) или (4) с одной и той же постоянной средней скоростью $s = (s_X, s_Y, s_Z)^T$ с независимыми элементами, каждый из которых имеет равномерное распределение: $s_X \sim R[-200, -100]$, $s_Y \sim R[-200, -100]$ и $s_Z \sim R[-10, 0]$ км/ч. Таким образом, средняя скорость БПЛА характеризуется математическим ожиданием $E\{s\} = (-150, -150, -5)^T$. Итак, БПЛА со средней скоростью ≈ 212 км/ч движется в среднем на начало координат. Разброс скорости характеризуется ковариацией $\text{diag}\{D\{s_X\}; D\{s_Y\}; D\{s_Z\}\} \approx \text{diag}\{29^2; 29^2; 3^2\}$.

Вектор возмущений $W_t = (w_X(t), w_Y(t), w_Z(t))^T$, моделирующий отклонения скорости $S(t)$ от среднего значения s в модели (2), имеет независимые элементы со стандартным нормальным распределением. Величины отклонений σ_{s_X} , σ_{s_Y} и σ_{s_Z} , равны средним значениям средней скорости s , т. е.

$$\sigma_{s_X} = E\{s_X\} = 150; \quad \sigma_{s_Y} = E\{s_Y\} = 150; \quad \sigma_{s_Z} = E\{s_Z\} = 5.$$

В модели (3), выбирая функции $\Sigma_{s_X}(S) = \varepsilon_{s_X}|S_X|$, $\Sigma_{s_Y}(S) = \varepsilon_{s_Y}|S_Y|$ и $\Sigma_{s_Z}(S) = \varepsilon_{s_Z}|S_Z|$ согласно рекомендации $D[S_X(t)] \rightarrow E\{s_X^2\}$, $D[S_Y(t)] \rightarrow E\{s_Y^2\}$ и $D[S_Z(t)] \rightarrow E\{s_Z^2\}$, использовались $\varepsilon_{s_X} = \varepsilon_{s_Y} = 0,7$ и $\varepsilon_{s_Z} = 0,65$.

Наконец, в модели (4) предполагается, что используемый пуассоновский процесс $P(u)$ имеет интенсивность $\lambda_u = 3/(6 \text{ мин})$, т. е. за время навигации 6 мин в среднем происходят три изменения постоянной средней скорости $(s_x, s_y, s_z)^T$, или среднее время между скачками равно 2 мин.

Во всех моделях движение в течение 6 мин моделировалось в дискретные моменты времени $t = 0, 1000$, которые отвечали разбиению интервала времени наблюдения с шагом дискретизации $\delta = 0,0001$ ч. Отсюда получается, что

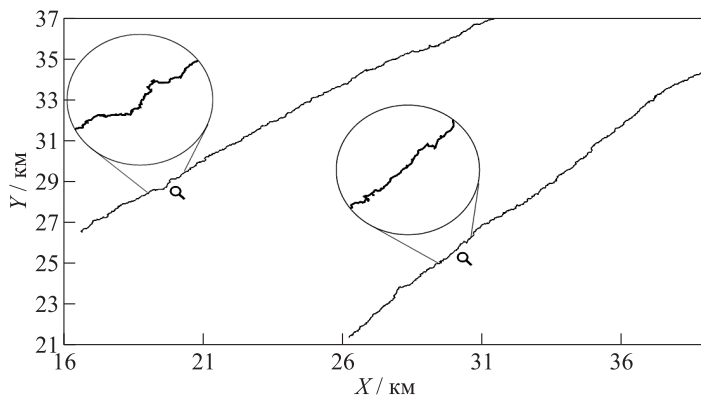


Рис. 1 Примеры траекторий моделей (2) и (3) в плоскости oxy

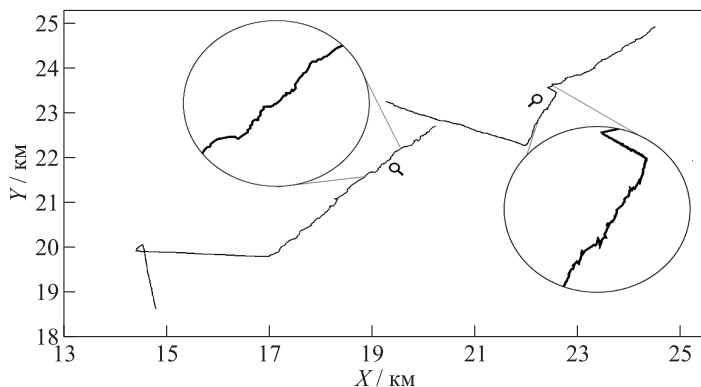


Рис. 2 Примеры траекторий модели (4) в плоскости oxy

навигационная задача решалась в течение $0,1 \text{ ч} = 6 \text{ мин}$. При абсолютной постоянной средней скорости 212 км/ч за это время БПЛА в среднем перемещался на расстояние порядка 21 км , приближаясь к началу координат. Максимальное расстояние в момент обнаружения БПЛА $t = 0$ до цели составляло $\approx 57 \text{ км}$, минимальное расстояние $\approx 28 \text{ км}$.

Примеры смоделированных в эксперименте траекторий приведены на рис. 1 (для моделей (2) и (3)) и на рис. 2 (для модели (4)). Визуально отличия на рис. 1 между динамиками (2) и (3) заметны слабо, но качественно можно отметить, что хаотические маневры в (2) и (3) становятся более регулярными и траектории с меньшими скоростями в целом приобретают более гладкий характер. Отличия на рис. 2 очевидны. Если не знать заранее, что модель (4) вполне аналогична моделям (2) и (3), то догадаться об их сходстве затруднительно. При этом

ясно, что разнообразие траекторий (4) при одинаковой общей направленности с простыми моделями гораздо больше.

7 Заключение

Предложенные в статье модели движения могут быть использованы в широком спектре сценариев навигации автономных движущихся аппаратов в качестве универсальных уравнений состояния стохастической динамической системы наблюдения в постановке задачи фильтрации. При этом надо отметить, что при кажущейся простоте, снимающей многие вопросы отсутствия априорной информации о характере движения неизвестного аппарата, для фильтрации предложенные модели довольно сложны, поскольку все-таки содержат ряд параметров, подлежащих идентификации. Эти параметры должны оцениваться параллельно с решением основной задачи оценки местоположения движущегося объекта, что способны делать далеко не все алгоритмы фильтрации. Но эффективные решения с успешной идентификацией есть (см., например, [16]), так что надеяться на применимость таких же фильтров в предложенных моделях можно. Для полностью исследования аналогичные универсальные модели должны быть предложены и для модели измерительного комплекса.

Литература

1. Дремлюга Г. П., Иванов Ю. Л. Беспилотные летательные аппараты: Состояние и тенденции развития. — М.: Варяг, 2004. 176 с.
2. Mohsan S. A. H., Khan M. A., Noor F., Ullah I., Alsharif M. H. Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review // Drones, 2022. Vol. 6. No. 6. Art. 147. 27 p. doi: 10.3390/drones6060147.
3. Autonomous underwater vehicles: Design and practice (radar, sonar & navigation) / Ed. F. Ehlers. — London, U.K.: SciTech Publishing, 2020. 592 p.
4. Burns L. D., Shulgan C. Autonomy: The quest to build the driverless car — and how it will reshape our world. — HarperCollins, 2018. 368 p.
5. Bar-Shalom Y., Li X.-R., Kirubarajan T. Estimation with applications to tracking and navigation: Theory, algorithms and software. — New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2002. 592 p. doi: 10.1002/0471221279.
6. Генике А. А., Побединский Г. Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. — М.: Картгеоцентр, 2004. 354 с. EDN: QKGWEB.
7. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS — Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. — Vienna: Springer, 2007. 518 p. doi: 10.1007/978-3-211-73017-1.
8. Hodges R. Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar. — New York, NY, USA: Wiley, 2011. 384 p.
9. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. AUV acoustic positioning methods // Gyroscopy Navigation, 2017. Vol. 8. P. 80–89. doi: 10.1134/S2075108717010059.

10. *Miller A., Miller B., Miller G.* AUV navigation with seabed acoustic sensing // Australian & New Zealand Control Conference Proceedings. — IEEE, 2018. P. 166–171. doi: 10.1109/ANZCC.2018.8606561.
11. *Miller A., Miller B., Miller G.* On AUV control with the aid of position estimation algorithms based on acoustic seabed sensing and DOA measurements // Sensors — Basel, 2019. Vol. 19. No. 24. Art. 5520. 21 p. doi: 10.3390/s19245520.
12. *Miller A., Miller B., Miller G.* Navigation of underwater drones and integration of acoustic sensing with onboard inertial navigation system // Drones, 2021. Vol. 5. No. 3. Art. 83. doi: 10.3390/drones5030083.
13. *Босов А. В.* Фильтрация состояния нелинейной динамической системы по наблюдениям со случайными запаздываниями // Автоматика и телемеханика, 2023. № 6. С. 49–66. doi: 10.31857/S000523102306003X. EDN: CSDMWT.
14. *Bosov A.* Tracking a maneuvering object by indirect observations with random delays // Drones, 2023. Vol. 7. No. 7. Art. 468. 17 p. doi: 10.3390/drones7070468.
15. *Босов А. В.* Оптимальная фильтрация состояния нелинейной динамической системы по наблюдениям со случайными запаздываниями // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 3. С. 8–17. doi: 10.14357/19922264230302. EDN: CFVYJM.
16. *Босов А. В.* Позиционирование и идентификация параметров движения подводного аппарата по наблюдениям со случайными запаздываниями // Автоматика и телемеханика, 2024. № 12. С. 23–48. doi: 10.31857/S0005231024120026. EDN: XUMKVA.
17. *Попова М. С., Стрижов В. В.* Выбор оптимальной модели классификации физической активности по измерениям акселерометра // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 1. С. 76–86. doi: 10.14357/19922264150107. EDN: TVXFFL.
18. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование процессов в динамических системах с цилиндрическими бесселевыми нелинейностями // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 4. С. 37–47. doi: 10.14357/19922264150404. EDN: TBABEC.
19. *Никишин Д. А.* Моделирование динамических геообъектов на основе концепции фазовой вариантности // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 2. С. 95–106. doi: 10.14357/08696527240207. EDN: GCJQET.
20. *Синицын И. Н.* Методы вероятностного и статистического моделирования неявных стохастических систем // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 48–66. doi: 10.14357/08696527240305. EDN: RTNRUZ.
21. *Кривенко М. П.* Моделирование входного потока рабочих нагрузок вычислительного кластера LANL Mustang // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 109–122. doi: 10.14357/08696527240308. EDN: FRSPMK.
22. *Урюпин И. В.* Разработка программного комплекса моделирования эффективности в авиатранспортной системе России // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 3. С. 136–146. doi: 10.14357/08696527240310. EDN: VMQRRH.

Поступила в редакцию 15.02.2025

Принята к публикации 15.04.2025

ON UNIVERSAL STATE MODELS FOR TRACKING AND NAVIGATION TASKS OF UNMANNED MOVING OBJECTS

I. V. Uryupin

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: To state most navigation problems, it is necessary to correctly formulate the problem of filtering the state of a stochastic dynamic system by indirect observations. If navigation is performed in a noncooperative scenario where the observed object and the measuring system do not interact, *a priori* information about the motion model is either limited to simple descriptions of the target and environmental conditions, or is absent altogether. For such cases, the article suggests several universal models that require minimum information about the parameters of a moving object. The models are based on simple motion at a constant speed. The lack of information about this speed complements navigation with the task of identifying it. The direction of movement is set to the average speed, which can vary from trajectory to trajectory, including depending on the coordinates of the object at the time of detection. The uncertainty of motion is modeled by several variants of additive (correlated and uncorrelated) disturbances that simulate chaotic motion while maintaining the general direction. A more complex model assumes a periodic change in the average speed of motion, which is analogous to motion with a piecewise constant velocity. Such changes in the motion model are modeled by the Poisson flow of events. It is noted that even in the presence of *a priori* information about this flow, the task of navigation is accompanied by an extremely difficult task of identification, since it is required to estimate the changed average speed over a short observation interval. Typical examples of calculated trajectories are given.

Keywords: navigation; target tracking; unmanned moving vehicles; stochastic dynamic observation system; additive disturbances; Markov chains; Poisson event flow

DOI: 10.14357/08696527250203

EDN: WRGXLN

Acknowledgments

The research was carried out using the infrastructure of the Shared Research Facilities “High Performance Computing and Big Data” (CKP “Informatics”) of FRC CSC RAS (Moscow).

References

1. Dremlyuga, G. P., and Yu. L. Ivanov. 2004. *Bespilotnye letatel'nye apparaty: Sostoyanie i tendentsii razvitiya* [Unmanned aerial vehicles: Status and development trends]. Moscow: Varyag. 176 p.

2. Mohsan, S. A. H., M. A. Khan, F. Noor, I. Ullah, and M. H. Alsharif. 2022. Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones* 6(6):147. 27 p. doi: 10.3390/drones6060147.
3. Ehlers, F., ed. 2020. *Autonomous underwater vehicles: Design and practice (radar, sonar & navigation)*. London, U.K.: SciTech Publishing. 592 p.
4. Burns, L. D., and C. Shulgan. 2018. *Autonomy: The quest to build the driverless car — and how it will reshape our world*. HarperCollins. 368 p.
5. Bar-Shalom, Y., X.-R. Li, and T. Kirubarajan. 2002. *Estimation with applications to tracking and navigation: Theory, algorithms and software*. New York, NY: John Wiley & Sons. 592 p. doi: 10.1002/0471221279.
6. Genike, A. A., and G. G. Pobedinskiy. 2004. *Global'nye sputnikovye sistemy opredeleniya mestopolozheniya i ikh primeneniye v geodezii* [Global satellite positioning systems and their application in geodesy]. Moscow: Kartgeotsentr. 354 p. EDN: QKGWEB.
7. Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and E. Wasle. 2007. *GNSS — Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Vienna: Springer. 518 p. doi: 10.1007/978-3-211-73017-1.
8. Hodges, R. 2011. *Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar*. New York, NY: Wiley. 384 p.
9. Kebkal, K. G., and A. I. Mashoshin. 2017. AUV acoustic positioning methods. *Gyroscopy Navigation* 8:80–89. doi: 10.1134/S2075108717010059.
10. Miller, A., B. Miller, and G. Miller. 2018. AUV navigation with seabed acoustic sensing. *Australian & New Zealand Control Conference Proceedings*. IEEE. 166–171. doi: 10.1109/ANZCC.2018.8606561.
11. Miller, A., B. Miller, and G. Miller. 2019. On AUV control with the aid of position estimation algorithms based on acoustic seabed sensing and DOA measurements. *Sensors — Basel* 19(24):5520. 21 p. doi: 10.3390/s19245520.
12. Miller, A., B. Miller, and G. Miller. 2021. Navigation of underwater drones and integration of acoustic sensing with onboard inertial navigation system. *Drones* 5(3):83. doi: 10.3390/drones5030083.
13. Bosov, A. V. 2023. Observation-based filtering of state of a nonlinear dynamical system with random delays. *Automat. Rem. Contr.* 84(6):671–684. doi: 10.1134/S0005117923060036. EDN: GVWEAB.
14. Bosov, A. 2023. Tracking a maneuvering object by indirect observations with random delays. *Drones* 7(7):468. 17 p. doi: 10.3390/drones7070468.
15. Bosov, A. V. 2023. Optimal'naya fil'tratsiya sostoyaniya nelineynoy dinamicheskoy sistemy po nablyudeniym so sluchaynymi zapazydvaniyami [Nonlinear dynamic system state optimal filtering by observations with random delays]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(3):8–17. doi: 10.14357/19922264230302. EDN: CFVYJM.
16. Bosov, A. V. 2024. AUV positioning and motion parameter identification based on observations with random delays. *Automat. Rem. Contr.* 85(12):1024–1040. doi: 10.1134/S0005117924700413. EDN: PLPFMZ.
17. Popova, M. S., and V. V. Strijov. 2015. Vybór optimal'noy modeli klassifikatsii fizicheskoy aktivnosti po izmereniyam akselerometra [Selection of optimal physical activity classification model using measurements of accelerometer]. *Informatika i ee*

- Primeneniya* — *Inform. Appl.* 9(1):76–86. doi: 10.14357/19922264150107. EDN: TVXFFL.
18. Sinitsyn, I. N. 2015. Analiticheskoe modelirovanie protsessov v dinamicheskikh sistemakh s tsilindricheskimi besselevymi nelineynostyami [Analytical modeling of processes in dynamical systems with cylindric Bessel nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya* — *Inform. Appl.* 9(4):37–47. doi: 10.14357/1992264150404. EDN: TBABEC.
 19. Nikishin, D. A. 2024. Modelirovanie dinamicheskikh geoob”ektov na osnove kontseptsii fazovoy variantnosti [An approach to modeling dynamic geoobjects based on the concept of phase variation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki* — *Systems and Means of Informatics* 34(2):95–106. doi: 10.14357/08696527240207. EDN: GCJQET.
 20. Sinitsyn, I. N. 2024. Metody veroyatnostnogo i statisticheskogo modelirovaniya neyavnykh stokhasticheskikh sistem [Probabilistic and statistical modeling methods for implicit stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki* — *Systems and Means of Informatics* 34(3):48–66. doi: 10.14357/08696527240305. EDN: RTNRUZ.
 21. Krivenko, M. P. 2024. Modelirovanie vkhodnogo potoka rabochikh nagruzok vychislitel’nogo klastera LANL Mustang [Modeling of the input flow of LANL Mustang computing cluster workloads]. *Sistemy i Sredstva Informatiki* — *Systems and Means of Informatics* 34(3):109–122. doi: 10.14357/08696527240308. EDN: FRSPMK.
 22. Uryupin, I. V. 2024. Razrabotka programmnoy kompleksa modelirovaniya effektivnosti v aviatransportnoy sisteme Rossii [Development of a software package for modeling efficiency in the Russian air transport system]. *Sistemy i Sredstva Informatiki* — *Systems and Means of Informatics* 34(3):136–146. doi: 10.14357/08696527240310. EDN: VMQRRH.

Received February 15, 2025

Accepted April 15, 2025

Contributor

Uryupin Ilya V. (b. 1993) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, junior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; uryupin93@yandex.ru

БЕЗЫЗБЫТОЧНОЕ САМОСИНХРОННОЕ КОДИРОВАНИЕ: РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО КАНАЛА

*Ю. А. Степченко*¹

Аннотация: Рассматривается возможность организации безызыточного самосинхронного (СС) кодирования и схемотехнический базис реализации цифровых СС-схем с трехуровневым кодированием информационных сигналов, основанным на использовании биполярного питания. Рассматриваемый способ кодирования отвечает требованию реализации СС-кода и обеспечивает корректную передачу параллельной информации между компонентами системы (приемо-передающими устройствами и каналами связи) независимо от значений временных задержек, вносимых ими. Рассматриваемый способ СС-кодирования безызыточен, поскольку ширина такого информационного СС-канала (число разрядов) в точности совпадает с шириной информационного канала в синхронном информационном канале. В СС-схемах трехуровневое кодирование информационных сигналов вместо традиционного парафазного позволяет избавиться от необходимости дуализации логических функций, выполняемых схемой, и вдвое сокращает число элементов комбинационной логики. Однако оно усложняет схемотехническую реализацию каждого элемента и требует использования дополнительного источника питания с отрицательным напряжением. Меньшее число информационных сигналов в трехуровневых СС-схемах облегчает их топологическую реализацию. Однако необходимость в отрицательном питании затрудняет их использование в типовой цифровой аппаратуре, а более сложный технологический процесс их изготовления, предусматривающий реализацию в едином цикле комплементарных металл–оксид–полупроводник (МОП) транзисторов с индуцированным и встроенным каналом и с разными пороговыми напряжениями, удорожает их производство. Рассмотренные схемотехнические решения на базе биполярного питания могут быть использованы и в синхронной схемотехнике в двух вариантах исполнения: с традиционным бинарным кодированием (1, 0) для повышения уровня сбоеустойчивости и троичным кодированием (+1, 0, –1) для повышения эффективности представления данных.

Ключевые слова: самосинхронное кодирование; избыточность кода; самосинхронная схема; биполярное питание; трехуровневое кодирование; КМОП

DOI: 10.14357/08696527250204

EDN: YPJPSL

1 Введение

Самосинхронные схемы образуют подкласс асинхронных схем [1, 2]. Они имеют давнюю историю. С момента рождения [3] и по настоящее время они служат

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, YStepchenkov@ipiran.ru

предметом активных научных исследований [4–11]. Благодаря независимости поведения от задержек в элементах и цепях схемы, СС-схемы имеют существенные преимущества в сравнении с синхронными аналогами. Они обладают в несколько раз более широким диапазоном работоспособности по напряжению питания и температуре окружающей среды [6] и намного устойчивее к воздействию логических сбоев [9].

Основной недостаток СС-схем — избыточность аппаратных затрат в сравнении с синхронными аналогами [8]. Причины этого:

- избыточное кодирование информационных сигналов;
- наличие индикаторной подсхемы, формирующей сигнал подтверждения успешного завершения переключения СС-схемы в очередную фазу работы.

Избыточное кодирование необходимо для обеспечения независимости поведения устройств от значений временных задержек, вносимых компонентами системы, и возможности приемного устройства определить факт установки достоверных значений входных данных.

Благодаря наличию индикаторной подсхемы, обеспечивающей проверку окончания переключения схемы, СС-схема обнаруживает и локализует константные неисправности и обладает более высокой иммунностью к логическим сбоям, что обеспечивает надежность ее функционирования.

С одной стороны, СС-схема работает настолько быстро, насколько позволяют реальные задержки переключения логических элементов и распространения сигналов по трассам межсоединений в текущих условиях эксплуатации. С другой стороны, необходимость ожидания окончания переключения не только функциональной схемы, но и ее индикаторной подсхемы увеличивает длительность цикла обработки данных, что снижает быстродействие СС-схемы в сравнении с синхронным аналогом, хотя в большинстве случаев незначительно, а при небольшой разрядности цифровой схемы ее СС-реализация показывает даже лучшую производительность, чем синхронный аналог [8].

На начальном этапе становления самосинхронной тематики в России и в ИПИ РАН, в частности, в работах [4, 5, 12] отмечалось, что, несмотря на очевидные преимущества СС-способа организации взаимодействия между компонентами компьютерных систем, он продолжает оставаться вне интересов ведущих производителей средств компьютерной техники. И одна из основных причин такого критического отношения — избыточное (СС) кодирование тракта данных, которое приводит к удвоению числа их контактов в системных и локальных интерфейсах, что считается критическим параметром при проектировании компьютерных систем.

Избыточное кодирование информационных сигналов в СС-схеме приводит к увеличению не только аппаратных затрат, но и суммарной паразитной емкости трасс межсоединений, поскольку число информационных цепей удваивается. В связи с этим актуальным становится поиск альтернативных способов

СС-кодирования, обеспечивающих СС-обмен информацией без увеличения числа сигнальных цепей.

Одним из способов решения проблемы избыточности кодирования информации служит многоуровневое кодирование [13, 14]. Наиболее распространено трехуровневое кодирование [15, 16]. Данная статья рассматривает особенности реализации СС-схем с таким кодированием и оценивает целесообразность его применения в СС-схемах.

2 Избыточность кодовой системы

Известно, что избыточность кодовой системы может быть оценена по формуле:

$$R = \frac{N - N_0}{N} = 1 - \frac{N_0}{N},$$

где N — число разрядов, используемых в рассматриваемой кодовой системе для передачи любого позиционного кода; N_0 — число разрядов в кодовой системе для передачи любого позиционного кода, не содержащей кодовой избыточности.

Наиболее полная информация об избыточности в возможных двоичных СС-кодах приведена в работе [12] (см. табл. 1, в которой n — любой позиционный двоичный код длины n ; ПКС — парафазный код со спейсером; КИ — код с идентификатором; ОРК — оптимальный равновесный код; 1-из- N — СС-код, в котором каждому позиционному коду соответствует только одна единица в этом коде¹).

Из табл. 1 видно, что при $n = 2$ коэффициент избыточности у всех представленных кодовых систем одинаков ($R = 0,5$). По мере увеличения разрядности (длины n) избыточность кодовых систем КИ и ОРК падает и для $n = 16$ у ОРК достигает минимума ($R_{ОРК} = 0,158$). Несмотря на столь низкую избыточность они не нашли применения в схемотехнической практике, поскольку процедуры их кодирования и декодирования слишком аппаратно-затратны.

Таблица 1 Избыточность СС-систем кодирования

n	$R_{ПКС}$	$R_{КИ}$	$R_{ОРК}$	$R_{1-из-N}$
1	2	3	4	5
2	0,5	0,500	0,500	0,500
3		0,400	0,400	0,625
4		0,429	0,333	0,750
...		...	...	...
16		0,238	0,158	~ 1

¹Рассмотрение специфики каждого из этих СС-кодов остается за рамками данной статьи.

Система кодирования 1-из- N характеризуется рядом достоинств: низкими аппаратными затратами на процесс кодирования/декодирования и реализацию индикаторной подсхемы, формирующей сигнал установки и сброса данных в информационном канале. Поскольку данные кодируются только одной логической единицей в передаваемом коде, то энергетические затраты минимальны, а потребление энергии почти одинаково для разных N наборов. Уменьшение числа активно переключающихся проводов в конвейере 1-из- N повышает его энергоэффективность. Однако использование большого N плохо сказывается на эффективности использования площади из-за логарифмической зависимости между N и числом информационных бит в коде 1-из- N . В практических асинхронных реализациях N обычно меньше 5 [17].

Относительно небольшие затраты на кодирование/декодирование кода ПКС и индикаторной подсхемы, его приемлемый уровень избыточности, который не зависит от размера N , предопределили его широкое использование в СС схемотехнической практике.

Кодирование информационных сигналов в комбинационных схемах, как правило, парафазное со спейсером. В последовательностных схемах кодирование может быть парафазным со спейсером, бифазным с сигналом управления или унарным (одионый, непарный сигнал) с сопровождающим его сигналом управления. Парафазное кодирование сигнала реализует любой информационный сигнал, несущий бит информации, двумя сигналами, называемыми компонентами парафазного сигнала (ПФС). В результате число информационных сигналов и логических элементов в схеме удваивается.

Любой ПФС (X, XB) имеет два рабочих состояния («10» и «01») и одно спейсерное состояние («11» или «00») [12], что позволяет достаточно просто детектировать текущее состояние ПФС. Традиционно для этого используются логические элементы 2ИЛИ-НЕ/2И-НЕ (для нулевого/единичного спейсера).

Таким образом, при стандартном двухуровневом питании цифровой схемы (положительное напряжение питания и общая шина — «земля») две компоненты ПФС играют двоякую роль. С одной стороны, они обеспечивают возможность детектировать текущую фазу ПФС и сформировать сигнал подтверждения переключения СС-схемы в рабочую фазу или спейсер, а также определяют значение бита информации, несомого данным ПФС в рабочей фазе. С другой стороны, из-за этого растет число сигналов как внутри СС-схемы, так и в ее интерфейсе с соседними СС-схемами.

Альтернативный подход к кодированию информационных сигналов предполагает использование многоуровневого (как минимум, трехуровневого) питания. Например, помимо положительного питания V_{DD} и «земли» (Gnd) используется отрицательное питание V_{SS} или промежуточный уровень между V_{DD} и Gnd.

Безыбыточность кодирования для СС-схемы в этом случае может быть получена за счет использования среднего уровня между положительным и отрицательным питанием в качестве спейсерного значения информационного сигнала. Использование внешнего источника, поддерживающего средний уровень между

двумя напряжениями питания, позволяет рассматривать троичное кодирование унарного сигнала (V_{DD} , Gnd , V_{SS}) в качестве альтернативы ПФС.

Преимущества трехуровневого СС-кодирования очевидны:

- пропадает необходимость в дуализации системы логических функций при переходе от синхронной схемы к ее СС-реализации, поскольку три значения унарного сигнала позволяют отобразить и два рабочих состояния, и спейсерное;
- сокращается число трасс межсоединений в реализации СС-схемы.

Трехуровневое СС-кодирование принципиально отличается от известного троичного кодирования информации в синхронных схемах [17–21], используемого для минимизации разрядности обрабатываемых чисел. Оценим эффективность его применения в СС-схемах.

3 Базовые трехуровневые самосинхронные элементы

Рассмотрим проблему разработки СС-схемы, изготавливаемой по типовому технологическому процессу «комплементарный металл – оксид – полупроводник» (КМОП) и использующей трехуровневое кодирование информационных сигналов. Пусть логическая «1» в рабочей фазе соответствует V_{DD} , логический «0» — V_{SS} , а спейсер — уровню Gnd .

Схемотехническая реализация трехуровневой логики исследовалась в базе традиционной КМОП-технологии [14, 16] и полупроводниковых приборов, появившихся в последнее десятилетие [13]. В настоящее время, однако, преобладающее положение занимает КМОП-технология, в рамках которой компонентным базисом служат разновидности полевых транзисторов.

Использование для реализации трехуровневых СС-схем типового КМОП-процесса накладывает некоторые ограничения на выбор схемотехнических решений для трехуровневой логики. При спейсерном значении сигналов на входе КМОП-схемы с биполярным питанием транзисторы с каналом n -типа проводимости будут находиться в открытом состоянии, если выполняется соотношение

$$V_{SS} < -U_{пор.n}, \quad (1)$$

где $U_{пор.n}$ — пороговое напряжение отпирания транзистора n -типа, а транзисторы p -типа будут находиться в открытом состоянии, если выполняется соотношение

$$V_{DD} > U_{пор.p}, \quad (2)$$

где $U_{пор.p}$ — пороговое напряжение транзистора p -типа. Поскольку условия (1) и (2) выполняются одновременно, в схеме потечет сквозной ток, увеличивая энергопотребление схемы.

В рамках типового технологического процесса доступны КМОП-транзисторы с каналом n - и p -типа, отличающиеся пороговым напряжением. Использование

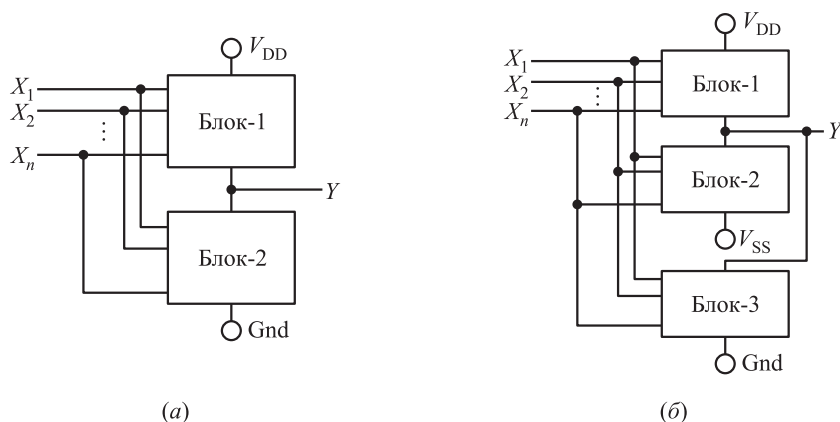


Рис. 1 КМОП-схемы: (а) с однополярным питанием; (б) с биполярным питанием

транзисторов с высокими порогами решает в принципе проблему реализации трехуровневого СС-кодирования в схеме на КМОП-транзисторах, но замедляет работу схемы. Кроме того, в отличие от стандартных КМОП-схем с однополярным питанием схема с биполярным питанием и троичным кодированием должна передавать на выход логического элемента любой из трех уровней напряжения в зависимости от значений входных сигналов. В стандартной схеме на КМОП-транзисторах с однополярным питанием транзисторы p -типа (блок-1 на рис. 1, а) коммутируют питание V_{DD} на выход элемента Y , а транзисторы n -типа (блок-2 на рис. 1, а) — нулевой потенциал (Gnd) [22]. При этом, как правило, все транзисторы одного типа имеют одинаковое пороговое напряжение. Транзисторы с пониженным порогом используются для повышения быстродействия, а транзисторы с увеличенным порогом — для повышения помехоустойчивости схемы.

Структурное представление трехуровневой схемы с биполярным питанием и троичным кодированием показано на рис. 1, б. В нем блок-2 коммутирует на выход Y отрицательное питание V_{SS} , а нулевой уровень Gnd коммутируется блоком-3. Необходимое условие работоспособности схемы на рис. 1, б: при любой комбинации значений входов $X_1, \dots, X_n$ только один из трех уровней (V_{DD} , Gnd , V_{SS}) коммутируется на выход Y . Оно обеспечивается с помощью использования КМОП-транзисторов соответствующего типа для реализации блоков 1–3:

- p -типа с индуцированным каналом и высоким порогом для блока-1;
- n -типа с индуцированным каналом и высоким порогом для блока-2;
- p - и n -типа со встроенным каналом для блока-3.

В качестве примера на рис. 2, а приведена схема инвертора с биполярным питанием и трехуровневым кодированием сигналов [14]. Здесь 1thDN — транзистор со встроенным n -каналом и одинарным пороговым напряжением; 1thDP —

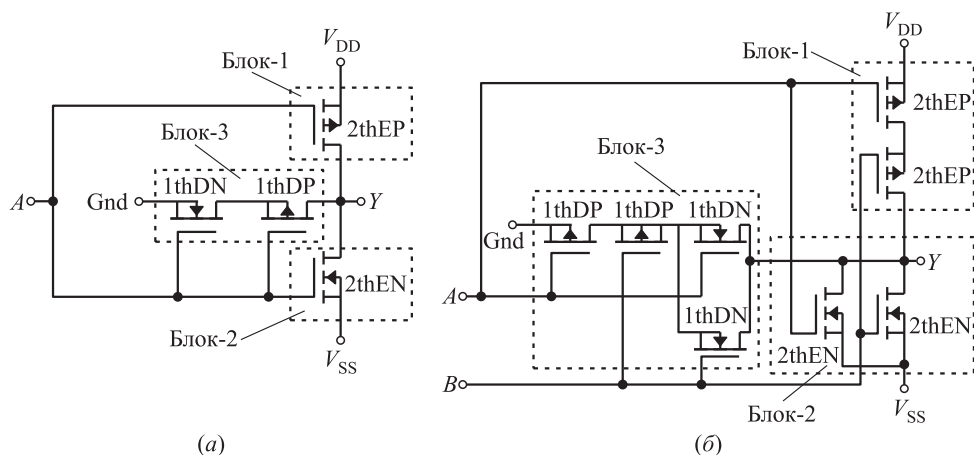


Рис. 2 Схемы с трехуровневым кодированием сигналов: (а) инвертор; (б) элемент 2ИЛИ-НЕ

транзистор со встроенным p -каналом и одинарным пороговым напряжением; 2thEN (2thEP) — транзисторы с индуцированным n -(p -)каналом и удвоенным пороговым напряжением.

На рис. 3, а показана аналогичная схема элемента 2И-НЕ [14]. Анализ схем на рис. 2 и 3 позволяет сделать следующие выводы:

- число КМОП-транзисторов, необходимых для реализации логической функции в виде схемы с трехуровневым кодированием, удваивается в сравнении с аналогичной реализацией функции с бинарным кодированием сигналов;
- схема блока-3 структурно повторяет суммарную схему блоков 1 и 2, но на транзисторах со встроенным каналом n - и p -типа вместо индуцированного канала;
- любой логический элемент с бинарным кодированием входов и выхода может быть преобразован в элемент с трехуровневым кодированием выводов с помощью формализованного метода, показанного на рис. 3, б;
- блок-3 на рис. 1, б замещается конкатенацией реплик блока-1 и блока-2 способом, показанным на рис. 3, б;
- транзисторы с индуцированным каналом (ИК) в репликах блоков 1 и 2 замещаются транзисторами с встроенным каналом (ВК) того же типа проводимости.

Таким образом, для корректной реализации схемы с трехуровневым кодированием информационных сигналов необходим технологический процесс, который позволяет реализовать в микросхеме КМОП-транзисторы с каналом разного типа: индуцированным и встроенным. В литературе исследовались также схемотехнические решения, опирающиеся на использование транзисторов только

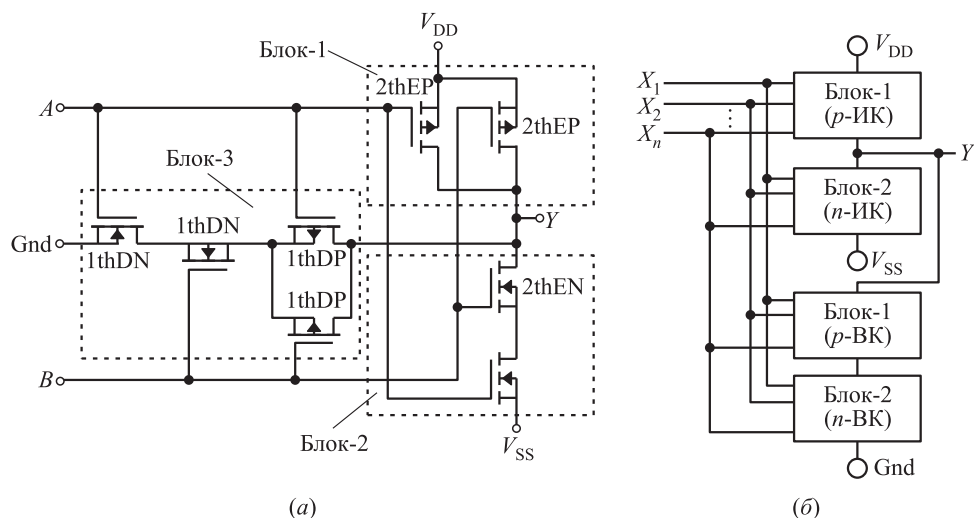


Рис. 3 Трехуровневое кодирование сигналов: (а) элемент 2И-НЕ; (б) формализованный метод реализации

с ИК (см., например, [23]). Но получающиеся при этом схемы оказываются аппаратно-затратными, медленными и энергопотребляющими.

Самосинхронные схемы обязаны индиферентизировать переключения сигналов из рабочего состояния (логической единицы или логического нуля) в спейсер и обратно. Вопросы реализации индикаторной подсхемы для случая трехуровневого кодирования информационных сигналов будут представлены в следующей статье.

4 Сравнение трехуровневых и двухуровневых самосинхронных схем

Сравнение схемотехнических реализаций базовых элементов и структурных организаций двухуровневых и трехуровневых СС-схем показывает следующее:

- трехуровневые схемы требуют более сложного технологического процесса для своей реализации, обеспечивающего в едином технологическом цикле изготовление транзисторов с индуцированным каналом и встроенным каналом с разными пороговыми напряжениями;
- использование отрицательного питания в трехуровневых схемах наряду с традиционным положительным питанием представляет собой определенную трудность для практического применения, связанную с необходимостью подключения к схеме двух источников напряжения;
- схемы трехуровневых логических элементов в два раза сложнее по числу транзисторов, чем двухуровневые СС-схемы. Однако из-за использования

унарных информационных сигналов вместо парафазных сложность реализации одного элемента нивелируется меньшим в два раза числом этих элементов;

- традиционно уровень помехоустойчивости в цифровых схемах определяется разностью между напряжениями, соответствующими разным состояниям сигналов. С этой точки зрения уровень помехоустойчивости трехуровневых и двухуровневых СС-схем одинаков. При одинаковом положительном питании и равенстве $V_{DD} = |V_{SS}|$ перепады напряжений между состояниями информационных и управляющих сигналов в СС-схемах обоих типов одинаковы. С другой стороны, уменьшение в два раза числа линий в информационном тракте снижает уровень внутренних помех, генерируемых в сигнальных шинах из-за их перекрестного паразитного взаимодействия, и уменьшает вероятность возникновения помех от внешних факторов. В связи с этим можно предполагать, что при прочих равных условиях уровень помехоустойчивости трехуровневых СС-схем несколько выше, чем уровень помехоустойчивости двухуровневых СС-схем;
- по энергопотреблению трехуровневые и двухуровневые СС-схемы также находятся на одном уровне при равенстве $V_{DD} = |V_{SS}|$ и примерном равенстве паразитных емкостей в цепях схемы. В трехуровневых схемах информационный сигнал имеет такие же перепады уровней при переключении из спейсера в рабочую фазу и обратно, что и в двухуровневых схемах, а поскольку в двухуровневых СС-схемах при межфазовых переходах переключается лишь одна компонента ПФС, то и энергия переключения оказывается примерно одинаковой.

Таким образом, главным преимуществом трехуровневых СС-схем является в два раза меньшее число информационных сигналов. В топологической реализации за счет этого упрощается трассировка цепей схемы и уменьшается число контактов в разъемах локальных и системных интерфейсов. По аппаратным затратам трехуровневые СС-схемы практически эквивалентны двухуровневым СС-схемам.

Основные недостатки трехуровневых СС-схем: необходимость в двух источниках питания (положительном и отрицательном) и трех шинах питания (V_{DD} , V_{SS} и Gnd) в топологической реализации схемы. Необходим также более сложный технологический процесс их изготовления, предусматривающий реализацию КМОП-транзисторов одновременно с ИК и ВК и с разными пороговыми напряжениями.

5 Возможное использование и варианты развития трехуровневого кодирования

Рассмотренные выше схемотехнические реализации трехуровневого кодирования могут быть использованы не только в рамках СС-схемотехники, но и в рамках синхронной схемотехники.

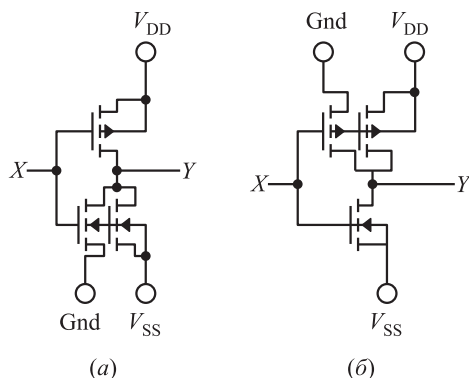


Рис. 4 Два варианта реализации инвертора на многопороговых КМОП-транзисторах

Таблица 2 Функционирование многопороговых инверторов

Схема	X	Y
Рис. 4, а и 4, б	V_{DD}	V_{SS}
	Gnd	Gnd
	V_{SS}	V_{DD}

больший диапазон изменения потенциала на сигнальной шине ($V_{DD}-V_{SS}$) повышает помехоустойчивость синхронной схемы.

Другой вариант предполагает использование в синхронной схеме троичного кодирования на базе биполярного питания, в которой логическому уровню «+1» будет соответствовать высокий уровень питающего напряжения (V_{DD}), «-1» — отрицательному уровню питающего напряжения (V_{SS}), а «0» — уровню «Земля» (Gnd).

Использование троичного кодирования для представления данных с одинаковой точностью позволяет в 1,58 раза уменьшить число троичных разрядов по сравнению с двоичным кодированием.

За счет совершенствования транзисторных структур возможно существенное сокращение аппаратных затрат на реализацию СС-схем, например за счет «использования нового схемотехнического компонента — многопорогового транзистора. Его применение позволило бы упростить схемотехническую и топологическую реализации СС-схем и за счет этого дополнительно увеличить их помехо- и сбоеустойчивость» [24].

На рис. 4 (рис. 3, б и 3, в из [24]) представлены два варианта реализации инвертора на многопороговых транзисторах, которые функционируют в соответствии с табл. 2.

Использование многопороговых МОП-транзисторов требует изменения стандартного технологического маршрута изготовления КМОП СБИС (сверхбольшой

Первый вариант предполагает использование двоичного кодирования на базе биполярного питания в синхронной схеме, в которой «земля» не используется как выделенная шина, а вместо нее используется шина отрицательного питания. Получающийся

ших интегральных схем). Кроме этого, снижается помехоустойчивость схемы вследствие повышенной чувствительности к потенциалу на затворе многопорогового транзистора. Поэтому целесообразность применения многопороговых транзисторов в цифровых схемах для реализации многоуровневого кодирования требует дополнительных исследований.

6 Выводы

Применение трехуровневых СС-схем сокращает в два раза число информационных сигналов в СС-схеме и, с одной стороны, упрощает разводку сигнальных цепей в топологической реализации схемы, а с другой стороны, требует разводки в топологии трех шин питания: положительного, отрицательного и «земли».

Аппаратные затраты по числу транзисторов комбинационных и индикаторных частей СС-схемы с трехуровневым кодированием практически совпадают с аппаратными затратами двухуровневых СС-схем с парафазным кодированием. Можно предположить, что реализация трехуровневых последовательностных СС-схем (триггеров, счетчиков, регистров хранения и сдвига) по аппаратным затратам окажется также аналогичной двухуровневой реализации. Однако этот вопрос нуждается в дополнительном исследовании.

Если уровень энергопотребления трехуровневых СС-схем и двухуровневых СС-схем примерно одинаков, то уровень сбоеустойчивости схем на базе безызбыточного кодирования выше по сравнению с традиционными СС-схемами на базе избыточного парафазного кода со спейсером. Это особенно актуально при реализации крупномасштабных коммуникаций в рамках сетей на кристалле.

Необходимость использования в трехуровневых СС-схемах транзисторов разного типа (с ИК и ВК) и с разными пороговыми напряжениями предъявляет дополнительные требования к технологическому процессу изготовления СС-схем и делает его более дорогим.

Литература

1. *Varshavsky V., Kishinevsky M., Marakhovsky V., Peschansky V.A.* Self-timed control of concurrent processes. — Amsterdam: Kluwer Academic Publs., 1990. 245 p. doi: 10.1007/978-94-009-0483-3.
2. *Sparsø J.* Introduction to asynchronous circuit design. — Copenhagen, Denmark: DTU Compute, Technical University of Denmark, 2020. 255 p. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/215895041/JSPA_async_book_2020_PDF.pdf.
3. *Muller D., Bartky W.* A theory of asynchronous circuits // Symposium (International) on the Theory of Switching Proceedings. — Harvard University Press, 1959. Vol. 1. P. 204–243.
4. *Мизин И. А., Филин А. В.* Принципиальная база архитектуры естественно надежных компьютеров // Системы и средства информатики, 1995. № 7. С. 172–197.

5. Мизин И. А., Филин А. В. Самосинхронизация — естественный путь обеспечения долгоживучести интегральных схем // Системы и средства информатики, 1999. № 9. С. 242–247.
6. Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Горелкин Ю. А. Самосинхронные схемы — будущее микроэлектроники // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника, 2011. № 2. С. 153–184.
7. Соколов И. А., Степченко Ю. А., Бобков С. Г., Захаров В. Н., Дьяченко Ю. Г., Рождественский Ю. В., Сурков А. В. Базис реализации супер-ЭВМ эксафлопсного класса // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 1. С. 45–70. doi: 10.14357/19922264140106. EDN: RYYFGD.
8. Zakharov V., Stepchenkov Y., Diachenko Y., Rogdestvenski Y. Self-timed circuitry retrospective // Conference (International) on Engineering Technologies and Computer Science Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020. P. 63–69. doi: 10.1109/EnT48576.2020.00018.
9. Соколов И. А., Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Морозов Н. В., Степченко Д. Ю., Дьяченко Д. Ю. Анализ сбоеустойчивости самосинхронного конвейера // Системы и средства информатики, 2022. Т. 32. № 4. С. 4–13. doi: 10.14357/08696527220401. EDN: NXADJN.
10. Соколов И. А., Степченко Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Рождественский Ю. В. Оценка надежности синхронного и самосинхронного конвейеров // Информатика и её применения, 2022. Т. 16. Вып. 4. С. 2–7. doi: 10.14357/19922264220401. EDN: GWXJHM.
11. Diachenko Y., Stepchenkov Y., Khilko D. Self-timed counter synthesis // Conference (International) on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024. P. 837–842. doi: 10.1109/icieam60818.2024.10553896.
12. Варшавский В. И., Кишиневский М. А., Мараховский В. Б. и др. Автоматное управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах / Под ред. В. И. Варшавского. — М.: Наука, 1986. 398 с.
13. Gaudet V. A survey and tutorial on contemporary aspects of multiple-valued logic and its application to microelectronic circuits // IEEE J. Em. Sel. Top. C., 2016. Vol. 6. No. 1. P. 5–12. doi: 10.1109/jetcas.2016.2528041.
14. Sandhie Z. T. Multiple-valued logic: technology and circuit implementation: Diss. — Kansas City, MO, USA: University of Missouri-Kansas City, 2021. 122 p.
15. Кушниренко А. Н. Тройный дизъюнктор на МДП-транзисторах. Авт. свид. SU1707757 A1 с приоритетом от 27.07.87. Опубл. 23.01.1992, бюл. № 3. EDN: CASHOD.
16. Макаров Д. А. Исследование трехуровневых логических устройств: Дипломная работа. — СПб.: ГУАП, 2000. 160 с.
17. Bainbridge J., Furber S. Chain: A delay-insensitive chip area interconnect // IEEE Micro, 2002. Vol. 22. No. 5. P. 16–23. doi: 10.1109/MM.2002.1044296.
18. Mariani R., Roncella R., Saletti R., Terreni P. On the realisation of delay-insensitive asynchronous circuits with CMOS ternary logic // 3rd Symposium (International) on Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997. P. 54–62. doi: 10.1109/ASYNC.1997.587152.

19. Кушнеров А. Троичная цифровая техника: ретроспектива и современность. — Беэр-Шева, Израиль: Ун-т им. Бен-Гуриона, 2005. 15 с. doi: 10.13140/RG.2.2.10382.00327.
20. Плеханов Л. П. Основы самосинхронных электронных схем. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 208 с. EDN: SUMKIV.
21. Dhande A. P., Ingole V. T., Ghiye V. R. Ternary digital system: Concepts and applications. — SM Online Pubs. LLC, 2014. 131 p.
22. Кармазинский А. Н. Синтез принципиальных схем цифровых элементов на МДП-транзисторах. — М.: Радио и связь, 1983. 256 с.
23. Коротков А. С., Морозов Д. В., Пилипко М. М. Базовый троичный логический элемент на основе стандартной МОП технологии // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2008. № 1. С. 466–471. EDN: MQJBFV.
24. Зацаринный А. А., Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Рождественский Ю. В. Самосинхронные схемы как база создания высоконадежных высокопроизводительных компьютеров следующего поколения // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 2020. Т. 23. № 4. С. 277–281. doi: 10.17073/1609-3577-2020-4-277-281.

Поступила в редакцию 06.02.2025

Принята к публикации 15.04.2025

NONREDUNDANT SELF-TIMED CODING: IMPLEMENTATION OF THE INFORMATION CHANNEL

Yu. A. Stepchenkov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The article considers the possibility of organizing nonredundant self-timed (ST) coding and the circuit design basis for implementing digital ST circuits with three-level coding of information signals based on the use of bipolar power supply. The considered coding method meets the requirement for implementing the ST code and ensures correct transmission of parallel information between the system components (receiving and transmitting devices and communication channels) regardless of the values of time delays introduced by them. The considered ST coding method is nonredundant, since the width of such an information ST channel (the number of bits) exactly coincides with the width of the information channel in the synchronous information channel. In ST circuits, three-level coding of information signals instead of the traditional paraphase allows one to get rid of the need for dualization of the logical functions performed by the circuit and halves the number of combinational logic cells. However, it complicates the circuit design of each cell and requires the use of an additional negative power supply. A smaller number of information signals in three-level ST circuits facilitates their layout implementation. However,

the need for negative power supply complicates their use in typical digital equipment and a more complex technological process of their manufacture which provides for the implementation in a single cycle of CMOS (complementary metal–oxide semiconductor) transistors with an induced and built-in channel and with different threshold voltages, makes their production more expensive. The considered circuit solutions based on bipolar power supply can also be used in synchronous circuit design in two versions: traditional binary coding (1, 0) to increase the level of fault tolerance and ternary coding (+1, 0, –1) to increase the efficiency of data representation.

Keywords: self-timed coding; code redundancy; self-timed circuit; bipolar supply; three-level coding; CMOS

DOI: 10.14357/08696527250204

EDN: YPJPSL

References

1. Varshavsky, V. I., M. A. Kishinevsky, V. B. Marakhovsky, and V. A. Peschansky. 1990. *Self-timed control of concurrent processes*. Kluwer Academic Publs. 245 p. doi: 10.1007/978-94-009-0483-3.
2. Sparsø, J. 2020. *Introduction to asynchronous circuit design*. Copenhagen, Denmark: DTU Compute, Technical University of Denmark. 255 p. Available at: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/215895041/JSPA_async_book_2020_PDF.pdf (accessed April 9, 2025).
3. Muller, D. E., and W. C. Bartky. 1959. A theory of asynchronous circuits. *Symposium (International) on the Theory of Switching Proceedings*. Harvard University Press. 1:204–243.
4. Mizin, I. A., and A. V. Filin. 1995. Printsipial'naya baza arkhitektury estestvenno nadezhnykh komp'yutеров [Fundamental basis of the architecture of naturally reliable computers]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 7:172–197.
5. Mizin, I. A., and A. V. Filin. 1999. Samosinkhronizatsiya — estestvennyy put' obespecheniya dolgozhivuchesti integral'nykh skhem [Self-synchronization is a natural way to ensure the longevity of integrated circuits]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 9:242–247.
6. Stepchenkov, Yu. A., Yu. G. Diachenko, and Yu. A. Gorelkin. 2011. Samosinkhronnye skhemy — budushchee mikroelektroniki [Self-synchronous circuits are the future of microelectronics]. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Elektronnyaya vychislitel'naya tekhnika* [Questions of Radio Electronics. Electronic Computer Engineering ser.] 2:153–184. EDN: NZHCBV.
7. Sokolov, I. A., Yu. A. Stepchenkov, S. G. Bobkov, V. N. Zakharov, Yu. G. Diachenko, Yu. V. Rogdestvenski, and A. V. Surkov. 2014. Basis realizatsii super-EVM eksaflopsnogo klassa [Implementation basis of exaflops class supercomputer]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(1):45–70. doi: 10.14357/19922264140106. EDN: RYYFGD.
8. Zakharov, V., Y. Stepchenkov, Y. Diachenko, and Y. Rogdestvenski. 2020. Self-timed circuitry retrospective. *Conference (International) on Engineering Technologies*

- and *Computer Science Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 63–69. doi: 10.1109/EnT48576.2020.00018.
9. Sokolov, I. A., Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, N. V. Morozov, D. Yu. Stepchenkov, and D. Yu. Diachenko. 2022. Analiz sboeustoychivosti samosinkhronnogo konveyera [Self-timed pipeline’s soft error tolerance analysis]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(4):4–13. doi: 10.14357/08696527220401. EDN: NXADJN.
 10. Sokolov, I. A., Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, and Yu. V. Rogdestvenski. 2022. Otsenka nadezhnosti sinkhronnogo i samosinkhronnogo konveyerov [Synchronous and self-timed pipeline’s reliability estimation]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 16(4):2–7. doi: 10.14357/1992264220401. EDN: GWXJHM.
 11. Diachenko, Y., Y. Stepchenkov, and D. Khilko. 2024. Self-timed counter synthesis. *Conference (International) on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 837–842. doi: 10.1109/icieam60818.2024.10553896.
 12. Varshavskiy, V. I., M. A. Kishinevskiy, V. B. Marakhovskiy, et al. 1986. *Avtomatnoe upravlenie asinkhronnymi protsessami v EVM i diskretnykh sistemakh* [Automata control of asynchronous processes in computers and discrete systems]. Ed. V. I. Varshavskiy. Moscow: Nauka. 398 p.
 13. Gaudet, V. 2016. A survey and tutorial on contemporary aspects of multiple-valued logic and its application to microelectronic circuits. *IEEE J. Em. Sel. Top. C.* 6(1):5–12. doi: 10.1109/jetcas.2016.2528041.
 14. Sandhie, Z. T. 2021. Multiple-valued logic: Technology and circuit implementation. Kansas City, MO: University of Missouri-Kansas City. Diss. 122 p.
 15. Kushnirenko, A. N. 23.01.1992. Troichnyy diz’yunktor na MDP-tranzistorakh [Ternary logic disjunction using metal–insulator–semiconductor transistors]. Patent USSR No. SU1707757 A1. EDN: CASHOD.
 16. Makarov, D. A. 2000. Issledovanie trekhurovnevnykh logicheskikh ustroystv [Research of three-level logic devices]. Saint Petersburg: GUAP. Diploma Thesis. 160 p.
 17. Bainbridge, J., and S. Furber. 2002. Chain: A delay-insensitive chip area interconnect. *IEEE Micro* 22(5):16–23. doi: 10.1109/MM.2002.1044296.
 18. Mariani, R., R. Roncella, R. Saletti, and P. Terreni. 1997. On the realisation of delay-insensitive asynchronous circuits with CMOS ternary logic. *3rd Symposium (International) on Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 54–62. doi: 10.1109/ASYNC.1997.587152.
 19. Kushnerov, A. 2005. Troichnaya tsifrovaya tekhnika: retrospektiva i sovremennost’ [Ternary digital technology. Retrospective and contemporary state]. Beersheba, Israel: Ben-Gurion University of the Negev. 15 p. doi: 10.13140/RG.2.2.10382.00327.
 20. Plekhanov, L. P. 2013. *Osnovy samosinkhronnykh elektronnykh skhem* [Basics of self-timed electronic circuits]. Moscow: Binom. Laboratory of knowledge. 208 p. EDN: SUMKIV.
 21. Dhande, A. P., V. T. Ingole, and V. R. Ghiye. 2014. *Ternary digital system: Concepts and applications*. SM Online Publs. LLC. 131 p.
 22. Karmazinskiy, A. N. 1983. *Sintez printsipial’nykh skhem tsifrovyykh elementov na MDP-tranzistorakh* [Synthesis of basic circuits diagrams of digital elements on MOS transistors]. Moscow: Radio i svyaz’. 256 p.

23. Korotkov, A. S., D. V. Morozov, and M. M. Pilipko. 2008. Bazovyy troichnyy logicheskiy element na osnove standartnoy MOP tekhnologii [Basic ternary logic element based on standard MOS technology]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of advanced micro and nanoelectronic systems] 1:466–471. EDN: MQJBFV.
24. Zatsarinny, A. A., Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, and Yu. V. Rozhdestvenskiy. 2020. Samosinkhronnye skhemy kak baza sozdaniya vysokonadezhnykh vysokoproizvoditel'nykh komp'yutеров sleduyushchego pokoleniya [Self-timed circuits as a basis for developing next generation high-reliable high-performance computers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki* [Materials of Electronics Engineering] 23(4):277–281. doi: 10.17073/1609-3577-2020-4-277-281. EDN: PEIHYV.

Received February 6, 2025

Accepted April 15, 2025

Contributor

Stepchenkov Yuri A. (b. 1951) — Candidate of Science (PhD) in technology, head of department, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; YStepchenkov@ipiran.ru

ОЦЕНКА ДОСТУПНОСТИ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В РАЗЛИЧНЫХ СУБЪЕКТАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*

*С. Ю. Казанцев¹, М. В. Сапожников², Д. Н. Терехин³, Ю. Б. Миронов⁴,
Б. М. Шабанов⁵*

Аннотация: Тенденция постоянного роста требований к объему, скорости и степени защиты информации, передаваемой в коммуникационных сетях, обуславливает поиск и исследование перспективных систем связи, позволяющих обеспечить надежный высокоскоростной канал связи в условиях возможных деструктивных внешних влияний на линии связи. В качестве такой перспективной технологии рассматривается атмосферная оптическая связь, реализуемая с помощью серийных оптических терминалов, выпускаемых российскими компаниями. Описан универсальный подход к расчету доступности канала атмосферной связи с учетом технических параметров терминалов и метеорологических параметров в области расположения терминалов, а также оптических потерь, обусловленных поглощением и рассеянием лазерного излучения, возникающих при распространении оптического сигнала через атмосферу. Впервые получены наборы дистанций атмосферного канала с заданными коэффициентами доступности для современных российских терминалов атмосферных оптических линий связи (АОЛС), учитывающие многолетний архив метеорологических параметров городов, входящих в состав 37 федеральных округов Российской Федерации с учетом новых регионов (Донецкая Народная Республика, Луганская Народная Республика, Запорожская и Херсонская области).

Ключевые слова: оптическая связь; связь в свободном пространстве; атмосферная оптическая связь; доступность канала связи

DOI: 10.14357/08696527250205

EDN: ZRUEZE

1 Введение

Связность территорий Российской Федерации обеспечивается как функционированием транспортных магистралей, так и созданием единого информационного пространства, что требует создания защищенных систем связи, способных осуществлять прием и передачу больших объемов информации в любой

* Сапожниковым М. В., Мироновым Ю. Б. и Шабановым Б. М. работа была выполнена в НИИ «Курчатовский институт» в рамках государственного задания по теме FNEF-2024-0014.

¹Московский технический университет связи и информатики, s.i.kazantsev@mtuci.ru

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», msapozh@jssc.ru

³Московский технический университет связи и информатики, o.d.n.terehin@mtuci.ru

⁴Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», ymironov@jssc.ru

⁵Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», jssc@jssc.ru

момент времени [1, 2]. Системы связи стали сегодня неотъемлемой частью производственной и социальной инфраструктуры любого промышленно развитого государства и функционируют на его территории как взаимосвязанный производственно-хозяйственный комплекс. От грамотной организации, своевременной модернизации, обслуживания таких систем зависит среди прочего безопасность страны [3, 4], поэтому к системам связи на важных объектах предъявляется ряд дополнительных требований [5, 6]. К объектам, где требуется реализация бесперебойной работы систем связи, относятся промышленные и энергетические комплексы [5, 7], центры обработки данных [8, 9], центры принятия решений и т. п. В связи с этим актуальной задачей становится выбор оптимальной технологии связи на различных важных объектах и организация мониторинга параметров коммуникационной сети [5, 10].

В работах [11, 12] были предложены критерии и методики, позволяющие оценить целесообразность использования той или иной технологии связи на конкретном промышленном энергетическом комплексе и показано, что атмосферная оптическая связь, реализованная на современных оптических терминалах, имеет ряд преимуществ [5, 12]. Атмосферные оптические линии связи обладают следующими достоинствами: скрытая передача информации, которая может быть защищена даже от квантовых угроз за счет возможности реализации технологии квантового распределения ключей (КРК) [13–15]; высокая скорость передачи данных (порядка десятков гигабит в секунду) [16]; отсутствие требований лицензирования на использование инфракрасного спектра; невосприимчивость к электромагнитным помехам; отсутствие необходимости проведения проектно-исследовательских работ; быстрота установки и подключения системы к сети связи с учетом развертывания канала связи в случае территориально удаленных сегментов сети, где прокладка кабельных соединений затруднена или нерентабельна [17, 18]. Однако существенным недостатком АОЛС, влияющим на доступность канала связи, оказывается зависимость от погодных условий (туман, снег, сильный дождь) [17]. Ухудшение качества атмосферной оптической связи в значительной степени зависит от изменения такого параметра, как метеорологическая дальность видимости (МДВ), а МДВ, в свою очередь, зависит от географического места расположения оптического терминала АОЛС [5, 17].

Особенности региона расположения аппаратуры АОЛС должны в обязательном порядке учитываться при внедрении такого вида связи, поскольку определяют доступность связи [7]. Поэтому актуальной задачей становится расчет:

- (1) запаса усиления на оптической линии связи с учетом конкретных технических параметров современных российских терминалов АОЛС и метеорологических параметров различных географических регионов Российской Федерации и с учетом потерь, обусловленных поглощением и рассеянием при прохождении сигнала через атмосферу;
- (2) предельной протяженности атмосферного канала, обеспечивающей требуемую доступность (0,999, 0,998, 0,997, 0,99, 0,98, 0,97).



Рис. 1 Карта исследуемых городов Российской Федерации

Целью настоящей работы ставилось выполнение расчетов доступности атмосферной оптической связи в различных городах Российской Федерации при использовании современных коммерческих терминалов АОЛС. Исследуемые города с различной численностью населения, входящие в состав 37 федеральных округов Российской Федерации, представлены на рис. 1.

Выбор оборудования для реализации оптической линии связи

На отечественном рынке терминалов атмосферной связи присутствуют следующие компании: «Оптические ТелеСистемы», г. Санкт-Петербург (терминалы «ЛАНтастИКа»); «Мостком», г. Рязань (терминалы «Artolink»); «Лазерные информационные телекоммуникации», г. Екатеринбург (терминалы «ОСС»). Системы от компании «Мостком» уже сейчас могут работать с оборудованием КРК [10–12], поэтому параметры серийных изделий именно этой фирмы использованы для выполнения дальнейших расчетов.

2 Оценка запаса усиления на оптической линии связи

Влияние основных составляющих атмосферы на характеристики распространяющегося излучения в основном заключается в ослаблении, поглощении и рассеянии излучения [19, 20]. Таким образом, общие энергетические потери терминала АОЛС на трассе составляют сумму потерь, обусловленных расходимостью лазерного луча $P_{\text{расх}}$, и потерями за счет поглощения и рассеяния при прохождении сигнала через атмосферу $P_{\text{атм}}$:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{расх}} + P_{\text{атм}}. \quad (1)$$

Кроме того, стоит учитывать потери, обусловленные вариацией показателя преломления из-за флуктуаций плотности, вызванные перемешиванием воздушных масс с различной температурой (атмосферная турбулентность) [21, 22]. Это приводит к образованию турбулентных ячеек разных размеров и с разными показателями преломления. Такие ячейки будут действовать как набор линз и в конечном итоге вызовут конструктивную или деструктивную интерференцию распространяющегося луча (отклонение области луча от пути передачи). Эти возмущения в волновом фронте, вносимые атмосферой, можно физически описать моделью Колмогорова [23, 24].

Теория Колмогорова описывает эффекты в терминах турбулентных ячеек большого (L_0) и малого (l_0) масштабов. В зависимости от размера турбулентных ячеек (вихрей) и размера луча передатчика выделяют различные эффекты, обусловленные атмосферной турбулентностью. Так, внутренняя (мелкомасштабная) турбулентность приводит к мерцанию (сцинтилляции), которое проявляется как «пятна» на полученном луче. Результирующие случайные колебания интенсивности служат основной причиной замирания, вызванного турбулентностью [22, 25]. Внешняя (крупномасштабная) турбулентность на больших расстояниях заставляет луч «штопориться» в воздухе, что приводит к блужданию луча в приемной апертуре [25]. Строгий учет атмосферной турбулентности в настоящей статье не проводился, однако при проектировании АОЛС может быть учтен на основе феноменологических соотношений аналогично [14, 26].

2.1 Геометрическое ослабление

На рис. 2 схематично показано, как формируются геометрические потери вследствие расходимости излучения лазерного источника.

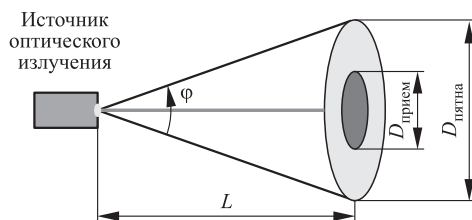


Рис. 2 Расходимость луча в системе АОЛС

Потери оптической мощности за счет расходимости лазерного луча определяются из следующего соотношения:

$$P_{\text{расх}} = 10 \lg \left(\frac{S_{\text{пятна}}}{S_{\text{прием}}} \right).$$

Здесь $S_{\text{пятна}}$ — площадь пятна излучения в месте расположения приемного устройства:

$$S_{\text{пятна}} = \pi R_{\text{пятна}}^2 = \frac{\pi d_{\text{пятна}}^2}{4},$$

где $d_{\text{пятна}}$ — диаметр оптического пятна, определяемый выражением $d_{\text{пятна}} = L\varphi$ (φ — угол расходимости лазерного пучка; L — расстояние между излучателем и приемником); $S_{\text{прием}}$ — площадь линзы приемного устройства:

$$S_{\text{прием}} = \pi R_{\text{прием}}^2 = \frac{\pi d_{\text{прием}}^2}{4},$$

где $d_{\text{прием}}$ — диаметр линзы приемного устройства.

С учетом приведенных выражений потери оптической мощности можно определить, исходя из общедоступных технических параметров терминала АОЛС по формуле:

$$P_{\text{расх}} = 10 \lg \left(\frac{(\pi/4)(L\varphi)^2}{S_{\text{прием}}} \right). \quad (2)$$

2.2 Атмосферное поглощение

В настоящее время существует большое число баз данных, содержащих параметры спектрального поглощения для различных стандартных моделей атмосферы (USA, IAO), самые крупные из них — HITRAN [27] и «Спектроскопия атмосферных газов» (SPECTRA) [28].

Для оценки запаса усиления исследуемых терминалов АОЛС использовался массив коэффициентов поглощения σ_A с учетом различных моделей атмосферы для различных широт из базы данных «Спектроскопия атмосферных газов» (SPECTRA) [28]. При этом функция пропускания с учетом только поглощения определяется по формуле:

$$\text{TR}_{\text{absorption}} = \exp(-\sigma_A L).$$

2.3 Атмосферное рассеяние

Снижение мощности лазерного излучения, передаваемого в атмосфере, вследствие эффектов аэрозольного и молекулярного (рэлеевского) рассеяния является одним из основных факторов, ограничивающих дальность передачи оптических сигналов в области коротких длин волн. Из теории молекулярного (рэлеевского) рассеяния света следует выражение для коэффициента рассеяния в газах [29]:

$$\sigma_R = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta}, \quad (3)$$

где n — показатель преломления воздуха; λ — длина волны; δ — фактор деполяризации молекул; N — число молекул в единице объема.

Из (3) видно, что показатель ослабления обратно пропорционален четвертой степени длины волны. Отсюда следует, что рассеяние коротковолнового излучения происходит существенно более интенсивно, чем длинноволнового. Для расчета ослабления в результате рассеяния Ми используют эмпирические методы [22]. В этих методах коэффициент ослабления из-за рассеяния Ми связывается с МДВ. Исходя из этого, коэффициент Ми-рассеяния рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{Mi}} = \frac{3,91}{\text{MDV}} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-q}, \quad (4)$$

где MDV — МДВ; q — коэффициент, зависящий от распределения размеров рассеивающих частиц. Он определен на основании данных экспериментов и имеет значения:

$$q = \begin{cases} 1,6, & \text{MDV} > 50 \text{ км}; \\ 1,3, & 6 < \text{MDV} < 50 \text{ км}; \\ 0,585\text{MDV}^{1/3}, & \text{MDV} < 6 \text{ км}. \end{cases}$$

Таким образом, исходя из (3), (4), функция пропускания с учетом только рассеяния определяется по формуле:

$$\text{TR}_{\text{scattering}} = \exp(-\sigma_R L) \exp(-\sigma_{\text{Mi}} L),$$

а коэффициент пропускания атмосферы с учетом и поглощения, и рассеяния может быть представлен в виде произведения:

$$\text{TR} = \text{TR}_{\text{absorption}} \text{TR}_{\text{scattering}}. \quad (5)$$

2.4 Запас усиления терминала атмосферной оптической линии связи

Исходя из (1), (2) и (5), запас усиления терминала FM, который представляет собой доступную мощность, превышающую чувствительность приемника, можно рассчитать по формуле:

$$\text{FM} = P_e - S_r - 10 \lg \left(\frac{(\pi/4)(L\varphi)^2}{S_{\text{прием}}} \text{TR} \right), \quad (6)$$

где P_e — общая мощность излучателя; S_r — чувствительность приемника.

В соответствии с описанной методикой оценки запаса усиления терминалов АОЛС были рассчитаны с помощью комплекса [30], типичная зависимость запаса усиления от дистанции показана на рис. 3.

На рис. 3 приведена зависимость запаса усиления для терминала АОЛС Argolink M1-10GE на дистанции до 1500 м при расположении терминала в Москве с учетом технических параметров данного оборудования [31] и архива метеорологических данных (а именно: МДВ) [32] за 13 лет.

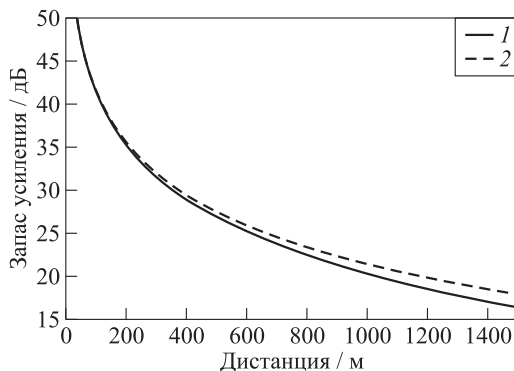


Рис. 3 Зависимость запаса усиления терминала АОЛС от дистанции: 1 — с учетом поглощения и рассеяния; 2 — с учетом поглощения

Из рис. 3 видно, что при использовании исследуемого терминала на предельно возможной дистанции в 1500 м потери за счет рассеяния составляют порядка 1,5 дБ.

3 Оценка целесообразности применения атмосферных оптических линий связи в различных субъектах Российской Федерации

Доступность канала АОЛС зависит от допустимого ослабления мощности сигнала между передатчиком и приемником на заданном расстоянии между терминалами, климатических особенностей местности и суммарных потерь. Таким образом, доступность канала АОЛС $A\vartheta$ можно оценивать, исходя из метеорологических условий района установки и параметров терминалов АОЛС. Параметр $A\vartheta$ можно рассчитать по формуле [5]:

$$A\vartheta = 1 - P_{V_{fm}}, \quad (7)$$

где $P_{V_{fm}}$ — вероятность снижения МДВ ниже предельной дальности V_{fm} , определяемой запасом усиления оборудования FM на дистанции L . При этом V_{fm} (в км) определяется по формуле [5]:

$$V_{fm} = \frac{17}{FM} L, \quad (8)$$

где V_{fm} — предельная дальность. Величина запаса усиления оборудования FM зависит среди прочего от характеристик применяемых моделей терминалов АОЛС и протяженности канала связи, как было показано ранее в (6).

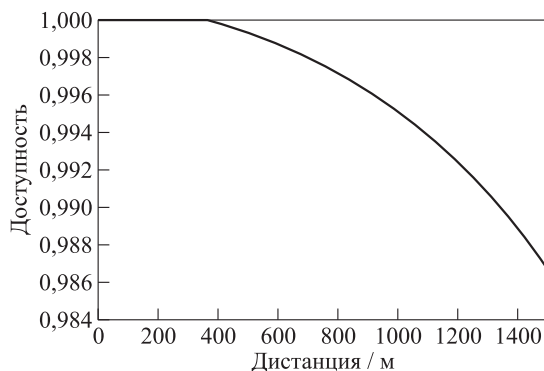


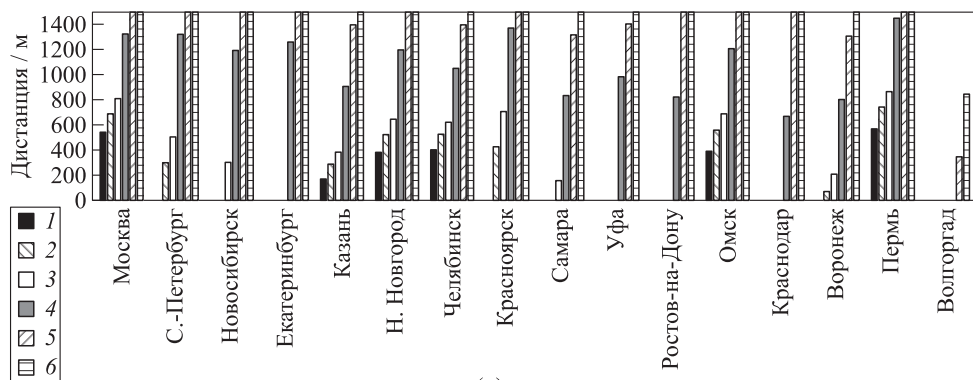
Рис. 4 Зависимости доступности терминала АОЛС от дистанции

В соответствии с (7) и (8) при использовании программы для ЭВМ [30] для терминала АОЛС Artolink M1-10GE, расположенного в Москве, получена зависимость доступности от дистанции, изображенная на рис. 4.

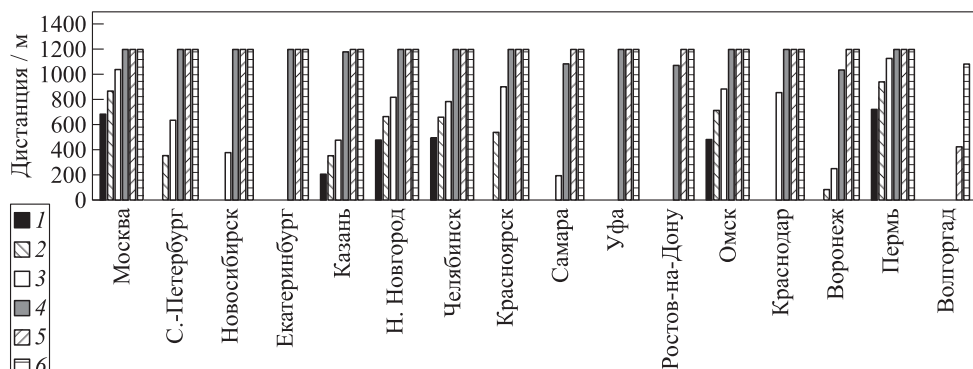
При расчете зависимости доступности от дистанции, показанной на рис. 4, были учтены технические параметры оборудования и метеорологические данные для Москвы [32] в период с 2013 по 2024 гг., в том числе пропускание атмосферы (с учетом поглощения и рассеяния) в исследуемом регионе.

Основываясь на общедоступных требованиях к функционированию сетей связи [33], по рис. 4 можно сделать вывод о том, что терминалы АОЛС M1-10GE при их расположении в Москве могут использоваться в составе глобальных сетей связи при дистанции оптического канала не более 545 м и в корпоративных сетях на дистанции не более 1340 м (например, для решения проблемы «последней мили» [34]). С учетом технических параметров терминалов АОЛС Artolink (модели M1-10GE, M1-GE и M1-FE-L), архива метеорологических параметров всех рассматриваемых городов Российской Федерации [32] с различной численностью населения, а также особенностей пропускания атмосферы для каждого места расположения терминала и описанной методики расчета доступности канала АОЛС, при использовании [30] получены наборы дистанций атмосферного канала с заданными коэффициентами доступности, которые представлены на рис. 5–7.

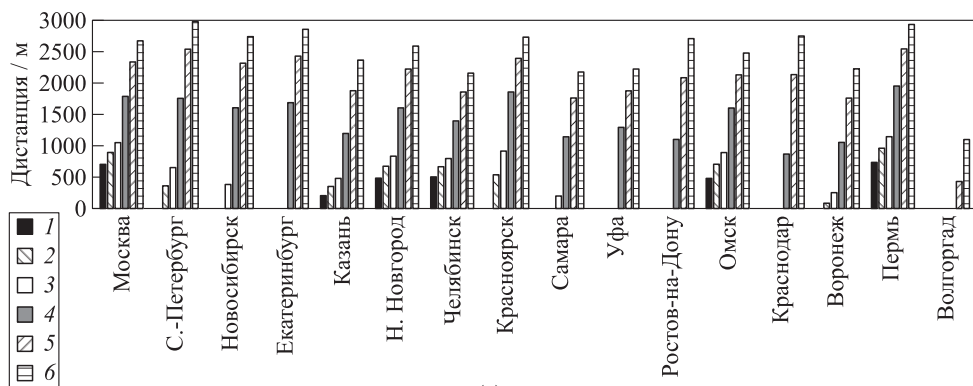
Из диаграмм, представленных на рис. 5–7, видно, что во всех рассматриваемых городах Российской Федерации достаточно эффективно могут применяться любые рассмотренные терминалы в сетях связи общего пользования (поскольку показатель доступности $> 0,97$ считается приемлемым) при предельных дистанциях работы терминалов. Эффективность работы исследуемых терминалов АОЛС в Волгограде, Ставрополе и Якутске будет достаточно низкая, поэтому их применение на важных объектах нежелательно в силу малых значений доступности атмосферной оптической связи. В новых регионах Российской Фе-



(a)



(б)



(в)

Рис. 5 Диаграмма дистанций атмосферного канала с заданными коэффициентами доступности (1 — 0,999; 2 — 0,998; 3 — 0,997; 4 — 0,990; 5 — 0,980; 6 — 0,970) для терминалов АОЛС M1-10GE (a), M1-GE (б) и M1-FE-L (в), расположенных в городах Российской Федерации с численностью населения более 1 млн чел.

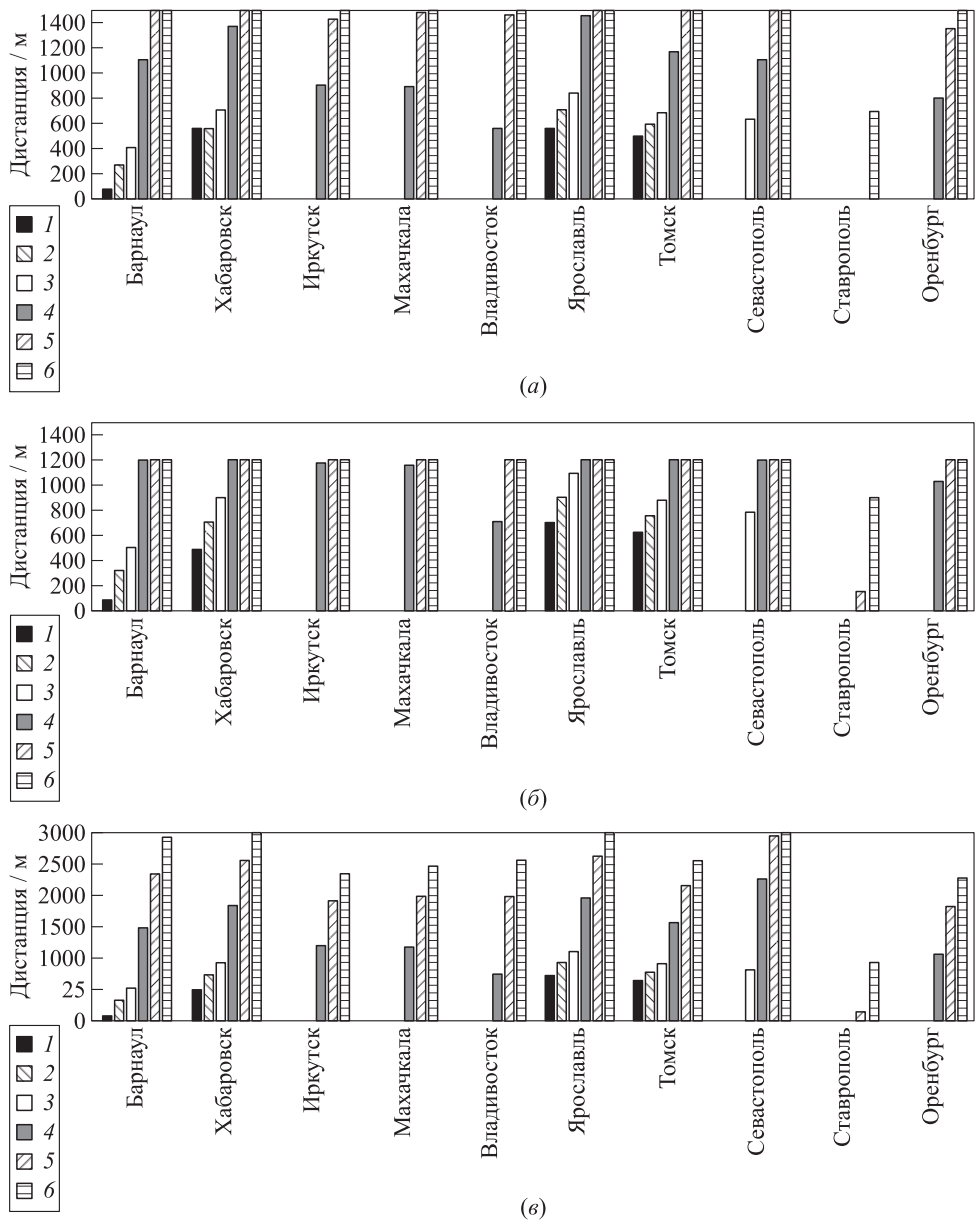


Рис. 6 Диаграмма дистанций атмосферного канала с заданными коэффициентами доступности (1 — 0,999; 2 — 0,998; 3 — 0,997; 4 — 0,990; 5 — 0,980; 6 — 0,970) для терминалов АОЛС M1-10GE (а), M1-GE (б) и M1-FE-L (в), расположенных в городах Российской Федерации с численностью населения от 500 тыс. до 1 млн чел.

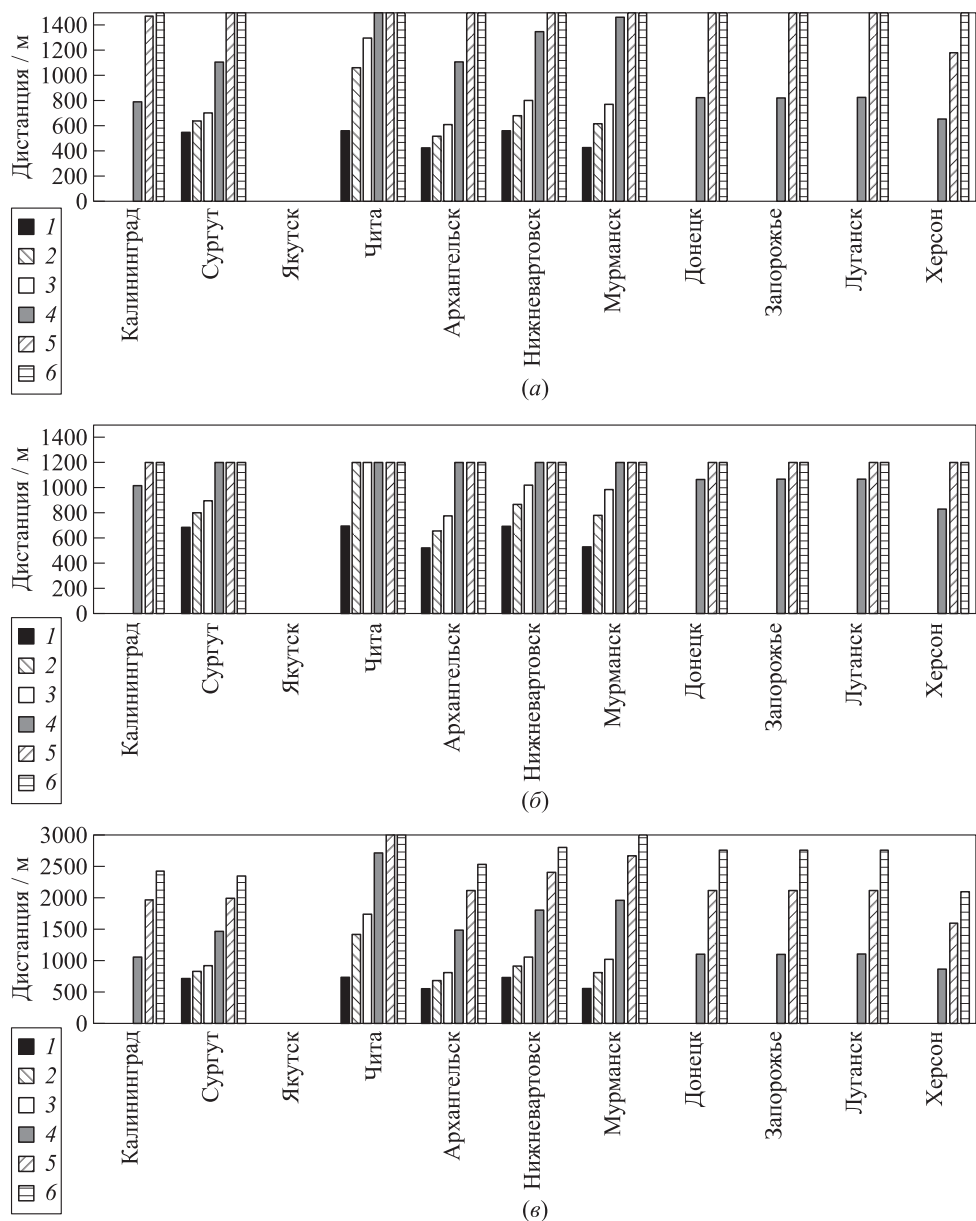


Рис. 7 Диаграмма дистанций атмосферного канала с заданными коэффициентами доступности (1 — 0,999; 2 — 0,998; 3 — 0,997; 4 — 0,990; 5 — 0,980; 6 — 0,970) для терминалов АОЛС М1-10GE (а), М1-GE (б) и М1-FE-L (в), расположенных в городах с численностью населения от 200 тыс. до 500 тыс. чел. и в городах в составе четырех новых регионов Российской Федерации

дерации (Донецкая Народная Республика, Луганская Народная Республика, Запорожская и Херсонская области) исследуемые терминалы АОЛС обеспечивают $> 0,99$ для дистанции оптического канала 785 м при скорости передачи информации 10 Гбит/с и 1010 м при скорости передачи информации до 1 Гбит/с.

Следует заметить, что при расчете доступности в данной работе авторы ограничились рассмотрением лишь оптического канала связи, но ряд производителей оптических терминалов предлагает гибридные варианты, когда оптический канал связи дополняется радиоканалом, как это реализовано в модели ARTOLINK M1 GE-SL компании АО МОСТКОМ [5]. В промежуток времени, неблагоприятный для передачи информации в оптическом диапазоне спектра, в таких терминалах включается радиоканал, за счет такого подхода удастся реализовать стабильный канал связи с высокой доступностью [35, 36].

4 Заключение

В статье продемонстрирован подход к расчету доступности канала АОЛС с учетом технических параметров терминалов АОЛС и метеорологических параметров в городах, входящих в состав 37 федеральных округов Российской Федерации. При этом на основе применения программного комплекса [30] при расчете доступности учитывались оптические потери, обусловленные поглощением и рассеянием лазерной мощности, возникающие при прохождении лазерного излучения через атмосферу в заданном районе. Приведенная методика универсальна и применима для любых терминалов оптической связи, проектируемых к внедрению в сети общего пользования, которые могут располагаться и в других географических регионах, для которых есть архив метеорологических данных за последние 5–10 лет.

Показано, что технология атмосферной связи обладает высоким потенциалом в новых регионах Российской Федерации (Донецкая Народная Республика, Луганская Народная Республика, Запорожская и Херсонская области) с учетом оперативного развертывания канала связи в случае территориально удаленных сегментов сети, где прокладка кабельных соединений может быть затруднена или нерентабельна, скрытой передачи информации, защищенной среди прочего от квантовых угроз.

Наличие оптического канала связи в гибридных системах связи, содержащих дополнительный радиоканал, даже в районах с плохими погодными условиями позволяет в среднем обеспечить высокую скорость передачи данных при низких энергозатратах [36].

Литература

1. Кузовкова Т. А. Оценка роли инфокоммуникаций в национальной экономике и выявление закономерностей их развития // Системы управления, связи и безопасности, 2015. № 4. С. 26–68. EDN: VBLVCN.

2. Моисеев А. А., Чуев А. В., Киселев А. А. Качество военной связи как совокупность ее основных свойств // Техника средств связи, 2019. № 2. С. 127–133. EDN: GEJJJW.
3. Пестряков А. В., Дымкова С. С. Синхронизация. Итоги 50-ти лет развития в СССР и России // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт, 2023. Т. 17. № 11. С. 27–34. doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-11-27-34. EDN: SALXGY.
4. Новиков А. С., Ивутин А. Н., Пестин М. С. Алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи при обрывах маршрутов в сетях MANET // Системы управления, связи и безопасности, 2024. № 2. С. 14–42. doi: 10.24412/2410-9916-2024-2-014-042. EDN: EPMHJU.
5. Казанцев С. Ю., Кузнецов С. Н., Максимов А. Ю., Пчелкина Н. В. Применение атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики // Успехи прикладной физики, 2023. Т. 11. № 6. С. 530–539. doi: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539. EDN: AOZOOY.
6. Липатников В. А., Парфиров В. А. Структурно-параметрический метод защиты информационно-телекоммуникационной сети специального назначения в условиях информационного конфликта // Системы управления, связи и безопасности, 2023. № 4. С. 105–156. doi: 10.24412/2410-9916-2023-4-105-156. EDN: UKFEIL.
7. Казанцев С. Ю., Сапожников М. В., Терехин Д. Н. Разработка карты применимости атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики Российской Федерации // Ядерная физика и инжиниринг, 2025. Т. 16. № 1. С. 5–12. doi: 10.56304/S2079562924060162. doi: EDN: OGFNKU.
8. Докучаев В. А., Кальфа А. А., Мытенков С. С., Шведов А. В. Анализ технических решений по организации современных центров обработки данных // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт, 2017. Т. 11. № 6. С. 16–24. EDN: ZAOKJB.
9. Статьев В. Ю., Докучаев В. А., Маклачкова В. В. Информационная безопасность на пространстве «Больших данных» // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт, 2022. Т. 16. № 4. С. 21–28. doi: 10.36724/2072-8735-2022-16-4-21-28. EDN: IXUYWS.
10. Buzhin I. G., Derevyankin A. Yu., Antonova V. M., et al. Comparative analysis of the rest and GRPC used in the monitoring system of communication network virtualized infrastructure // T-Comm, 2023. Vol. 17. No. 4. P. 50–55. doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-50-55. EDN: FZJGEE.
11. Зибзеев А. Г., Рыбаков Е. А., Стариков Д. П., Чернов А. Г. Разработка карты применимости технологий связи для объектов нефтегазовой отрасли // Экспозиция. Нефть. Газ, 2014. № 5(37). С. 19–22. EDN: SMKNPV.
12. Kazantsev S. Y., Kuznetsov S. N., Maksimov A. Y., Pchelkina N. V. Prospects for the use of atmospheric optical communication at nuclear and fusion facilities // Fusion Sci. Technol., 2024. Vol. 80. No. 7. P. 893–903. doi: 10.1080/ 15361055.2024.2339662.
13. Боев А. А., Воробей С. С., Казанцев С. Ю., Керносов М. Ю., Колесников О. В., Кузнецов С. Н., Миронов Ю. Б., Паршин А. А., Рудавин Н. В. Возможность построения модульной системы квантового распределения ключей в атмосфере // Письма в журнал технической физики, 2022. Т. 48. № 15. С. 15–18. doi: 10.21883/PJTF.2022.15.53125.19192. EDN: MPPYRN.

14. Bolotov D. V., Kazantsev S. Y., Pchelkina N. V., Kuznetsov S. N., Kernosov M. Y. Modular facility of quantum key distribution in a free space // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems Proceedings. — IEEE, 2023. Art. 10148017. 5 p. doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148017.
15. Ерохин К. Ю., Казанцев С. Ю., Казиева Т. В., Миронов Ю. Б., Пчелкина Н. В. Применимость технологии квантового распределения ключей в свободной атмосфере при построении сегментов современных квантовых коммуникационных сетей // Оптический ж., 2024. Т. 91. № 11. С. 63–70. doi: 10.17586/1023-5086-2024-91-11-63-70. EDN: RMUYWD.
16. Молчанов С. В., Калекина С. О. Применение когерентного временно-частотного мультиплексирования для повышения производительности атмосферной оптической системы связи // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Физико-математические и технические науки, 2019. № 2. С. 31–39. EDN: JIIRNF.
17. Полянский С. В., Игнатов А. Н. Определение дистанции атмосферного канала связи с заданным коэффициентом готовности для г. Новосибирска // Вестник СибГУТИ, 2009. № 4(8). С. 73–82. EDN: MBFVRD.
18. Бережной Д. Н., Кульбикаян Х. Ш., Мищенко Е. Н. Особенности применения атмосферных оптических линий связи в структуре РЖД // Вестник РГУПС, 2017. № 1. С. 62–69. EDN: YHPUPX.
19. Борейшо А. С., Ким А. А., Коняев М. А., Лугиня В. С., Морозов А. В., Орлов А. Е. Современные лидарные средства дистанционного зондирования атмосферы // Фотоника, 2019. Т. 13. № 7. С. 648–657. doi: 10.22184/1992-7296.FRos.13.7.648.657. EDN: OXNNVH.
20. Борейшо А. С., Коняев М. А., Ким А. А. Лидарные комплексы для исследования атмосферы. — СПб.: Лань, 2024. 244 с.
21. Kaushal H., Kaddoum G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques // IEEE Commun. Surv. Tut., 2016. Vol. 19. No.1. P. 57–96. doi: 10.1109/COMST.2016.2603518.
22. Pchelkina N. V., Zhukovsky D. D., Nanidzhanyan A. K., Bushuev E. Y., Chizhin D. D. Investigation of the atmospheric optical disturbances impact on the free space optics quantum key distribution // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications Conference Proceedings. — IEEE, 2024. Art. 10617486. 7 p. doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617486.
23. Andrews L. C., Phillips R. L. Laser beam propagation through random media. — 2nd ed. — SPIE Press, 2005. 808 p. doi: 10.1117/3.626196.
24. Williams W. D., Collins M., Boroson D. M., et al. RF and optical communications: A comparison of high data rate returns from deep space in the 2020 time-frame. — NASA, 2007. Technical Report NASA/TM-2007-214459. 16 p. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070017310/downloads/20070017310.pdf>.
25. Trichili A., Cox M., Ooi B., Alouini M.-S. Roadmap to free space optics // J. Opt. Soc. Am. B, 2020. Vol. 37. No. 11. P. A184–A201. doi: 10.1364/josab.399168.
26. Atiyah M. A., Abdulameer L. F., Narkhedel G. PDF comparison based on various FSO channel models under different atmospheric turbulence // Al-Khwarizmi Engineering J., 2023. Vol. 19. No. 4. P. 78–89. doi: 10.22153/kej.2023.09.004.

27. The HITRAN database. <https://www.cfa.harvard.edu/hitran>.
28. Михайленко С. Н., Бабинов Ю. Л., Головкин В. Ф. Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции // Оптика атмосферы и океана, 2005. Т. 18. № 09. С. 765–776.
29. Миронов А. В. Прецизионная фотометрия. Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд. — М.: ЭДЭМ, 1997. 157 с.
30. Сапожников М. В., Миронов Ю. Б., Терехин Д. Н., Казанцев С. Ю. Программный комплекс FSO. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618934 от 17.04.2024. EDN: VUDCDT.
31. Технические параметры стационарных терминалов. <https://moctkom.ru/optical-ground-stations>.
32. Архив погоды, METAR. <https://rp5.ru>.
33. Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования: Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 25.11.2021 № 1229.
34. Кузнецов С., Огнев Б., Поляков С. FSO на «последней (и не только) миле». Практические результаты // Первая миля, 2009. Т. 10. № 1. С. 30–33.
35. Dudin A. N., Klimenok V. I., Vishnevsky V. M. Mathematical models and methods of investigation of hybrid communication networks based on laser and radio technologies // The theory of queuing systems with correlated flows. — Cham: Springer, 2020. P. 241–306. doi: 10.1007/978-3-030-32072-0_5.
36. Alqurashi F. S., Abdeljabar S., Trichili A., Alouini M.-S. Overcoming maritime connectivity challenges with hybrid RF/FSO links // TechRxiv, October 28, 2024. 6 p. doi: 10.36227/techrxiv.173014148.88314248/v1.

Поступила в редакцию 01.03.2025

Принята к публикации 15.04.2025

ASSESSMENT OF THE AVAILABILITY OF ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATIONS IN VARIOUS REGIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION

*S. Yu. Kazantsev¹, M. V. Sapozhnikov², D. N. Terekhin¹, Yu. B. Mironov²,
and B. M. Shabanov²*

¹Moscow Technical University of Communications and Informatics, 8A Aviamotornaya Str., Moscow 111024, Russian Federation

²National Research Center “Kurchatov Institute,” 1 Acad. Kurchatov Sq., Moscow 123182, Russian Federation

Abstract: The trend of constant growth of requirements for the volume, speed, and degree of protection of information transmitted in communication networks determines the search and study of promising communication systems that

provide a reliable high-speed communication channel in conditions of possible destructive external influences on communication lines. As such a prospective technology, the paper considers atmospheric optical communication implemented using serial optical terminals manufactured by Russian companies. The paper describes a universal approach to calculating the availability of an atmospheric communication channel taking into account the technical parameters of the terminals and meteorological parameters in the area of the terminals as well as optical losses due to the absorption and scattering of laser radiation that occur during the propagation of an optical signal through the atmosphere. For the first time, sets of dependencies of the distances of the atmospheric channel with specified availability factors for modern Russian terminals of free space optics were obtained taking into account a long-term archive of meteorological parameters of the cities that are part of 37 Federal Districts of the Russian Federation, taking into account new regions (Donetsk People's Republic, Lugansk People's Republic, and Zaporizhya and Kherson Regions).

Keywords: optical communication; free space communication; atmospheric optical communication; communication channel availability

DOI: 10.14357/08696527250205

EDN: ZRUEZE

Acknowledgments

Sapozhnikov M. V., Mironov Yu. B., and Shabanov B. M. carried out the work at the National Research Center “Kurchatov Institute” within the framework of the government assignment (topic FNEF-2024-0014).

References

1. Kuzovkova, T. A. 2015. Otsenka roli infokommunikatsiy v natsional'noy ekonomike i vyyavlenie zakonomernostey ikh razvitiya [Evaluation of the role of infocommunications in the national economy and to identify patterns of development]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security] 4:26–68. EDN: VBLVCN.
2. Moiseev, A. A., A. V. Chuev, and A. A. Kiselev. 2019. Kachestvo voennoy svyazi kak sovokupnost' ee osnovnykh svoystv [The quality of military communications as a set of its main properties]. *Tekhnika sredstv svyazi* [Means of Communication Equipment] 2:127–133. EDN: GEJJJW.
3. Pestryakov, A. V., and S. S. Dymkova. 2023. Sinkhronizatsiya. Itogi 50-ti let razvitiya v SSSR i Rossii [Synchronization. 50 years development in the USSR and Russia]. *T-Comm: Telekomunikatsii i transport* [T-COMM] 17(11):27–34. doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-11-27-34. EDN: SALXGY.
4. Novikov, A. S., A. N. Ivutin, and M. S. Pestin. 2024. Algoritm marshrutizatsii dlya obespecheniya bystrogo vosstanovleniya svyazi pri obryvakh marshrutov v setyakh MANET [Routing algorithm to ensure quick restoration of communication in case of route breaks in MANET networks]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security] 2:14–42. doi: 10.24412/2410-9916-2024-2-014-042. EDN: EPMHJU.

5. Kazantsev, S. Yu., S. N. Kuznetsov, A. Yu. Maksimov, and N. V. Pchelkina. 2023. Primeneniya atmosfernoy opticheskoy svyazi na ob"ektakh atomnoy energetiki [Prospects for the use of atmospheric optical communication at nuclear power plants]. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics] 11(6):530–539. doi: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539. EDN: AOZOOY.
6. Lipatnikov, V. A., and V. A. Parfirov. 2023. Strukturno-parametricheskiiy metod zashchity informatsionno-telekommunikatsionnoy seti spetsial'nogo naznacheniya v usloviyakh informatsionnogo konflikta [Structural-parametric method of protection of information and telecommunication network of special purpose in the conditions of information conflict]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security] 4:105–156. doi: 10.24412/2410-9916-2023-4-105-156. EDN: UKFEIL.
7. Kazantsev, S. Yu., M. V. Sapozhnikov, and D. N. Terekhin. 2025. Razrabotka karty primenimosti atmosfernoy opticheskoy svyazi na ob"ektakh atomnoy energetiki Rossiyskoy Federatsii [Development of the applicability map of atmospheric optical communication at nuclear energy facilities of the Russian Federation]. *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering] 16(1):5–12. doi: 10.56304/S2079562924060162. EDN: OGFNKU.
8. Dokuchaev, V. A., A. A. Kalfa, S. S. Mytenkov, and A. V. Shvedov. 2017. Analiz tekhnicheskikh resheniy po organizatsii sovremennykh tsentrov obrabotki dannykh [Analysis of technical solutions for organizing modern data processing centers]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-COMM] 11(6):16–24. EDN: ZAOKJB.
9. Statev, V. Yu., V. A. Dokuchaev, and V. V. Maklachkova. 2022. Informatsionnaya bezopasnost' na prostranstve "Bol'shikh dannykh" [Information security in the Big Data space]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-COMM] 16(4):21–28. doi: 10.36724/2072-8735-2022-16-4-21-28. EDN: IXUYWS.
10. Buzhin, I. G., A. Yu. Derevyankin, V. M. Antonova, *et al.* 2023. Comparative analysis of the rest and GRPC used in the monitoring system of communication network virtualized infrastructure. *T-Comm* 17(4):50–55. doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-4-50-55. EDN: FZJGEE.
11. Zebzeev, A. G., E. A. Rybakov, D. P. Starikov, and A. G. Chernov. 2014. Razrabotka karty primenimosti tekhnologiy svyazi dlya ob"ektov neftegazovoy otrasli [Development of connection technology applicability card for the gas and oil industry]. *Ekspozitsiya. Neft'. Gaz* [Exposition. Oil. Gas] 5(37):19–22. EDN: SMKNPV.
12. Kazantsev, S. Y., S. N. Kuznetsov, A. Y. Maksimov, and N. V. Pchelkina. 2024. Prospects for the use of atmospheric optical communication at nuclear and fusion facilities. *Fusion Sci. Technol.* 80(7):893–903. doi: 10.1080/15361055.2024.2339662.
13. Boev, A. A., S. S. Vorobey, S. Y. Kazantsev, M. Y. Kernosov, O. V. Kolesnikov, S. N. Kuznetsov, Y. B. Mironov, A. A. Parshin, and N. V. Rudavin. 2022. Possibility of creating a modular system for quantum key distribution in the atmosphere. *Tech. Phys. Lett.* 48(8):11–14. doi: 10.21883/TPL.2022.08.55051.19192.
14. Bolotov, D. V., S. Y. Kazantsev, N. V. Pchelkina, S. N. Kuznetsov and M. Y. Kernosov. 2023. Modular facility of quantum key distribution in a free space. *Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems Proceedings*. IEEE. Art. 10148017. 5 p. doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148017.

15. Erokhin, K. Yu., S. Yu. Kazantsev, T. V. Kazieva, Yu. B. Mironov, and N. V. Pchelkina. 2024. Primenimost' tekhnologii kvantovogo raspredeleniya klyuchey v svobodnoy atmosfere pri postroenii segmentov sovremennykh kvantovykh kommunikatsionnykh setey [The applicability of quantum key distribution technology in a free atmosphere when constructing segments of modern quantum communication networks]. *Opticheskiy zh. [J. Opt. Technol.]* 91(11):63–70. doi: 10.17586/1023-5086-2024-91-11-63-70. EDN: RMUYWD.
16. Molchanov, S. V., and S. O. Kalekina. 2019. Primenenie kogerentnogo vremennochastotnogo mul'tipleksirovaniya dlya povysheniya proizvoditel'nosti atmosfery opтической системы связи [The use of coherent time–frequency multiplexing to improve the performance of the atmospheric optical communication system]. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Ser. Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki [Vestnik IKBFU. Physics, Mathematics, and Technology]* 2:31–39. EDN: JIIRNF.
17. Polyanskiy, S. V., and A. N. Ignatov. 2009. Opreделение dstantsii atmosfernogo kanala svyazi s zadannym koeffitsientom gotovnosti dlya g. Novosibirska [Defining the distance of atmospheric link with necessary readiness factor for Novosibirsk]. *Vestnik SibGUTI [Herald of SibSUTIS]* 4(8):73–82. EDN: MBFVRD.
18. Berezhnoy, D. N., Kh. Sh. Kulbikayan, and E. N. Mishchenko. 2017. Osobennosti primeneniya atmosferykh opticheskikh liniy svyazi v strukture RZhD [Peculiarities of communication application of atmospheric optical line in the structure of JSC “Russian Railway”]. *Vestnik RGUPS [Vestnik RGUPS]* 1(65):62–69. EDN: YHPUX.
19. Boreysho, A. S., A. A. Kim, M. A. Konyaev, V. S. Luginya, A. V. Morozov, and A. E. Orlov. 2019. Sovremennye lidarnye sredstva dstantsionnogo zondirovaniya atmosfery [Modern lidar systems for atmosphere remote sensing]. *Fotonika [Photonics Russia]* 3(7):648–657. doi: 10.22184/1992-7296.FRos.13.7.648.657. EDN: OXNNVH.
20. Boreysho, A. S., M. A. Konyaev, and A. A. Kim. 2024. *Lidarnye komplekсы dlya issledovaniya atmosfery* [Lidar systems for atmospheric research]. St. Petersburg: Lan'. 244 p.
21. Kaushal, H., and G. Kaddoum. 2016. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques. *IEEE Commun. Surv. Tut.* 19(1):57–96. doi: 10.1109/COMST.2016.2603518.
22. Pchelkina, N. V., D. D. Zhukovsky, A. K. Nanidzhanyan, E. Y. Bushuev and D. D. Chizhin. 2024. Investigation of the atmospheric optical disturbances impact on the free space optics quantum key distribution. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications Conference Proceedings*. IEEE. Art. 10617486. 7 p. doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617486.
23. Andrews, L. C., and R. L. Phillips. 2005. *Laser beam propagation through random media*. 2nd ed. SPIE Press. 808 p. doi: 10.1117/3.626196.
24. Williams, W. D., M. Collins, D. M. Boroson, et al. 2007. RF and optical communications: A comparison of high data rate returns from deep space in the 2020 timeframe. NASA. Technical Report NASA/TM-2007-214459. 16 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070017310/downloads/20070017310.pdf> (accessed April 29, 2025).

25. Trichili, A., M. Cox, B. Ooi, and M.-S. Alouini. 2020. Roadmap to free space optics. *J. Opt. Soc. Am. B* 37(11):A184–A201. doi: 10.1364/josab.399168.
26. Atiyah, M. A., L. F. Abdulameer, and G. Narkhedel. 2023. PDF comparison based on various FSO channel models under different atmospheric turbulence. *AI-Khwarizmi Engineering J.* 19(4):78–89. doi: 10.22153/kej.2023.09.004.
27. The HITRAN database. Available at: <https://www.cfa.harvard.edu/hitran> (accessed April 29, 2025).
28. Mikhailenko, S. N., Yu. L. Babikov, and V. F. Golovko. 2005. Information-calculating system spectroscopy of atmospheric gases. The structure and main functions. *Atmospheric Oceanic Optics* 18(09):685–695.
29. Mironov, A. V. 1997. *Pretsizionnaya fotometriya. Prakticheskie osnovy pretsizionnoy fotometrii i spektrofotometrii zvezd* [Precision photometry. Practical foundations of precision photometry and spectrophotometry of stars]. Moscow: EDEM. 157 p.
30. Sapozhnikov, M. V., Yu. B. Mironov, D. N. Terekhin, and S. Yu. Kazantsev. 17.04.2024. Programmnyy kompleks FSO [FSO software suite]. Certificate RF of State Registration of Computer Programs No. 2024618934. EDN: VUDCDT.
31. Tekhnicheskie parametry statsionarnykh terminalov [Technical parameters of stationary terminals]. Available at: <https://mocom.ru/optical-ground-stations> (accessed April 29, 2025).
32. Arkhiv pogody, METAR [Weather archive, METAR]. Available at: <https://rp5.ru> (accessed April 29, 2025).
33. Ministerstvo tsifrovogo razvitiya, svyazi i massovykh kommunikatsiy Rossiyskoy Federatsii. November 25, 2021. Ob utverzhdenii Trebovaniy k organizatsionno-tekhnicheskomu obespecheniyu ustoychivogo funktsionirovaniya seti svyazi obshchego pol'zovaniya: Prikaz No. 1229 [On approval of the Requirements for organizational and technical support for the stable functioning of the public communications network: Order No. 1229]. Available at: <https://adm.digital.gov.ru/app/uploads/2023/10/prikaz-minczifry-%E2%84%96-1229.pdf> (accessed April 29, 2025).
34. Kuznetsov, S., B. Ognev, and S. Polyakov. 2009. FSO na “posledney (i ne tol’ko) mile”. *Prakticheskie rezul’taty* [FSO at the “last (and not only) mile.” Practical results]. *Pervaya milya* [Last Mile] 10(1):30–33.
35. Dudin, A. N., V. I. Klimenok, and V. M. Vishnevsky. 2020. Mathematical models and methods of investigation of hybrid communication networks based on laser and radio technologies. *The theory of queuing systems with correlated flows*. Cham: Springer. 241–306. doi: 10.1007/978-3-030-32072-0_5.
36. Alqurashi, F. S., S. Abdeljabar, A. Trichili, and M.-S. Alouini. 2024. Overcoming maritime connectivity challenges with hybrid RF/FSO links. *TechRxiv*. 6 p. doi: 10.36227/techrxiv.173014148.88314248/v1.

Received March 1, 2025

Accepted April 15, 2025

Contributors

Kazantsev Sergey Yu. (b. 1971) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, Moscow Technical University of Communications and

Informatics, 8a Aviamotornaya Str., Moscow 111024, Russian Federation;
s.i.kazantsev@mtuci.ru

Sapozhnikov Maksim V. (b. 1998) — laboratory research assistant, National Research Center “Kurchatov Institute,” 1 Acad. Kurchatov Sq., Moscow 123182, Russian Federation; msapozh@jscc.ru

Terekhin Dmitry N. (b. 1982) — PhD student, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 8a Aviamotornaya Str., Moscow 111024, Russian Federation; o.d.n.terehin@mtuci.ru

Mironov Yuri B. (b. 1985) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading engineer, National Research Center “Kurchatov Institute,” 1 Acad. Kurchatov Sq., Moscow 123182, Russian Federation; ymironov@jscc.ru

Shabanov Boris M. (b. 1954) — Doctor of Science in technology, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, deputy director, National Research Center “Kurchatov Institute,” 1 Acad. Kurchatov Sq., Moscow 123182, Russian Federation; jscc@jscc.ru

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ГИБРИДИЗАЦИИ МЕТОДА РАССУЖДЕНИЙ ПО ПРЕЦЕДЕНТАМ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ*

С. В. Листонад¹, А. С. Лучко²

Аннотация: Статья ориентирована на совершенствование методов автоматизации решения проблем в условиях клинической практики методами кооперативных самонастраивающихся гибридных интеллектуальных систем (КСГИС), интегрирующих различные модели и интеллектуальные технологии для достижения синергетического эффекта от их взаимодействия. Рассматриваются особенности и оцениваются возможности по гибридизации одного из методов искусственного интеллекта (ИИ) — рассуждений на основе прецедентов — при построении систем поддержки принятия врачебных решений. Анализ исследований в данной области продемонстрировал активное использование различных методов ИИ и подходов к гибридизации, а также перспективность разработки методов адаптации прецедентов с применением ИИ при построении подобных систем.

Ключевые слова: кооперативная самонастраивающаяся гибридная интеллектуальная система; гибридизация; прецедент; система поддержки принятия решений

DOI: 10.14357/08696527250206

EDN: BSHKZL

1 Введение

Современная медицина сталкивается с беспрецедентным ростом объема данных: от электронных медицинских карт до высокоточных изображений и геномных последовательностей [1, 2]. Однако сложность клинической практики заключается не только в обработке больших данных, но и в их слабой структурированности, неоднородности, многообразии, динамичности и неполноте диагностических признаков, нечеткости терминов, субъективности оценок и других особенностях данной предметной области [3, 4]. Одна из парадигм ИИ, частично соответствующая данным условиям, — рассуждения по прецедентам (*англ.* Case-Based Reasoning, CBR), которые имитируют естественный для врачей процесс мышления: поиск аналогий в прошлом опыте. Вместо того чтобы опираться только на общие сведения о проблемной области или создавать связи

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00392, <https://rscf.ru/project/24-21-00392/>.

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ser-list-post@yandex.ru

²ООО «Автотор информационные технологии», luchko@inbox.ru

между общими характеристиками проблем и решениями, этот подход использует конкретные знания о предыдущих ситуациях [5]. Системы CBR выполняют «ленивое» обучение, сохраняя прецеденты без генерализации [6], что особенно полезно, если знания «распределены» по конкретным примерам, которые сложно, невозможно или нецелесообразно обобщать.

В чистом виде метод CBR характеризуется множеством недостатков, ограничивающих его применение в медицинских приложениях. Качество рекомендуемых решений сильно зависит от репрезентативности библиотеки прецедентов (БП), что с учетом высокой размерности прецедентов для реальных проблем обуславливает ее большой объем, длительный период построения и высокие вычислительные затраты на поиск в ней. В реальных условиях полностью одинаковые случаи встречаются крайне редко или вообще невозможны, поэтому решение, принятое в похожем случае, должно адаптироваться к текущей ситуации. Стандартные механизмы адаптации прецедентов в CBR не учитывают особенностей решаемой проблемы ввиду отсутствия ее модели или обобщенных знаний о ней. Также невозможна обработка классическим методом CBR сложных представлений данных о пациентах, например временных рядов, изображений, графовых структур или текста на естественном языке. Эти ограничения обуславливают интеграцию метода CBR с другими технологиями ИИ и необходимость разработки гибридных интеллектуальных систем (ГиИС) для решения практических проблем. Такой синтез позволит преодолеть ограничения «чистых» методов ИИ и приблизить алгоритмы к интуитивному, контекстно-зависимому клиническому мышлению.

В данной статье рассматриваются основные понятия метода CBR, а также анализируются существующие подходы к разработке систем поддержки принятия врачебных решений с его использованием на предмет применения их при построении КСГиИС, концепция которых предложена в [7]. Кооперативные самонастраивающиеся ГиИС интегрируют разнородные компьютерные модели врачей, которые не только вырабатывают индивидуальные диагнозы и оценки состояния пациента, но и сотрудничают, обмениваясь частными «мнениями», дополняя и улучшая их на всех этапах процесса ведения пациента в характерных для клинической практики условиях.

2 Основные понятия метода рассуждений на основе прецедентов

Метод CBR можно сравнить с рассуждениями по аналогии: при таком подходе решение новой проблемы ищется на основе ее сходства с одной или несколькими ранее решенными проблемами, т. е. адаптируются уже известные решения вместо того, чтобы разрабатывать новое с нуля [8, 9]. Таким образом, предполагается, что схожие проблемы должны иметь схожие решения [10]. Подходы к представлению прецедентов могут быть как простыми линейными, так и сложными иерархическими, что оказывает значительное влияние на различные аспекты работы системы [11]. В общем виде прецедент представляется выражением

$$\text{case} = \langle \text{PRCDT}, \text{SOL} \rangle,$$

где PRCDT — набор признаков, описывающих проблему; SOL — набор признаков, описывающих решение [12].

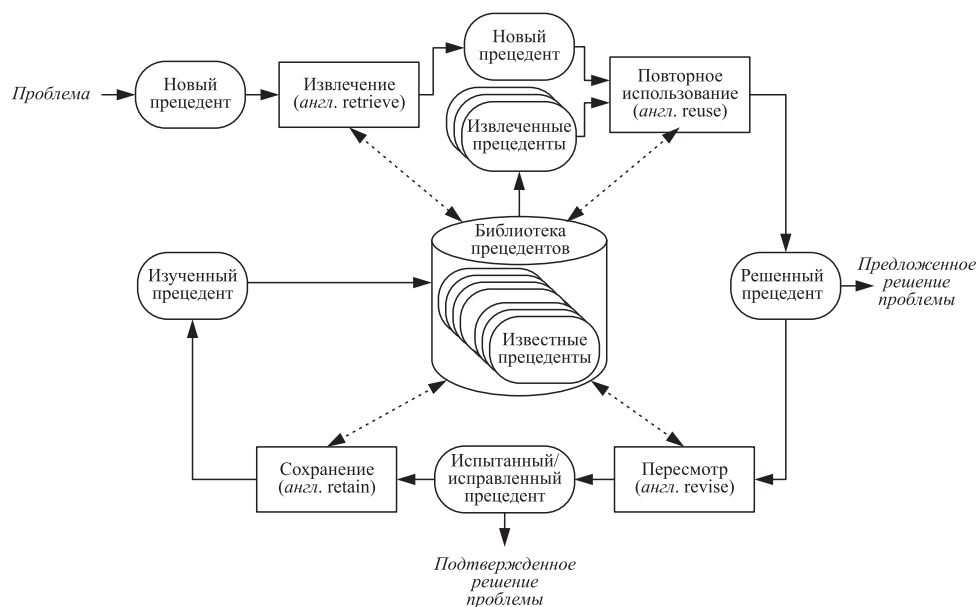
Если необходимо сохранять также характеристики результата применения решения проблемы, прецедент может представляться выражением

$$\text{case} = \langle \text{PRCDT}, \text{SOL}, \text{REST} \rangle,$$

где REST — набор признаков, описывающих результат решения проблемы и его оценку [12].

В [11] отмечается, что чаще всего в системах CBR используется векторное (параметрическое) представление прецедентов благодаря простоте его реализации. Однако данное представление не учитывает множество НЕ-факторов [13], характерных для практических проблем, что обуславливает необходимость применения других форм представления [11, 12, 14]: фреймового, объектно-ориентированного, текстового, иерархического, нечеткого, темпорального, графического, на основе предикатов, семантических сетей, онтологий и других специфических для конкретных предметных областей.

Традиционно рассуждения на основе прецедентов выполняются в соответствии с классической циклической моделью, представленной на рисунке [5].



Цикл рассуждений по прецедентам (CBR-цикл)

Модель на рисунке получила название 4RE по первым буквам действий цикла [12, 15]:

- извлечение (*англ.* retrieve), в результате которого один или несколько известных прецедентов, наиболее похожих на рассматриваемую проблему (новый прецедент), извлекаются из БП. Ключевые элементы этого действия — мера сходства, количественно описывающая степень близости двух прецедентов, и метод извлечения, предписывающий порядок выбора прецедентов из БП. В простейшем случае, когда прецедент представляется числовым вектором, могут применяться метрические меры сходства, например евклидова или манхэттенская метрика, а также метод ближайшего соседа [11], предполагающий выбор из БП прецедента с максимальным значением меры сходства;
- повторное использование (*англ.* reuse), при котором опыт и знания, полученные в ходе анализа прошлых ситуаций, применяются для решения новых проблем, а полученные в результате извлечения прецеденты адаптируются к новым условиям, чтобы найти релевантное решение [12]. Если текущая проблема идентична ранее рассмотренной, решение может быть скопировано из прецедента и использовано без дополнительной адаптации. На практике же проблемы в точности никогда не повторяются и полученное ранее решение необходимо адаптировать к новым условиям. Выделяются три основных способа адаптации: замена части решения на другую или несколько других; изменение структуры решения путем добавления, удаления или замены ее частей; генеративные адаптации (наиболее сложный способ), воспроизводящие метод получения решения новой проблемы;
- пересмотр (*англ.* revise) — предложенное решение проверяется в реальном мире или на релевантной вычислительной модели, выполняется анализ и оценка результатов его применения [16], после чего оно корректируется в случае несоответствия требованиям. Данный этап обычно выполняется экспертами-людьми в большинстве экспериментальных и коммерческих CBR-систем [17];
- сохранение (*англ.* retain) — вновь принятое решение сохраняется в БП для решения проблем в будущем.

В [18] отмечается, что CBR — это методология, т. е. она может использовать различные технологии при реализации действий CBR-цикла, выступая основой для их гибридизации.

3 Подходы к построению гибридных интеллектуальных систем

Под ГиИС будем понимать систему, для реализации которой интегрируются два или более методов, реализованных в рамках различных интеллектуальных технологий [19, 20]. Основные цели гибридизации интеллектуальных технологий: обеспечение решения слабоструктурированных и неструктурированных

проблем, обработка разнородных данных и знаний, учет различных типов неопределенности (стохастической, лингвистической и др.) для получения гибких и надежных решений [2, 21, 22].

Традиционно [21, 23] выделяются следующие классы гибридов в зависимости от степени интеграции интеллектуальных методов:

- (1) автономные (АГ), состоящие из отдельных программных компонентов, не взаимодействующих между собой, каждый из которых решает поставленную ему задачу с помощью своей интеллектуальной технологии [23]. Это вырожденный случай интеграции, здесь не предполагается усиление возможностей компонентов за счет их объединения, но он может быть полезен для сравнения эффективности методов решения задачи или быстрого создания первичного прототипа;
- (2) трансформационные (ТГ), которые во многом аналогичны автономным в том, что отдельные программные компоненты не взаимодействуют напрямую [23]. Различие состоит в том, что в трансформационных системах результаты работы одного компонента применяются разработчиками при построении другого;
- (3) слабосвязанные (СлГ) — программные системы, элементы которых взаимодействуют между собой посредством некоторых интерфейсов [24], например путем обмена файлами данных [23]. Такие системы проще в разработке по сравнению с более интегрированными, но менее производительны при использовании медленных интерфейсов между элементами;
- (4) сильносвязанные (СиГ), элементы которых взаимодействуют, обмениваясь информацией с использованием множества каналов, в том числе между отдельными частями разных элементов [24], или общей памяти [23], что повышает их интерактивные возможности и скорость взаимодействия, но затрудняет разработку и сопровождение [23];
- (5) полностью интегрированные (ПИГ), элементы которых реализуются с использованием единых моделей данных и представлений знаний, а связь между ними обусловлена двойственной природой используемых моделей [23]. Рассуждения могут выполняться либо совместно в ходе однорангового взаимодействия, либо с применением компонента-контроллера.

Реальная интеграция интеллектуальных технологий выполняется только в последних трех классах гибридов, для чего используются следующие методы:

- гибридизация с взаимодействием (ГВ) [25–27] или крупнозернистая (в смысле А. В. Колесникова [21]), когда несколько методов, реализованных в рамках различных интеллектуальных технологий, работают относительно независимо над решением различных частей общей проблемы, обмениваясь данными по мере необходимости. Такой подход актуален, если решаемая проблема может быть разделена на подпроблемы, для каждой из которых существует релевантный ей метод [25];

- гибридная с функциональной заменой (ГФЗ) [25–27] или мелкозернистая (в смысле А. В. Колесникова [21]), когда отдельные функции одного метода, реализованного в рамках определенной интеллектуальной технологии, замещаются другим методом в рамках другой технологии или его частями. Цель такой гибридной — преодоление недостатков отдельных методов за счет наделения их сильными сторонами других [25];
- полиморфная гибридная (ПГ) [25–27], при которой одна интеллектуальная технология используется для имитации и реализации другой. Подобные гибриды применяют различные подходы к обработке информации в рамках одной архитектуры [25].

С целью оценки возможностей по гибридной методу СВР при разработке КСГиИС [7] для решения проблем в области медицины рассмотрим существующие реализации систем поддержки принятия врачебных решений на основе СВР, применяющие гибридный подход.

4 Гибридная в прецедентных системах поддержки принятия врачебных решений

Системы поддержки принятия врачебных решений с рассуждениями на основе прецедентов (СППВРРОП) — инструмент, использующий данные, знания и метод СВР для помощи врачам — лицам, принимающим решения (ЛПР), и повышения эффективности их работы [12]. Основа СППВРРОП — СВР-цикл, представленный на рисунке, который дополнен интерфейсами с экспертами, ЛПР и внешней средой, а также блоком анализа ситуации [11]. Интерфейс с экспертами обеспечивает им возможность управления БП. Интерфейс с ЛПР позволяет ему вводить в систему информацию для формирования описания проблемы и получать предлагаемое решение. Интерфейс с внешней средой взаимодействует с объектом, получая информацию из баз данных и контроллеров, после чего передает ее в блок анализа ситуации. Последний предназначен для формирования описания проблемы (нового прецедента) на основе информации из внешней среды, от ЛПР и экспертов, поступающей через интерфейсы.

В ходе анализа работ с 2016 по 2024 гг., посвященных применению методологии СВР в медицине, были отобраны 55 исследований. Гибридный подход применяется в 30 из них, кратко описанных далее.

В [28] рассматривается комбинирование с СВР-подходом таких классификаторов, как метод k ближайших соседей, искусственная нейронная сеть, метод опорных векторов, классификатор Парзена, которые используются на этапе предварительной обработки для выполнения процедур выбора значимых параметров прецедентов и снижения размерности. Экспериментально показаны преимущества метода опорных векторов для интеграции с СВР при разработке систем поддержки принятия врачебных решений, диагностирующих сердечно-сосудистые заболевания. Аналогичный подход используется в [29], где в СППВРРОП

для диагностики заболеваний печени метод CBR используется совместно с нейронной сетью, случайным лесом на основе деревьев решений, логистической регрессией, методом опорных векторов и наивным байесовским алгоритмом. В работе [30] отбор значимых параметров прецедентов с использованием глубокого обучения, случайного леса, бэггинга, линейной регрессии и байесовской сети применяется при построении гибридного алгоритма на основе CBR для диагностики ишемической болезни сердца. Авторы [31] рассматривают влияние внешних характеристик прецедента (специальность врачей, готовность раскрыть настоящее имя, оценка качества случая) на эффективность персонализированной системы поддержки принятия врачебных решений для диагностирования рака молочной железы, используя при этом метод k ближайших соседей и наивный байесовский алгоритм. В [32] правила диагностики сердечно-сосудистых заболеваний извлекаются из карт пациентов методом деревьев решений и служат основой для построения библиотеки прецедентов СППВРРОП. Авторы [33] разработали гибридную систему классификации медицинских данных, сочетающую методы деревьев решений и случайного леса с методом CBR. Система протестирована на четырех медицинских наборах данных (рак молочной железы, гепатит, патологии щитовидной и молочной желез). В [34] диагностика диабета осуществляется гибридным методом, содержащим классификатор на основе нечеткого дерева решений и CBR-цикл.

Авторы [35] применяют методы обработки естественного языка на основе статистической лингвистики для формирования онтологий, используемых в рамках CBR-цикла для диагностики COVID-19 на ранней стадии. Исследование [36] объединяет объяснимость и ориентированность на пользователя CBR-подхода с возможностями методов глубокого обучения и обработки естественного языка для построения медицинских радиологических отчетов. Работа [37] посвящена повышению объяснимости рекомендаций медицинской СППВРРОП для лечения рака молочной железы. С этой целью авторами разработан пользовательский интерфейс системы с применением методов визуализации и когнитивной графики, в частности метод искусственных кормящихся птиц, основанный на моделировании поведения голубей. Данный интерфейс отображает количественное и качественное сходство между запросом и похожими прецедентами, что позволяет легко классифицировать запрос путем визуального обоснования полностью объяснимым образом.

Метод для классификации рака легких на основе CBR с отбором признаков прецедентов на основе градиентных деревьев вознаграждений, обеспечивающий точную диагностику по сокращенному набору генов, и адаптацией с использованием эвристики k ближайших соседей разработан в [38].

В [39] предложен подход к оптимизации дозировки лекарств при лечении рака простаты на основе CBR с адаптацией прецедентов на стадии повторного использования методом целочисленного программирования.

В статье [40] представлена СППВРРОП для диагностики рака молочной железы, которая может одновременно работать как с непрерывными, так

и с дискретными атрибутами прецедентов. Оценка весов атрибутов прецедентов, использующихся при расчете меры сходства, выполняется как автоматически генетическим алгоритмом, так и экспертами с применением метода Дельфи.

В исследовании [41] диагностику, прогнозирование и назначение лечения сердечно-сосудистых заболеваний предлагается выполнять методом CBR с применением искусственной нейронной сети и радиальной базисной функции. Подход на основе интеграции метода CBR с искусственной нейронной сетью, обучающейся на извлеченных прецедентах, применяется также в [42] для диагностики дерматологических заболеваний. В исследовании [43] используется гибридная модель, интегрирующая метод сверточных нейронных сетей и CBR, для повышения эффективности скрининга детей с задержками развития.

В [44] рассматривается разработанная автоматизированная система на основе CBR для мониторинга, диагностики и контроля внутрибольничных инфекций. Ее модуль обработки естественного языка, состоящий из нескольких наивных байесовских классификаторов (по одному на тип инфекции), обрабатывает электронные записи врачей и комментарии медперсонала, чтобы выявить скрытые признаки возникновения основных внутрибольничных инфекций. В системе используются также механизмы рассуждений на основе правил, как определенных экспертом, так и автоматически сгенерированных из прецедентов. В [45] предлагается СППВРРОП для врачей, ведущих пациентов с терминальной стадией почечной недостаточности, проходящих поддерживающий гемодиализ. Основная ее цель — помощь в назначении лекарств и выбора дозировки с использованием гибридного метода на основе CBR и вывода с помощью продукционных правил. Авторы работы [46] разработали и экспериментально исследовали на примере диагностики и лечения пациентов с болью в спине эффективный метод адаптации прецедентов путем абстрагирования при построении СППВРРОП.

Метод на основе CBR для быстрого и эффективного реагирования на чрезвычайные ситуации в области общественного здравоохранения (эпидемии инфекционных заболеваний, включая грипп, Эболу, атипичную пневмонию и COVID-19) предложен в [47]. На этапе извлечения выполняется кластеризация прецедентов методом серого кластерного анализа и выбираются релевантные прецеденты. Извлеченные случаи используются в качестве начальных гнезд в алгоритме кукушки, с помощью которого выполняется поиск оптимального решения.

Онтологический подход к построению СППВРРОП для диагностики хронических заболеваний почек применяется в [48]. С целью отбора параметров прецедентов, используемых при определении их сходства, применяются такие алгоритмы классификации, как деревья решений, метод опорных векторов, алгоритм нечетко-грубой классификации ближайшего соседа и наивный байесовский подход. В [49] предлагается структура CBR на основе нечеткой онтологии для диагностики сахарного диабета. Аналогичный подход с использованием CBR на основе нечеткой онтологии для диагностики заболеваний желудка представлен в [50]. Метод CBR на основе вероятностной онтологии, который реализует алгоритм вероятностного семантического поиска и обеспечивает обработку

неоднозначности и неопределенности, предложен в [51] для диагностики рака молочной железы. Метод диагностики женского бесплодия на основе интеграции онтологического подхода с методом CBR представлен в [52]. Интеллектуальная система назначения персонифицированного лечения на основе онтологического метода CBR представлена в [53]. Для реализации CBR-подхода в [54] предлагается онтологическая модель прецедентов и гибридный алгоритм их извлечения на основе теории структурного отображения и метода ближайшего соседа.

В работе [55] СППВРРОП для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний реализуется в виде многоагентной системы, каждый агент которой выполняет отдельный этап CBR-цикла. Реализация метода CBR с использованием многоагентного подхода рассматривается также в работе [56] для выбора лечения лихорадки денге.

В исследовании [57] для назначения дозы инсулина при диабете первого типа предлагается метод CBR с темпоральными прецедентами, фиксирующими несколько значений отслеживаемых параметров пациента в течение определенного промежутка времени. При адаптации извлеченных прецедентов в данном методе используется стратегия регрессии k ближайших соседей для усреднения предлагаемой дозы инсулина.

Основные особенности рассмотренных гибридных СППВРРОП представлены в таблице.

Как видно из таблицы, существующие СППВРРОП используются для диагностики заболеваний, классификации, назначения лечения, прогнозирования, мониторинга, контроля и принятия управленческих решений. Среди рассмотрен-

Анализ разработок СППВРРОП, реализующих гибридный подход

Исследование	Назначение	Область применения	Метод адаптации прецедентов	Гибридизация (класс, метод)	Применяемые технологии
[28]	Диагностика	Сердечно-сосудистые заболевания	Нет	ТГ, нет	CBR, k ближайших соседей, искусственная нейронная сеть, метод опорных векторов, метод окна Парзена
[29]	Диагностика	Заболевания печени	Нет	ТГ, нет	CBR, искусственная нейронная сеть, случайный лес, логистическая регрессия, метод опорных векторов, наивный байесовский алгоритм
[30]	Диагностика	Ишемическая болезнь сердца	Нет	СлГ, ГВ	CBR, глубокое обучение, случайный лес, бэггинг, линейная регрессия, байесовская сеть
[31]	Диагностика	Рак молочной железы	Нет	СиГ, ГВ	CBR, k ближайших соседей, наивный байесовский алгоритм

Продолжение таблицы на с. 90

Анализ разработок СППВРРОП, реализующих гибридный подход (продолжение)

Исследование	Назначение	Область применения	Метод адаптации прецедентов	Гибридизация (класс, метод)	Применяемые технологии
[32]	Диагностика	Сердечно-сосудистые заболевания	Полуавтоматическая (ручная) экспертами	ТГ, нет	СВР, продукционные правила, деревья решений
[33]	Диагностика, классификация	Гепатит, патологии щитовидной и молочной желез	Нет	СлГ, ГВ	СВР, деревья решений, случайный лес
[34]	Диагностика	Диабет	Нет	СиГ, ГФЗ	СВР, нечеткие деревья решений
[35]	Диагностика	Covid-19	Эвристическая на основе онтологии	СиГ, ГФЗ	СВР, онтологии, статистическая лингвистика
[36]	Диагностика	Радиология	Двунаправленная рекуррентная нейронная сеть долгой краткосрочной памяти	СиГ, ГФЗ	СВР, глубокое обучение, двунаправленная рекуррентная нейронная сеть долгой краткосрочной памяти, модель обработки естественного языка, специфичная для клинических данных
[37]	Назначение лечения	Рак молочной железы	Нет	СлГ, ГВ	СВР, визуализация и когнитивная графика (метод искусственных кормящихся птиц)
[38]	Диагностика и классификация	Рак легких	k ближайших соседей	ТГ, нет	СВР, k ближайших соседей, градиентные деревья вознаграждений
[39]	Назначение лечения	Рак простаты	Целочисленное программирование	СлГ, ГФЗ	СВР, целочисленное программирование
[40]	Диагностика	Рак молочной железы	Нет	СлГ, ГВ	СВР, генетический алгоритм, метод Дельфи
[41]	Диагностика, прогнозирование, назначение лечения	Сердечно-сосудистые заболевания	Нет	СлГ, ГВ	СВР, искусственная нейронная сеть, радиальная базисная функция
[42]	Диагностика	Дерматологические заболевания	Искусственная нейронная сеть	СлГ, ГФЗ	СВР, искусственная нейронная сеть
[43]	Диагностика	Задержки развития	Нет	СлГ, ГВ	СВР, искусственные нейронные сети (сверточная, трансформер)

Окончание таблицы на с. 91

Анализ разработок СППВРРОП, реализующих гибридный подход (окончание)

Исследование	Назначение	Область применения	Метод адаптации прецедентов	Гибридизация (класс, метод)	Применяемые технологии
[44]	Мониторинг, диагностика, контроль	Внутрибольничные инфекции	Производственные правила	СиГ, ГФЗ	СВР, обработка естественного языка, байесовский классификатор, деревья решений, производственные правила
[45]	Назначение лечения	Почечная недостаточность	Производственные правила	СлГ, ГФЗ	СВР, производственные правила
[46]	Диагностика, назначение лечения	Боль в спине	Абстрагирование	СлГ, ГВ	СВР, производственные правила
[47]	Управление	Эпидемии инфекционных заболеваний	Алгоритм кукушки	СлГ, ГФЗ	СВР, серый кластерный анализ, алгоритм кукушки
[48]	Диагностика	Хронические заболевания почек	Нет	ТГ, нет	СВР, онтологии, деревья решений, метод опорных векторов, алгоритм нечетко-грубой классификации ближайшего соседа и наивный байесовский подход
[49]	Диагностика	Диабет	Нет	СиГ, ГФЗ	СВР, нечеткие онтологии
[50]	Диагностика	Заболевания желудка	Нет	СиГ, ГФЗ	СВР, нечеткие онтологии
[51]	Диагностика	Рак молочной железы	Нет	СиГ, ГФЗ	СВР, вероятностные онтологии
[52]	Диагностика	Женское бесплодие	Нет	СиГ, ГФЗ	СВР, онтологии
[53]	Диагностика, назначение лечения	Общее назначение	Нет	СиГ, ГФЗ	СВР, онтологии
[54]	Диагностика, классификация	Состояние пациента после операции	Нет	СиГ, ГФЗ	СВР, онтологии, теория структурного отображения, метод ближайшего соседа, кластеризация
[55]	Диагностика	Сердечно-сосудистые заболевания	Нет	ПИГ, ПГ	СВР, многоагентные системы
[56]	Назначение лечения	Лихорадка Денге	Нет	СлГ, ГВ	СВР, многоагентные системы
[57]	Назначение лечения	Диабет 1-го типа	k ближайших соседей	СлГ, ГФЗ	СВР, k ближайших соседей

ных СППВРРОП присутствуют как системы общего назначения, обеспечивающие первичную диагностику независимо от области медицины, так и узкоспециализированные решения, направленные на уточнение диагноза либо подбор схемы лечения.

При разработке систем поддержки принятия врачебных решений совместно с методом CBR применяется множество различных методов и технологий. При этом используются все методы гибридизации по классификации [25] для построения гибридов различной степени интеграции методов [21, 23], за исключением АГ, которые не считаются полноценными гибридами и, очевидно, применяются лишь на предварительных стадиях исследований. Это демонстрирует гибкость подхода CBR и возможность его интеграции с разнообразными методами ИИ, машинного обучения и когнитивной графики, а также подтверждает актуальность гибридизации метода CBR для решения практических проблем. Так, интересной представляется интеграция с ДСМ-методом [58, 59] и методом использования причинно-следственных связей в задаче классификации [60]. Они могут применяться как для построения ТГ или ГВ на этапе предварительной классификации прецедентов аналогично [28–31], так и для ГФЗ при повторном использовании и пересмотре прецедентов в рамках CBR-цикла.

В большинстве случаев, представленных в таблице, на этапе повторного использования CBR-цикла адаптация извлеченных прецедентов либо не выполняется, т. е. пользователю представляются все извлеченные прецеденты, либо выполняется с привлечением экспертов. Это обусловлено как сложностью данной стадии применительно к медицинским системам, так и серьезными последствиями ошибочных решений. Таким образом, ГФЗ с применением методов ИИ для адаптации прецедентов в СППВРРОП представляется одним из перспективных направлений будущих исследований.

5 Заключение

В работе показана необходимость разработки гибридных методов ИИ, в частности КСГиИС, для работы в условиях клинической практики. В качестве одного из подходов, которые могут быть использованы в КСГиИС, рассматривается метод CBR. Он обеспечивает работу в условиях слабой формализации проблемы и самообучение системы, но в чистом виде ограничен в возможностях по обобщению опыта и обработке сложных представлений данных о пациентах. Рассмотрены понятие ГиИС, их основные классы и подходы к интеграции различных интеллектуальных технологий в составе одной системы. Представлена общая схема метода CBR, а также проведен анализ подходов к гибридизации с его применением при разработке СППВРРОП. Представленный анализ продемонстрировал широкий спектр применяемых методов ИИ, машинного обучения и когнитивной графики, а также актуальность всех трех подходов из [25] для гибридизации CBR.

Литература

1. Шестаков О. В. Усиленный закон больших чисел для оценки риска в задаче реконструкции томографических изображений из проекций с коррелированным

- шумом // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 41–45. doi: 10.14357/19922264160306. EDN: WMJXRV.
2. *Кривенко М. П.* Мягкие вычисления в задачах медицинской диагностики // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 2. С. 52–59. doi: 10.14357/19922264210208. EDN: VFNFRR.
3. *Кобринский Б. А.* Искусственный интеллект в медицине: горячие точки // 19-я Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием: Труды конференции / Под ред. В. В. Борисова, Б. А. Кобринского. — Ростов-на-Дону; Таганрог: ЮФУ, 2021. С. 13–29.
4. *Румовская С. Б.* Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в медицине: понятие, проблемы, подходы к разработке // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 2. С. 107–122. doi: 10.14357/08696527240208. EDN: IJDVVV.
5. *Aamodt A., Plaza E.* Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches // AI Commun., 1994. Vol. 7. Iss. 1. P. 39–59.
6. *Leake D., Wilkerson Z., Crandall D.* Combining case-based reasoning with deep learning: Context and ongoing case feature learning research. <https://openreview.net/pdf?id=nc9XqnaLys>.
7. *Румовская С. Б., Парамзин Ф. Н.* Кооперативные самонастраивающиеся гибридные интеллектуальные системы персонализированной диагностики и прогнозирования в медицине: концепция, подход к разработке, декомпозиция проблемы // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 4. С. 59–72. doi: 10.14357/08696527240405. EDN: YLQTQU.
8. *De Mántaras R. L., Plaza E.* Case-based reasoning: An overview // AI Commun., 1997. Vol. 10. Iss. 1. P. 21–29.
9. *Goel A., Diaz-Agudo B.* What's hot in case-based reasoning // 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence Proceedings, 2017. Vol. 31. Iss. 1. P. 5067–5069.
10. *Aleven V.* Using background knowledge in case-based legal reasoning: A computational model and an intelligent learning environment // Artif. Intell., 2003. Vol. 150. P. 183–237. doi: 10.1016/S0004-3702(03)00105-X.
11. *Варшавский П. Р., Еремеев А. П.* Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений, 2009. Вып. 2. С. 45–57.
12. *Yan A., Cheng Z.* A review of the development and future challenges of case-based reasoning // Appl. Sci. — Basel, 2024. Vol. 14. Iss. 16. Art. 7130. 22 p. doi: 10.3390/app14167130.
13. *Нариньяни А. С.* Инженерия знаний и НЕ-факторы: краткий обзор-08 // Вопросы искусственного интеллекта, 2008. Вып. 1. С. 61–77.
14. *Shaker H., Elmogy M.* Case based reasoning: Case representation methodologies // Int. J. Advanced Computer Science Applications, 2015. Vol. 6. Iss. 11. P. 192–208. doi: 10.14569/ijacsa.2015.061126.
15. *Jian C., Zhe T., Zhenxing L.* A review and analysis of case-based reasoning research // Conference (International) on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City Proceedings. — IEEE, 2015. P. 51–55. doi: 10.1109/ICITBS.2015.19.
16. *Kolodner J. L.* An introduction to case-based reasoning // Artif. Intell. Rev., 1992. Vol. 6. P. 3–34. doi: 10.1007/BF00155578.

17. Pavón R., Corchado Rodríguez J. M., Gómez Rodríguez A., Laza R. Improving the revision stage of a CBR system with belief revision techniques // *Computing Information Systems*, 2001. Vol. 8. Iss. 2. P. 40–45.
18. Watson I. Case-based reasoning is a methodology not a technology // *Knowl.-Based Syst.*, 1999. Vol. 12. Iss. 5-6. P. 303–308.
19. Колесников А. В., Куриков И. А., Лустонад С. В., Румовская С. Б., Доманицкий А. А. Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. — М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с.
20. Nolle L., Stahl F., El-Mihoub T. On explanations for hybrid artificial intelligence // *Artificial Intelligence XL* / Eds. M. Bramer, F. Stahl. — *Lecture notes in computer science ser.* — Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. Vol. 14381. P. 3–15. doi: 10.1007/978-3-031-47994-6_1.
21. Колесников А. В., Куриков И. А. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. — М.: ИПИ РАН, 2007. 387 с.
22. Borisov V. V. Hybridization method of intelligent models // *Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем*, 2020. Вып. 4. С. 137–140. EDN: MPWSFO.
23. Medsker L. R. Hybrid intelligent systems. — Boston, MA, USA: Springer US, 1995. 312 p. doi: 10.1007/978-1-4615-2353-6.
24. Sun R. Hybrid connectionist-symbolic modules: A report from the IJCAI-95 Workshop on Connectionist-Symbolic Integration // *AI Mag.*, 1996. Vol. 17. Iss. 2. P. 99–103. doi: 10.1609/aimag.v17i2.1225.
25. Goonatilake S., Khebbal S. Intelligent hybrid systems: Issues, classifications and future directions // *Intelligent hybrid systems* / Eds. S. Goonatilake, S. Khebbal. — Chichester: John Wiley and Sons, 1995. P. 1–19.
26. Аверкин А. Н., Прокопчина С. В. Мягкие вычисления и измерения // *Интеллектуальные системы*, 1997. Т. 2. Вып. 1-4. С. 93–114. EDN: LRQYBQ.
27. Borisov V. Hybridization of intellectual technologies for analytical tasks of decision-making support // *J. Computer Engineering Informatics*, 2014. Vol. 2. Iss. 1. P. 11–19.
28. Viveros-Melo D., Ortega-Adarme M., Blanco Valencia X., Castro-Ospina A. E., Murillo Rendón S., Peluffo-Ordóñez D. H. Razonamiento basado en casos aplicado al diagnóstico médico utilizando clasificadores multi-clase: Un estudio preliminar // *Enfoque UTE*, 2017. Vol. 8. Iss. 1. P. 232–243.
29. Sharma S., Mehrotra D. Two-stage CBR based healthcare model to diagnose liver disease // *Int. J. Computing Digital Systems*, 2021. Vol. 10. Iss. 1. P. 773–780. doi: 10.12785/ijcds/100171.
30. Sapra V., Sapra L., Bhardwaj A., Bharany S., Saxena A., Khalid Karim F., Ghorashi S., Wagdy Mohamed A. Integrated approach using deep neural network and CBR for detecting severity of coronary artery disease // *Alexandria Engineering J.*, 2023. Vol. 68. P. 709–720. doi: 10.1016/j.aej.2023.01.029.
31. Gu D., Zhao W., Xie Y., Wang X., Su K., Zolotarev O. V. A personalized medical decision support system based on explainable machine learning algorithms and ECC features: Data from the real world // *Diagnostics*, 2021. Vol. 11. Iss. 9. Art. 1677. 17 p. doi: 10.3390/diagnostics11091677.

32. *Pusztová L., Babič F., Paralič J.* Semi-automatic adaptation of diagnostic rules in the case-based reasoning process // *Appl. Sci.* — Basel, 2020. Vol. 11. Iss. 1. Art. 292. 18 p. doi: 10.3390/app11010292.
33. *Tarchoune I., Djebbar A., Merouani H. F.* A hybrid CBR classification model by integrating decision tree and random forest into case retrieval // *Conference (International) on Networking and Advanced Systems Proceedings.* — IEEE, 2021. Art. 9628920. 6 p. doi: 10.1109/icnas53565.2021.9628920.
34. *Benamina M., Atmani B., Benbelkacem S.* Diabetes diagnosis by case-based reasoning and fuzzy logic // *Int. J. Interactive Multimedia Artificial Intelligence*, 2018. Vol. 5. Iss. 3. P. 72–80. doi: 10.9781/ijimai.2018.02.001.
35. *Oyelade O. N., Ezugwu A. E.* A case-based reasoning framework for early detection and diagnosis of novel coronavirus // *Informatics Medicine Unlocked*, 2020. Vol. 20. Art. 100395. 22 p. doi: 10.1016/j.imu.2020.100395.
36. *Amador-Domínguez E., Serrano E., Manrique D., Bajo J.* A case-based reasoning model powered by deep learning for radiology report recommendation // *Int. J. Interactive Multimedia Artificial Intelligence*, 2021. Vol. 7. Iss. 2. Art. 15. 12 p. doi: 10.9781/ijimai.2021.08.011.
37. *Lamy J.-B., Sekar B., Guezennec G., Bouaud J., Séroussi B.* Explainable artificial intelligence for breast cancer: A visual case-based reasoning approach // *Artif. Intell. Med.*, 2019. Vol. 94. P. 42–53. doi: 10.1016/j.artmed.2019.01.001.
38. *Ramos-González J., López-Sánchez D., Castellanos-Garzón J. A., De Paz J. F., Corchado J. M.* A CBR framework with gradient boosting based feature selection for lung cancer subtype classification // *Comput. Biol. Med.*, 2017. Vol. 86. P. 98–106. doi: 10.1016/j.combiomed.2017.05.010.
39. *Malekpoor H., Mishra N., Kumar S.* A novel TOPSIS-CBR goal programming approach to sustainable healthcare treatment // *Ann. Oper. Res.*, 2022. Vol. 312. Iss. 2. P. 1403–1425. doi: 10.1007/s10479-018-2992-y.
40. *Gu D., Liang C., Zhao H.* A case-based reasoning system based on weighted heterogeneous value distance metric for breast cancer diagnosis // *Artif. Intell. Med.*, 2017. Vol. 77. P. 31–47. doi: 10.1016/j.artmed.2017.02.003.
41. *Kouser R. R., Manikandan T., Kumar V. V.* Heart disease prediction system using artificial neural network, radial basis function and case based reasoning // *J. Comput. Theor. Nanos.*, 2018. Vol. 15. Iss. 9-10. P. 2810–2817. doi: 10.1166/jctn.2018.7543.
42. *Dabowska N. I. A., Amaitik N. M., Maatuk A. M., Aljawarneh S. A.* A hybrid intelligent system for skin disease diagnosis // *Conference (International) on Engineering and Technology Proceedings.* — Antalya: IEEE, 2017. Art. 830815. 6 p. doi: 10.1109/ICEngTechnol.2017.8308157.
43. *Song Z., Li J., Lai S., Huang S.* Case-based reasoning approach for diagnostic screening of children with developmental delays. — Cornell University, 2024. 14 p. arXiv:2408.02073 [cs.CV].
44. *Gómez-Vallejo H. J., Uriel-Latorre B., Sande-Meijide M., Villamarín-Bello B., Pavón R., Fdez-Riverola F., Glez-Peña D.* A case-based reasoning system for aiding detection and classification of nosocomial infections // *Decis. Support Syst.*, 2016. Vol. 84. P. 104–116. doi: 10.1016/j.dss.2016.02.005.
45. *Ali S. I., Jung S. W., Bilal H. S. M., Lee S.-H., Hussain J., Afzal M., Hussain M., Ali T., Chung T., Lee S.* Clinical decision support system based on hybrid

- knowledge modeling: A case study of chronic kidney disease-mineral and bone disorder treatment // *Int. J. Environ. Res. Pu.*, 2021. Vol. 19. Iss. 1. Art. 226. 28 p. doi: 10.3390/ijerph19010226.
46. Назаренко Г. И., Осипов Г. С., Назаренко А. Г., Молодченков А. И. Интеллектуальные системы в клинической медицине. Синтез плана лечения на основе прецедентов // *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2010. Вып. 1. С. 24–35. EDN: OWVHZZ.
 47. Duan J., Jiao F. Novel case-based reasoning system for public health emergencies // *Risk Management Healthcare Policy*, 2021. Vol. 14. P. 541–553. doi: 10.2147/rmhp.s291441.
 48. Elkader S. A., Elmogy M., El-Sappagh S., Zaied A. N. H. A framework for chronic kidney disease diagnosis based on case based reasoning // *Int. J. Advanced Computer Research*, 2018. Vol. 8. Iss. 35. P. 59–71. doi: 10.19101/ijacr.2018.834003.
 49. Sappagh S. E., Elmogy M. A decision support system for diabetes mellitus management // *Diabetes Case Reports*, 2016. Vol. 1. Iss. 1. Art. 10000102. 13 p. doi: 10.4172/2572-5629.1000102.
 50. Shojaei-Mend H., Ayatollahi H., Abdolahadi A. A fuzzy ontology-based case-based reasoning system for stomach dyspepsia in Persian medicine // *PLOS ONE*, 2024. Vol. 19. Iss. 10. Art. e0309722. 15 p. doi: 10.1371/journal.pone.0309722.
 51. Ben Salem Y., Idoudi R., Saheb Ettabaï K., Hamrouni K., Solaiman B. Ontology based possibilistic reasoning for breast cancer aided diagnosis // *Information systems / Eds. M. Themistocleous, V. Morabito*. — Cham: Springer International Publishing, 2017. P. 353–366. doi: 10.1007/978-3-319-65930-5_29.
 52. Денисова Е. А., Губанова Г. Ф., Леженина С. В., Чернышов В. В. Модель системы поддержки принятия решений на основе рассуждений по прецедентам в области диагностики женского бесплодия // *Международный ж. прикладных и фундаментальных исследований*, 2018. Вып. 7. С. 123–128. EDN: UYUTQA.
 53. Грибова В. В., Ковалев Р. И., Окунь Д. Б. Интеллектуальная система назначения персонализированного лечения по аналогии // *XX Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием: Труды конференции*. — М.: Национальный исследовательский университет МЭИ, 2022. Т. 2. С. 292–301. EDN: TGBMNH.
 54. Варшавский П. Р., Зо Л. К., Алехин Р. В., Ар К. М. Реализация прецедентного модуля для интеллектуальных систем // *Программные продукты и системы*, 2015. Вып. 2. С. 26–31. EDN: UCRAWX.
 55. Korablyov M., Axak N., Fomichov O., Hnidenko V. Multi-agent clinical decision support system using case-based reasoning // *CEUR Workshop Proce.*, 2021. Vol. 2870. P. 1466–1476.
 56. Dhattewal J. S., Malik K., Das P., Kaswan K. S. Medical diagnostic system using embedding JADE in jCOLIBRI // *Conference (International) on Electrical Electronics and Computing Technologies Proceedings*. — IEEE, 2024. Vol. 1. Art. 10739193. 5 p. doi: 10.1109/iceect61758.2024.10739193.
 57. Brown D., Aldea A., Harrison R., Martin C., Bayley I. Temporal case-based reasoning for type 1 diabetes mellitus bolus insulin decision support // *Artif. Intell. Med.*, 2018. Vol. 85. P. 28–42. doi: 10.1016/j.artmed.2017.09.007.
 58. Финн В. К. ДСМ-рассуждения и обнаружение знаний: ампликативные выводы, распознавание причинности и три вида полноты // *Научно-техническая информа-*

- ция. Сер. 2: Информационные процессы и системы, 2022. Вып. 4. С. 4–36. doi: 10.36535/0548-0027-2022-04-2. EDN: GKTAХU.
59. Дюкова Е. В., Масляков Г. О., Янаков Д. С. Корректная классификация по прецедентам: ДСМ-метод над производением частичных порядков // Информатика и её применения, 2024. Т. 18. Вып. 3. С. 61–68. doi: 10.14357/19922264240308. EDN: ZJHDMY.
60. Грушо А. А., Грушо Н. А., Забежайло М. И., Кульченков В. В., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я. Причинно-следственные связи в задачах классификации // Информатика и её применения, 2023. Т. 17. Вып. 1. С. 43–49. doi: 10.14357/19922264230106. EDN: DTQZPK.

Поступила в редакцию 15.03.2025

Принята к публикации 15.04.2025

ANALYSIS OF APPROACHES TO HYBRIDIZATION OF THE CASE-BASED REASONING METHOD IN MEDICAL DECISION SUPPORT SYSTEMS

S. V. Listopad¹ and A. S. Luchko²

¹Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

²Avtotor Information Technologies LLC, 4a Magnitogorskaya Str., Kaliningrad 236013, Russian Federation

Abstract: The paper is aimed at improving the methods of automating problem solving in clinical practice using cooperative self-configuring hybrid intelligent systems that integrate various models and intelligent technologies to achieve a synergistic effect from their interaction. The paper examines the features and evaluates the possibilities of hybridizing one of the artificial intelligence methods, namely, case-based reasoning, when building medical decision support systems. An analysis of works in this area demonstrated the active use of various artificial intelligence methods and hybridization approaches as well as the prospects for developing methods for adapting cases using artificial intelligence methods to build such systems.

Keywords: cooperative self-configuring hybrid intelligent system; hybridization; case; decision support system

DOI: 10.14357/08696527250206

EDN: BSHKZL

Acknowledgments

The study was supported by the grant from the Russian Science Foundation No. 24-21-00392, <https://rscf.ru/project/24-21-00392/>.

References

1. Shestakov, O. V. 2016. Usilennyy zakon bol'shikh chisel dlya otsenki riska v zadache rekonstruktsii tomograficheskikh izobrazheniy iz proektsiy s korrelirovannym shumom [The strong law of large numbers for the risk estimate in the problem of tomographic image reconstruction from projections with a correlated noise]. *Informatika i ee Primeneniya* — *Inform. Appl.* 10(3):41–45. doi: 10.14357/19922264160306. EDN: WMJXRV.
2. Krivenko, M. P. 2021. Myagkie vychisleniya v zadachakh meditsinskoy diagnostiki [Soft computing in problems of medical diagnostics]. *Informatika i ee Primeneniya* — *Inform. Appl.* 15(2):52–59. doi: 10.14357/19922264210208. EDN: VFNFR.
3. Kobrinskiy, B. A. 2021. Iskusstvennyy intellekt v meditsine: goryachie tochki [Artificial intelligence in medicine: Hot spots]. *19-ya Natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem: Trudy konferentsii* [19th National Conference on Artificial Intelligence with International Participation Proceedings]. Eds. V. V. Borisov and B. A. Kobrinskiy. Rostov-on-Don; Taganrog: YuFU. 13–29.
4. Rumovskaya, S. B. 2024. Intellektual'nye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v meditsine: ponyatie, problemy, podkhody k razrabotke [Intelligent decision support systems in medicine: Concept, problems, and approaches to the development]. *Sistemy i Sredstva Informatiki* — *Systems and Means of Informatics* 34(2):107–122. doi: 10.14357/08696527240208. EDN: IJDVVV.
5. Aamodt, A., and E. Plaza. 1994. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI Commun.* 7(1):39–59.
6. Leake, D., Z. Wilkerson, and D. Crandall. 2023. Combining case-based reasoning with deep learning: Context and ongoing case feature learning research. Available at: <https://openreview.net/pdf?id=nc9XqnaLys> (accessed April 17, 2025).
7. Rumovskaya, S. B., and F. N. Paramzin. 2024. Kooperativnye samonastroyayushchiesya gibridnye intellektual'nye sistemy personalizirovannoy diagnostiki i prognozirovaniya v meditsine: kontseptsiya, podkhod k razrabotke, dekompozitsiya problem [Cooperative self-configuring hybrid intelligent systems for personalized diagnostics and prognosis in medicine: Conceptual idea, development approach, and problem decomposition]. *Sistemy i Sredstva Informatiki* — *Systems and Means of Informatics* 34(4):59–72. doi: 10.14357/08696527240405. EDN: YLQTQU.
8. De Mántaras, R. L., and E. Plaza. 1997. Case-based reasoning: An overview. *AI Commun.* 10(1):21–29.
9. Goel, A., and B. Diaz-Agudo. 2017. What's hot in case-based reasoning. *31st AAAI Conference on Artificial Intelligence Proceedings*. 31(1):5067–5069.
10. Aleven, V. 2003. Using background knowledge in case-based legal reasoning: A computational model and an intelligent learning environment. *Artif. Intell.* 150:183–237. doi: 10.1016/S0004-3702(03)00105-X.
11. Varshavskiy, P. R., and A. P. Ereemeev. 2010. Modeling of case-based reasoning in intelligent decision support systems. *Scientific Technical Information Processing* 37(5):336–345. doi: 10.3103/S0147688210050096. EDN: OMLMAZ.
12. Yan, A., and Z. Cheng. 2024. A review of the development and future challenges of case-based reasoning. *Appl. Sci.* — *Basel* 14(16):7130. 22 p. doi: 10.3390/app14167130.

13. Narinyani, A. S. 2008. Inzheneriya znaniy i NE-factory: kratkiy obzor-08 [Knowledge engineering and NON-factors: A brief overview-08]. *Voprosy iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence Issues] 1:61–77.
14. Shaker, H., and M. Elmogy. 2015. Case based reasoning: Case representation methodologies. *Int. J. Advanced Computer Science Applications* 6(11):192–208. doi: 10.14569/ijacsa.2015.061126.
15. Jian, C., T. Zhe, and L. Zhenxing. 2015. A review and analysis of case-based reasoning research. *Conference (International) on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City Proceedings*. IEEE. 51–55. doi: 10.1109/ICITBS.2015.19.
16. Kolodner, J. L. 1992. An introduction to case-based reasoning. *Artif. Intell. Rev.* 6:3–34. doi: 10.1007/BF00155578.
17. Pavón, R., J. M. Corchado Rodríguez, A. Gómez Rodríguez, and R. Laza. 2001. Improving the revision stage of a CBR system with belief revision techniques. *Computing Information Systems* 8(2):40–45.
18. Watson, I. 1999. Case-based reasoning is a methodology not a technology. *Knowl.-Based Syst.* 12(5-6):303–308.
19. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and A. A. Domantskiy. 2011. *Reshenie slozhnykh zadach kommivoyazhera metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh sistem* [Complex travelling salesman problems solved by the methods of the functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 295 p.
20. Nolle, L., F. Stahl, and T. El-Mihoub. 2023. On explanations for hybrid artificial intelligence. *Artificial intelligence XL*. Eds. M. Bramer and F. Stahl. Lecture notes in computer science ser. Cham: Springer Nature Switzerland. 14381:3–15. doi: 10.1007/978-3-031-47994-6_1.
21. Kolesnikov, A. V., and I. A. Kirikov. 2007. *Metodologiya i tekhnologiya resheniya slozhnykh zadach metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh sistem* [Methodology and technology for solving complex problems using the methods of functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 387 p.
22. Borisov, V. V. 2020. Hybridization method of intelligent models. *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh sistem* [Open Semantic Technology for Intelligent Systems] 4:137–140. EDN: MPWSFO.
23. Medsker, L. R. 1995. *Hybrid intelligent systems*. Boston, MA: Springer US. 312 p. doi: 10.1007/978-1-4615-2353-6.
24. Sun, R. 1996. Hybrid connectionist-symbolic modules: A report from the IJCAI-95 Workshop on Connectionist-Symbolic Integration. *AI Mag.* 17(2):99–103. doi: 10.1609/aimag.v17i2.1225.
25. Goonatilake, S., and S. Khebbal. 1995. Intelligent hybrid systems: Issues, classifications and future directions. *Intelligent hybrid systems*. Eds. S. Goonatilake and S. Khebbal. Chichester: John Wiley and Sons. 1–19.
26. Averkin, A. N., and S. V. Prokopchina. 1997. Myagkie vychisleniya i izmereniya [Soft computing and measurements]. *Intellektual'nye sistemy* [Intelligent Systems] 2(1-4):93–114. EDN: LRQYBQ.
27. Borisov, V. 2014. Hybridization of intellectual technologies for analytical tasks of decision-making support. *J. Computer Engineering Informatics* 2(1):11–19.
28. Viveros-Melo, D., M. Ortega-Adarme, X. Blanco Valencia, A. E. Castro-Ospina, S. Murillo Rendón, and D. H. Peluffo-Ordóñez. 2017. Razonamiento basado en

- casos aplicado al diagnóstico médico utilizando clasificadores multi-clase: Un estudio preliminar. *Enfoque UTE* 8(1):232–243.
29. Sharma, S., and D. Mehrotra. 2021. Two-stage CBR based healthcare model to diagnose liver disease. *Int. J. Computing Digital Systems* 10(1):773–780. doi: 10.12785/ijcds/100171.
 30. Sapra, V., L. Sapra, A. Bhardwaj, S. Bharany, A. Saxena, F. Khalid Karim, S. Ghorashi, and A. Wagdy Mohamed. 2023. Integrated approach using deep neural network and CBR for detecting severity of coronary artery disease. *Alexandria Engineering J.* 68:709–720. doi: 10.1016/j.aej.2023.01.029.
 31. Gu, D., W. Zhao, Y. Xie, X. Wang, K. Su, and O. V. Zolotarev. 2021. A personalized medical decision support system based on explainable machine learning algorithms and ECC features: Data from the real world. *Diagnostics* 11(9):1677. 17 p. doi: 10.3390/diagnostics11091677.
 32. Pusztová, L., F. Babič, and J. Paralič. 2020. Semi-automatic adaptation of diagnostic rules in the case-based reasoning process. *Appl. Sci. — Basel* 11(1):292. 18 p. doi: 10.3390/app11010292.
 33. Tarchoune, I., A. Djebbar, and H. F. Merouani. 2021. A hybrid CBR classification model by integrating decision tree and random forest into case retrieval. *Conference (International) on Networking and Advanced Systems Proceedings*. IEEE. Art. 9628920. 6 p. doi: 10.1109/icnas53565.2021.9628920.
 34. Benamina, M., B. Atmani, and S. Benbelkacem. 2018. Diabetes diagnosis by case-based reasoning and fuzzy logic. *Int. J. Interactive Multimedia and Artificial Intelligence* 5(3):72–80. doi: 10.9781/ijimai.2018.02.001.
 35. Oyelade, O. N., and A. E. Ezugwu. 2020. A case-based reasoning framework for early detection and diagnosis of novel coronavirus. *Informatics Medicine Unlocked* 20:100395. 22 p. doi: 10.1016/j.imu.2020.100395.
 36. Amador-Domínguez, E., E. Serrano, D. Manrique, and J. Bajo. 2021. A case-based reasoning model powered by deep learning for radiology report recommendation. *Int. J. Interactive Multimedia Artificial Intelligence* 7(2):15. 12 p. doi: 10.9781/ijimai.2021.08.011.
 37. Lamy, J.-B., B. Sekar, G. Guezennec, J. Bouaud, and B. Séroussi. 2019. Explainable artificial intelligence for breast cancer: A visual case-based reasoning approach. *Artif. Intell. Med.* 94:42–53. doi: 10.1016/j.artmed.2019.01.001.
 38. Ramos-González, J., D. López-Sánchez, J. A. Castellanos-Garzón, J. F. De Paz, and J. M. Corchado. 2017. A CBR framework with gradient boosting based feature selection for lung cancer subtype classification. *Comput. Biol. Med.* 86:98–106. doi: 10.1016/j.combiomed.2017.05.010.
 39. Malekpoor, H., N. Mishra, and S. Kumar. 2022. A novel TOPSIS-CBR goal programming approach to sustainable healthcare treatment. *Ann. Oper. Res.* 312(2):1403–1425. doi: 10.1007/s10479-018-2992-y.
 40. Gu, D., C. Liang, and H. Zhao. 2017. A case-based reasoning system based on weighted heterogeneous value distance metric for breast cancer diagnosis. *Artif. Intell. Med.* 77:31–47. doi: 10.1016/j.artmed.2017.02.003.
 41. Kouser, R. R., T. Manikandan, and V. V. Kumar. 2018. Heart disease prediction system using artificial neural network, radial basis function and case based reasoning. *J. Comput. Theor. Nanos.* 15(9-10):2810–2817. doi: 10.1166/jctn.2018.7543.

42. Dabowska, N. I. A., N. M. Amaitik, A. M. Maatuk, and S. A. Aljawarneh. 2017. A hybrid intelligent system for skin disease diagnosis. *Conference (International) on Engineering and Technology Proceedings*. Antalya: IEEE. Art. 830815. 6 p. doi: 10.1109/ICEngTechnol.2017.8308157.
43. Song, Z., J. Li, S. Lai, and S. Huang. 2024. Case-based reasoning approach for diagnostic screening of children with developmental delays. Cornell University. 14 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2408.02073> (accessed April 17, 2025).
44. Gómez-Vallejo, H. J., B. Uriel-Latorre, M. Sande-Meijide, B. Villamarín-Bello, R. Pavón, F. Fdez-Riverola, and D. Glez-Peña. 2016. A case-based reasoning system for aiding detection and classification of nosocomial infections. *Decis. Support Syst.* 84:104–116. doi: 10.1016/j.dss.2016.02.005.
45. Ali, S. I., S. W. Jung, H. S. M. Bilal, S.-H. Lee, J. Hussain, M. Afzal, M. Hussain, T. Ali, T. Chung, and S. Lee. 2021. Clinical decision support system based on hybrid knowledge modeling: A case study of chronic kidney disease-mineral and bone disorder treatment. *Int. J. Environ. Res. Pu.* 19(1):226. 28 p. doi: 10.3390/ijerph19010226.
46. Nazarenko, G. I., G. S. Osipov, A. G. Nazarenko, and A. I. Molodchenkov. 2010. Intellektual'nye sistemy v klinicheskoy meditsine. Sintez plana lecheniya na osnove pretседentov [Intelligent systems in clinical medicine. Case-based clinical guidelines synthesis]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [J. Information Technologies Computing Systems] 1:24–35. EDN: OWVHZZ.
47. Duan, J., and F. Jiao. 2021. Novel case-based reasoning system for public health emergencies. *Risk Management Healthcare Policy* 14:541–553. doi: 10.2147/rmhp.s291441.
48. Elkader, S. A., M. Elmogy, S. El'Sappagh, and A. N. H. Zaied. 2018. A framework for chronic kidney disease diagnosis based on case based reasoning. *Int. J. Advanced Computer Research* 8(35):59–71. doi: 10.19101/ijacr.2018.834003.
49. Sappagh, S. E., and M. Elmogy. 2016. A decision support system for diabetes mellitus management. *Diabetes Case Reports* 1(1):10000102. 13 p. doi: 10.4172/2572-5629.1000102.
50. Shojae-Mend, H., H. Ayatollahi, and A. Abdolahadi. 2024. A fuzzy ontology-based case-based reasoning system for stomach dystemperament in Persian medicine. *PLOS ONE* 19(10):e0309722. 15 p. doi: 10.1371/journal.pone.0309722.
51. Ben Salem, Y., R. Idoudi, K. Saheb Ettabaa, K. Hamrouni, and B. Solaiman. 2017. Ontology based possibilistic reasoning for breast cancer aided diagnosis. *Information systems*. Eds. M. Themistocleous and V. Morabito. Cham: Springer International Publishing. 299:353–366. doi: 10.1007/978-3-319-65930-5_29.
52. Denisova, E. A., G. F. Gubanova, S. V. Lezhenina, and V. V. Chernyshov. 2018. Model' sistemy podderzhki prinyatiya resheniy na osnove rassuzhdeniy po pretседentam v oblasti diagnostiki zhenskogo besplodiya [Model of case-based reasoning system for female infertility diagnosis]. *Mezhdunarodnyy zh. prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [Int. J. Applied Fundamental Research] 7:123–128. EDN: UYUTQA.
53. Gribova, V. V., R. I. Kovalev, and D. B. Okun'. 2022. Intellektual'naya sistema naznacheniya personalizirovannogo lecheniya po analogii [An intelligent system for prescribing personalized treatment by case based reasoning]. *XX Natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem: Trudy konferentsii* [20th National Conference on Artificial Intelligence with International Participation

- Proceedings]. Moscow: National Research University “Moscow Power Engineering Institute.” 2:292–301. EDN: TGBMHK.
54. Varshavskiy, P. R., L. K. Zo, R. V. Alekhin, and K. M. Ar. 2015. Realizatsiya pretsedentnogo modulya dlya intellektual’nykh sistem [Implementation of a precedent module for intelligent systems]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software Systems] 2:26–31. EDN: UCRAWX.
55. Korablyov, M., N. Axak, O. Fomichov, and V. Hnidenko. 2021. Multi-agent clinical decision support system using case-based reasoning. *CEUR Workshop Procee.* 2870:1466–1476.
56. Dhatteval, J. S., K. Malik, P. Das, and K. S. Kaswan. 2024. Medical diagnostic system using embedding JADE in jCOLIBRI. *Conference (International) on Electrical Electronics and Computing Technologies Proceedings*. IEEE. 1:10739193. 5 p. doi: 10.1109/iceect61758.2024.10739193.
57. Brown, D., A. Aldea, R. Harrison, C. Martin, and I. Bayley. 2018. Temporal case-based reasoning for type 1 diabetes mellitus bolus insulin decision support. *Artif. Intell. Med.* 85:28–42. doi: 10.1016/j.artmed.2017.09.007.
58. Finn, V. K. 2022. JSM reasoning and knowledge discovery: Ampliative reasoning, causality recognition, and three kinds of completeness. *Automatic Documentation Mathematical Linguistics* 56(2):79–110.
59. Djukova, E. V., G. O. Masliakov, and D. S. Ianakov. 2024. Korrektnaya klassifikatsiya po pretsedentam: DSM-metod nad proizvedeniem chastichnykh poryadkov [Correct supervised classification: JSM-method over product of partial orders]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 18(3):61–68. doi: 10.14357/19922264240308. EDN: ZJHDMY.
60. Grusho, A. A., N. A. Grusho, M. I. Zabezhaiko, V. V. Kulchenkov, E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin. 2023. Prichinno-sledstvennyye svyazi v zadachakh klassifikatsii [Causal relationships in classification problems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(1):43–49. doi: 10.14357/19922264230106. EDN: DTQZPK.

Received March 15, 2025

Accepted April 15, 2025

Contributors

Listopad Sergey V. (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; ser-list-post@yandex.ru

Luchko Alexander S. (b. 1985) — leading system administrator, Avtotor Information Technologies LLC, 4a Magnitogorskaya Str., Kaliningrad 236013, Russian Federation; luchko@inbox.ru

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫЯВЛЕНИЯ АСИММЕТРИИ ПУНКТУАЦИИ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕКСТАХ

С. Д. Игнатова¹, А. А. Гончаров², Н. В. Бунтман³

Аннотация: Статья посвящена методу автоматизированного выявления межъязыковой асимметрии пунктуации в параллельных текстах. Анализ функционирования знаков препинания требует больших объемов эмпирических данных, что обуславливает использование корпусов параллельных текстов. В статье показано, каким образом можно использовать поиск с исключением в базе данных (БД) параллельных текстов для автоматизированного выявления асимметрии в употреблении пунктуационных знаков двух языков. Поиск с исключением представляет собой поиск пар текстовых фрагментов, которые содержат некоторые языковые единицы на одном языке, но не содержат ни одной единицы из заданного множества на другом языке. Проверка реализуемости автоматизированного выявления межъязыковой асимметрии пунктуации была проведена на примере восклицательного знака в языковой паре русский–французский. В ходе исследования были зафиксированы семь типов языковых замен, а также был проведен их количественный анализ.

Ключевые слова: пунктуация; межъязыковая асимметрия; параллельные тексты; поиск с исключением; база данных

DOI: 10.14357/08696527250207

EDN: DLDHEV

1 Введение

Обработка текстов на естественном языке, или natural language processing (далее — NLP), — это активно развивающаяся область исследований, возникающая на стыке информатики и лингвистики. Исследователи в области NLP занимаются изучением функционирования естественного языка и особенностей его использования человеком с целью создания компьютерных систем, позволяющих автоматизировать процессы обработки и генерации текста [1]. NLP охватывает широкий круг задач, в который входит разработка систем машинного перевода, кросс-языковой поиск (cross-lingual information retrieval), автоматическое распознавание (speech recognition) и генерация речи (text-to-speech), автоматическое реферирование (automatic text summarization), разрешение кореферентности (coreference resolution), распознавание именованных объектов (named entity recognition), создание больших языковых моделей (large language models) и др. [1, 2].

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ignatova.sophia@mail.ru

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, a.gonch48@gmail.com

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, nabunt@hotmail.com

В последнее время заметен рост числа публикаций, посвященных изучению пунктуации в рамках NLP [3–7]. Пунктуация играет важную роль в сегментации текста и выполняет смыслообразующую функцию. Отсутствие пунктуации в тексте или ошибочная постановка знаков препинания могут привести к нарушению восприятия изначального смысла текста. В англоязычной литературе область исследований, в рамках которой рассматривается автоматическая постановка пунктуационных знаков, получила название *automatic punctuation restoration* (автоматическое восстановление пунктуации, далее — APR) или *automatic punctuation prediction* (автоматическое прогнозирование пунктуации) [4, 5, 7]. Задача APR особенно важна при распознавании речи (автоматизированная расстановка знаков препинания при транскрибировании устной речи), а также при машинном переводе (сохранение или изменение пунктуации в тексте перевода в соответствии с нормативными и узуальными особенностями расстановки знаков препинания в языке перевода). Необходимо учитывать тот факт, что механизмы APR зависят от типа текста — устный (транскрипция) или письменный, а также от принципов расстановки знаков препинания (семантические и фонетические) [4]. Стоит также отметить, что системы APR разработаны в основном для английского языка [4]. Таким образом, изучение функциональных особенностей знаков пунктуации в других языках, а также в разных типах и жанрах текстов представляет собой актуальную задачу.

В качестве объекта исследования выбрана межъязыковая асимметрия пунктуации в русском и французском языках. Межъязыковая асимметрия заключается в отсутствии однозначных соответствий между элементами сопоставляемых языков [8, 9]. На уровне пунктуации межъязыковая асимметрия проявляется в том случае, когда в тексте оригинала (ТО) используется один пунктуационный знак, а в тексте перевода (ТП) он заменяется на иной знак или нулевой знак. В следующем примере представлены два случая асимметрии в употреблении пунктуационных знаков — при переводе тире заменяется на запятую, а восклицательный знак — на точку:

К четвергу надо приготовить доклад — адская работа!

[И. А. Гончаров. Обломов (1848–1859)]

Je dois préparer mon rapport pour jeudi, c'est un travail infernal.

[Перевод, Luba Jurgenson, 1988]

Для изучения межъязыковой асимметрии пунктуации необходимо привлекать большие массивы эмпирических данных, позволяющие верифицировать лингвистические гипотезы и делать объективные выводы о функционировании анализируемых языковых единиц. Современные корпусные ресурсы содержат репрезентативные данные, необходимые для проведения лингвистических исследований, и делают возможным их автоматический поиск и обработку. Одним из таких информационных ресурсов стала надкорпусная база данных (НБД), разрабатываемая в ФИЦ ИУ РАН, которая используется в качестве основного инструмента для проведения настоящего исследования.

Цель статьи состоит в описании метода автоматизированного выявления межязыковой асимметрии пунктуации и проверке его реализуемости на примере восклицательного знака в языковой паре русский–французский.

2 Надкорпусная база данных как инструмент изучения пунктуации

Надкорпусные базы данных разрабатываются в ФИЦ ИУ РАН с 2012 г. и относятся к новой категории информационных лингвистических ресурсов [10, 11]. Надкорпусные базы данных включают две составляющие — корпусную и надкорпусную [12].

Корпусная составляющая обеспечивает поиск изучаемых языковых единиц в параллельных текстах. В НБД загружены параллельные тексты из Национального корпуса русского языка (НКРЯ) объемом более 7,5 млн словоупотреблений для рассматриваемого направления перевода. В корпусной части НБД хранится информация о ТО, ТП, авторах ТО и ТП, выровненных фрагментах ТО и ТП, словоформах и их вхождениях, а также знаках пунктуации (подробнее о логической структуре хранения данных в НБД см. [12]). Знаки пунктуации хранятся в НБД отдельно от лексических единиц — словоформ и их вхождений. Словоформа представляет собой лексему в определенной форме (падеж, число, род и др.), а ее вхождением становится словоформа в конкретном текстовом фрагменте. Каждому знаку пунктуации приписывается его Id (идентификационный номер), Id фрагмента ТО или ПО, в котором он содержится, а также позиция вхождения словоформы, после которой находится искомый пунктуационный знак. Логическая схема представления знаков пунктуации в НБД может быть рассмотрена на примере следующей пары предложений на русском и французском языках (см. рисунок):

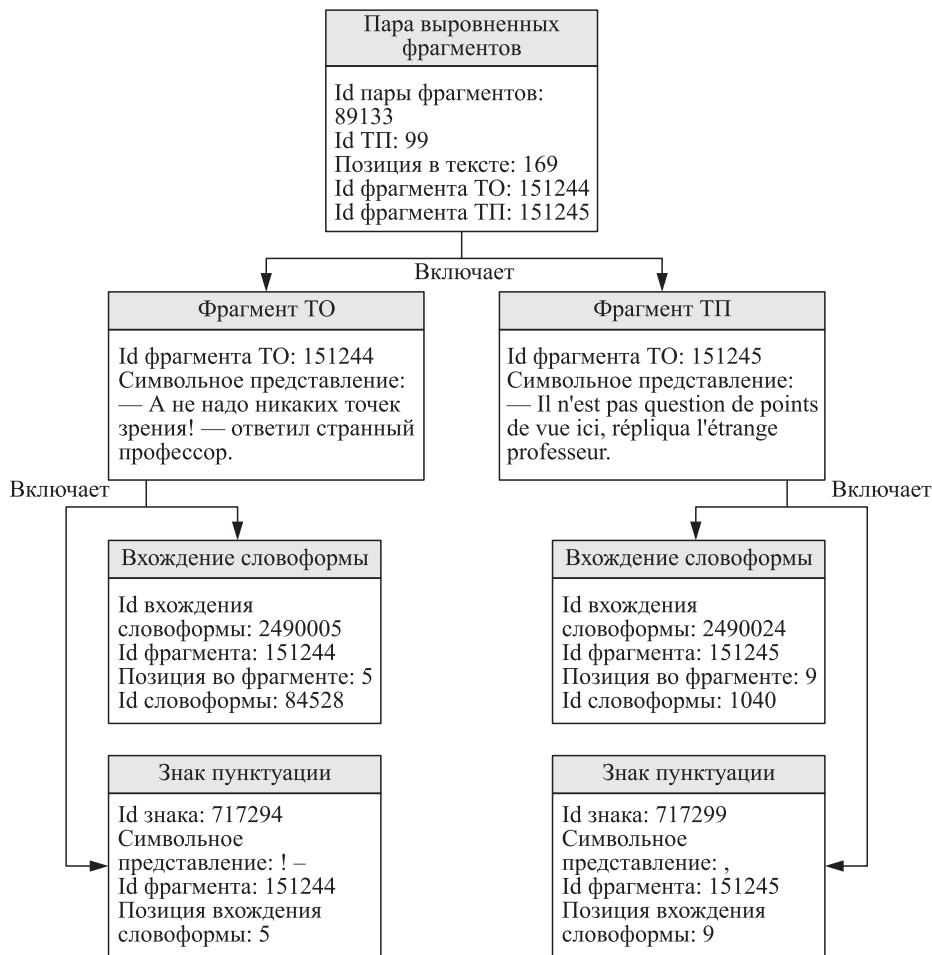
— *А не надо никаких точек зрения!* — *ответил странный профессор.*

[М. Булгаков. *Мастер и Маргарита* (1929–1940)]

— *Il n'est pas question de points de vue ici,* *répliqua l'étrange professeur.*

[Перевод, *Claude Ligny*, 1968]

В выбранной паре представлена асимметрия следующего типа: восклицательный знак с тире в ТО заменяются на запятую в ТП. В каждом фрагменте содержится вхождение словоформы, которое связано с тем или иным пунктуационным знаком. Восклицательный знак с тире находятся после вхождения словоформы «зрения», которое во фрагменте ТО занимает позицию № 5. Восклицательному знаку с тире приписывается информация о позиции вхождения словоформы, после которого они расположены в текстовом фрагменте, — № 5. Во фрагменте ТП запятая стоит после вхождения словоформы «ici», позиция которого соответствует № 9. Пунктуационному знаку (запятой), в свою очередь, присваивается позиция вхождения словоформы — № 9. Структура НБД поддерживает раздельное хранение слов и пунктуации, но каждый пунктуационный знак привязан к некоторому вхождению словоформы, рядом с которым



Логическая схема представления знаков пунктуации в НБД

он расположен. Зная Id фрагмента и позицию вхождения словоформы, можно идентифицировать место знака пунктуации в тексте.

После поиска в НБД изучаемых пунктуационных знаков выполняется экспертное аннотирование найденных и отобранных языковых пар, которое возможно благодаря наличию надкорпусного компонента НБД. Надкорпусная составляющая предназначена для создания и хранения аннотированных переводных соответствий (АПС). Аннотированное переводное соответствие включает изучаемую языковую единицу во фрагменте ТО и соответствующую ей единицу во фрагменте ТП, а также набор признаков для описания каждой из единиц и переводного соответствия в целом, присвоенных в процессе аннотирования [13].

Пользователи НБД могут создавать кластеры признаков, на основе которых будет проводиться последующее аннотирование языковых единиц. Для изучения асимметрии пунктуации была использована НБД «Пунктуация», в которую были добавлены два кластера признаков: «знак пунктуации в ТО» и «знак пунктуации в ТП».

3 Метод автоматизированного выявления межъязыковой асимметрии пунктуации

Поиск и фиксирование межъязыковой асимметрии пунктуации в параллельных текстах возможны благодаря наличию корпусного менеджера. Корпусный менеджер представляет собой специализированную поисковую систему, включающую программные средства для поиска изучаемых единиц и отображения их в форме конкорданса (списка вхождений искомой языковой единицы в контексте) [14, с. 110]. В НБД конкорданс представляет собой выровненные фрагменты ТО и ТП, содержащие искомые языковые единицы. Поиск языковых единиц в НБД может осуществляться:

- (1) по лемме (фрагменты ТО и/или ТП содержат искомое слово в любой форме);
- (2) словоформе (фрагменты ТО и/или ТП содержат слово в заданной форме);
- (3) морфологическим признакам (фрагменты ТО и/или ТП содержат некоторое непустое множество словоформ с заданными морфологическими признаками);
- (4) знаку пунктуации (фрагменты ТО и/или ТП содержат искомый знак пунктуации).

Кроме того, корпусный менеджер позволяет использовать логические операторы для построения более сложных запросов и сужения конкорданса, получаемого в результате поиска. В моновязычных корпусах зачастую применяются три логических оператора: конъюнкции (оператор «И»), альтернативы (или дизъюнкции, оператор «ИЛИ») и исключения (или отрицания, оператор «НЕ») [14, с. 120]. Благодаря оператору конъюнкции возможно создание запросов, позволяющих получать примеры, содержащие несколько искомых элементов одновременно. Оператор альтернативы позволяет создавать поисковый запрос, включающий два и более элемента, и получать на выдаче фрагменты, содержащие какой-либо из элементов запроса. Оператор исключения обеспечивает поиск фрагментов, которые не содержат элементов, указанных в поисковом запросе.

Открытые параллельные корпуса предоставляют, как правило, весьма ограниченные возможности создания поисковых запросов с применением логических операторов (особенно для поиска пунктуации). При этом только функционал НБД позволяет осуществлять поиск с использованием оператора исключения в параллельных текстах [15]. Благодаря корпусному менеджеру в НБД возможно создание поисковых запросов, исключающих одиночную словоформу, последовательность словоформ, слово во всех формах (лемму), последовательность

слов во всех формах (лемм). Таким образом, в поисковую выдачу включаются фрагменты, в которых отсутствует некоторый элемент в ТО или ТП. Данный метод был использован при изучении коннекторов и модальных глаголов, т. е. лексических единиц [15–17]. Однако метод поиска с исключением может быть также применен для выявления межъязыковой асимметрии пунктуации.

Что касается изучения пунктуации, то до проведения исследования функционал НБД предполагал возможность поиска:

- (1) одного знака пунктуации;
- (2) последовательности знаков пунктуации (напр., ?! или !..).

В ходе исследования были добавлены две дополнительные функции для поиска и изучения пунктуационных знаков:

- (1) поиск знаков пунктуации с использованием логического оператора исключения;
- (2) создание смешанных запросов, позволяющих одновременно искать один знак и исключать другой знак препинания.

В табл. 1 представлены примеры поисковых запросов, которые можно выполнять в НБД для поиска пунктуационных знаков в ТО и ТП. Эти примеры наглядно демонстрируют уникальность НБД, созданной в ФИЦ ИУ РАН, поисковые возможности в параллельных текстах которой не имеют ни отечественных, ни зарубежных аналогов.

Таблица 1 Примеры запросов для поиска знаков пунктуации

Поисковый запрос	Описание
~ !	Фрагмент должен содержать знак «!»
~ ?!	Фрагмент должен содержать последовательность знаков «?!»
~ n!	Фрагмент не должен содержать знак «!»
~ n! ...	Фрагмент не должен содержать знак «!» или «...»
~ n!..	Фрагмент не должен содержать последовательность знаков «!..»
~ ! && n?	Фрагмент должен содержать знак «!», но не должен содержать знак «?»
~ ! ... && n?	Фрагмент должен содержать знак «!» или «...», но не должен содержать знак «?»
~ n! ?! && ... ?..	Фрагмент не должен содержать знак «!» или последовательность знаков «?!», но должен содержать знак «...» или последовательность знаков «?...»

Примечания. Для поиска пунктуационных знаков необходимо использовать знак тильды («~») в начале поискового запроса. Символ «n» представляет собой логический оператор исключения и используется для исключения некоторого знака или последовательности знаков препинания. Символ «|» используется в том случае, когда нужно найти или исключить разные знаки, не составляющие последовательность идущих друг за другом пунктуационных знаков. Двойной амперсанд («&&») вводится при создании смешанных запросов и позволяет объединить две функции — поиск и исключение.

Для выявления межъязыковой асимметрии пунктуации необходимо создать два поисковых запроса. На первом этапе создается поисковый запрос для ТО, который содержит множество искомых знаков. На втором этапе формируется запрос для ТП, который предполагает поиск с исключением единиц из заданного множества. Поиск может также осуществляться в обратном направлении: первый поисковый запрос задается для ТП, а запрос с использованием логического оператора исключения формируется для ТО. На следующем этапе происходит экспертное аннотирование найденных языковых пар, которое включает их семантический анализ.

4 Результаты

Для апробации метода был выбран восклицательный знак (более подробно о функциональной нагрузке и контекстуальных особенностях простановки восклицательного знака см. [18]). Анализ был проведен на материале параллельных текстов в направлении перевода русский–французский. В НБД были зафиксированы 22 269 фрагментов ТО, содержащих восклицательный знак.

Далее был построен запрос следующего типа: «~ !» для ТО и «~ n!» для ТП. Поиск с исключением позволил выявить 4 113 пар, содержащих асимметрию пунктуации, и 4 230 случаев асимметрии в употреблении восклицательного знака. Данное числовое расхождение обусловлено тем, что в одной паре могут содержаться несколько случаев пунктуационной асимметрии.

Затем формировались запросы смешанного типа, позволяющие сузить конкорданс, получаемый в результате поиска: например, «~ !» для ТО и «~ n! && ...» для ТП (этот запрос позволяет выявить случаи асимметрии, где восклицательный знак при переводе заменяется на многоточие). На данный момент полная автоматизация выявления замен одного пунктуационного знака на другой невозможна. Это обусловлено тем, что при переводе нередко проводятся трансформации (объединение и членение предложений, перестановка, опущение, замена), которые приводят к тому, что знак, стоящий в определенной позиции в ТО, может быть заменен на лексическую единицу или другой знак препинания, занимающий иную позицию в ТП. Для автоматизации выявления отдельных типов пунктуационных замен необходимо сформировать массив АПС, позволяющий определить условия переводческих замен. Массив АПС, сформированный на этапе аннотирования, который фиксирует и классифицирует условия переводческих замен, может быть потенциально применен для формирования обучающих выборок для нейронных сетей, используемых для перевода. По данным авторов в настоящее время отсутствуют методы для их создания, что обуславливает новизну предлагаемого подхода.

На данном этапе исследования метод автоматизированного выявления асимметрии пунктуационных знаков (наличие изучаемого знака в ТО и его отсутствие в ТП) был совмещен с экспертным аннотированием, цель которого заключалась в выявлении отдельных типов асимметрии (на какой знак в ТП может заменяться восклицательный знак в ТО). Использование запросов смешанного типа

позволило ускорить и частично автоматизировать процесс аннотирования пар фрагментов. В ходе анализа были зафиксированы семь типов замен знаков. Результаты анализа представлены в табл. 2. В скобках указано процентное

Таблица 2 Замена восклицательного знака на иной или нулевой знак

Тип замены	Число случаев асимметрии
.	1585 (37,47%)
,	921 (21,77%)
?	518 (12,25%)
...	274 (6,48%)
:	22 (0,52%)
;	15 (0,35%)
Нулевой знак (∅)	895 (21,16%)

Таблица 3 Примеры межъязыковой асимметрии в употреблении восклицательного знака в русском и французском языках

Тип замены	Текст оригинала	Текст перевода
! → .	По-английски начал учиться... и не доучился! [И. А. Гончаров. Обломов (1848–1859)]	Tu voulais apprendre l'anglais, mais tu n'es pas allé jusqu'au bout. [Перевод Luba Jurgenson, 1988]
! → ,	— Приходи обедать, выпьем за повышение! — сказал Обломов. [И. А. Гончаров. Обломов (1848–1859)]	— Viens déjeuner, nous boirons à ton avancement, dit Oblomov. [Перевод Luba Jurgenson, 1988]
! → ?	Что ж делать! [Н. В. Гоголь. Нос (1832–1833)]	Que faire ? [Перевод Boris de Schloezer, 1925]
! → ...	— Ты думаешь? — встревоженно шепнул Берлиоз, а сам подумал: «А ведь он прав!» [Михаил Булгаков. Мастер и Маргарита (1929–1940)]	— Tu crois ? murmura Berlioz avec inquiétude, tout en se disant : “Il a raison...” [Перевод Claude Ligny, 1968]
! → :	— А время — деньги, вы забываете это, — сказал полковник. — Какое время! Другое время такое, что целый месяц за полтинник отдашь, а то так никаких денег за полчаса не возьмешь. [Л. Н. Толстой. Анна Каренина (1873–1877)]	— Mais le temps c'est de l'argent, n'oubliez pas cela, mon prince, répliqua le colonel. — Cela dépend : il y a des mois entiers qu'on donnerait pour dix sous, et des quarts d'heure qu'on ne céderait pour aucun trésor. [Перевод Henri Mongault, 1952]
! → ;	Нет, тебе несдобровать! Женишься — ни за что пропадешь! [А. С. Пушкин. Капитанская дочка (1836)]	Attends, attends que tu sois marié ; tu verras que tout ira au diable. [Перевод Louis Viardot, 1853]
! → ∅	Четыре года! Я жду, все жду... [Михаил Булгаков. Белая гвардия (1924)]	Quatre ans que je l'attends... [Перевод Claude Ligny, 1970]

отношение числа случаев асимметрии каждого типа к общему числу случаев асимметрии.

Следующий этап исследования предполагает разработку списка признаков для аннотирования переводных соответствий и экспертное формирование АПС для выявления и классификации условий, при которых осуществляется замена одного пунктуационного знака на иной знак, включая лексические средства.

В табл. 3 представлены примеры для каждого выявленного типа языковой асимметрии.

5 Заключение

В ходе исследования был разработан и апробирован метод автоматизированного выявления межъязыковой асимметрии пунктуации в параллельных текстах. В процессе исследования был расширен функционал программного обеспечения для работы с НБД, благодаря чему стало возможным осуществлять поиск с исключением не только лексических единиц, но и пунктуационных знаков. Кроме того, в программное обеспечение НБД была добавлена новая функция создания смешанных запросов, обеспечивающая одновременный поиск и исключение языковых единиц.

Предлагаемый метод позволил получить новое лингвистическое знание о функционировании пунктуационных знаков в русском и французском языках. Перспективы исследования заключаются в разработке классификации межъязыковой асимметрии пунктуации и выявлении межъязыковых расхождений в употреблении знаков препинания разных естественных языков. Изучение и классификация случаев асимметрии пунктуации может послужить в перспективе теоретической основой создания обучающих выборок, по которым проводится настройка (оптимизация параметров) нейронных сетей, используемых для перевода.

Литература

1. Chowdhary K. R. Natural language processing // Fundamentals of artificial intelligence. — New Delhi: Springer, 2020. P. 603–649. doi: 10.1007/978-81-322-3972-7_19.
2. Chopra A., Prashar A., Sain C. Natural language processing // Int. J. Technology Enhancements Emerging Engineering Research, 2013. Vol. 1. No. 4. P. 131–134.
3. Ek A., Bernardy J. P., Chatzikyriakidis S. How does punctuation affect neural models in natural language inference // Probability and Meaning Conference Proceedings. — Gothenburg: Association for Computational Linguistics, 2020. P. 109–116.
4. Chordia V. PunKtuator: A multilingual punctuation restoration system for spoken and written text // 16th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations Proceedings. — Association for Computational Linguistics, 2021. P. 312–320. doi: 10.18653/v1/2021.eacl-demos.37.

5. Păiș V., Tufiş D. Capitalization and punctuation restoration: A survey // *Artif. Intell. Rev.*, 2022. Vol. 55. No. 3. P. 1681–1722.
6. Nozaki J., Kawahara T., Ishizuka K., Hashimoto T. End-to-end speech-to-punctuated-text recognition. — Cornell University, 2022. 5 p. arXiv:2207.03169 [eess.AS].
7. Zhou Z., Tan T., Qian Y. Punctuation prediction for streaming on-device speech recognition // *IEEE Conference (International) on Acoustics, Speech and Signal Processing Proceedings*. — IEEE, 2022. P. 7277–7281. doi: 10.1109/ICASSP43922.2022.9746366.
8. Гарбовский Н. К. Теория перевода. — 2-е изд. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. 544 с. EDN: UUJKUZ.
9. Лекомцева И. А., Куралева Т. В. Межъязыковая асимметрия в переводе // *Балтийский гуманитарный ж.*, 2018. Т. 7. № 1. С. 101–104. EDN: YWKWLS.
10. Зализняк Анна А., Зацман И. М., Инькова О. Ю., Кружков М. Г. Надкорпусные базы данных как лингвистический ресурс // *Корпусная лингвистика: Труды 7-й Международ. конф.* — СПб.: СПбГУ, 2015. С. 211–218.
11. Зализняк Анна А., Зацман И. М., Инькова О. Ю. Надкорпусная база данных коннекторов: построение системы терминов // *Информатика и её применения*, 2017. Т. 11. Вып. 1. С. 100–108. doi: 10.14357/19922264170109. EDN: YOCMYN.
12. Кружков М. Г. Концепция построения надкорпусных баз данных // *Системы и средства информатики*, 2021. Т. 31. № 3. С. 101–112. doi: 10.14357/08696527210309. EDN: UMWNIU.
13. Гончаров А. А. Аннотирование параллельных корпусов: подходы и направления развития // *Информатика и её применения*, 2023. Т. 17. Вып. 4. С. 81–87. doi: 10.14357/19922264230411. EDN: GDKDOZ.
14. Захаров В. П., Богданова С. Ю. Корпусная лингвистика. — 3-е изд. — СПб.: СПбГУ, 2020. 234 с.
15. Гончаров А. А. Поиск с исключением в параллельных текстах // *Системы и средства информатики*, 2023. Т. 33. № 4. С. 102–114. doi: 10.14357/08696527230410. EDN: CVPFDV.
16. Гончаров А. А., Инькова О. Ю. Методика поиска имплицитных логико-семантических отношений в тексте // *Информатика и её применения*, 2019. Т. 13. Вып. 3. С. 97–104. doi: 10.14357/19922264190314. EDN: MWGFJW.
17. Гончаров А. А. Методы поиска имплицитных логико-семантических отношений в параллельных текстах // *Системы и средства информатики*, 2022. Т. 32. № 4. С. 32–44. doi: 10.14357/08696527220404. EDN: VBWRFS.
18. Нуриев В. А., Игнатова С. Д. Надкорпусная база данных как инструмент изучения пунктуации // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 19: Лингвистика и межкультурная коммуникация*, 2024. Т. 27. № 4. С. 147–158. doi: 10.55959/MSU-2074-1588-19-27-4-11. EDN: KVNQWW.

Поступила в редакцию 12.03.2025
Принята к публикации 15.04.2025

METHOD OF AUTOMATED DETECTION OF PUNCTUATION ASYMMETRY IN PARALLEL TEXTS

S. D. Ignatova¹, A. A. Goncharov¹, and N. V. Buntman²

¹Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

²M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: The paper explores the method of automated detection of interlingual punctuation asymmetry in parallel texts. Analyzing the functioning of punctuation marks requires a large scale of empirical data, which determines the use of parallel text corpora. The study outlines the potential of using search with exclusion in a parallel text database to automate detection of punctuation asymmetry in two languages. A search with exclusion involves identifying pairs of text fragments that contain certain language units in one language but do not contain any units from a defined set in another language. The feasibility of automated detection of punctuation asymmetry was tested by examining the use of the exclamation mark in Russian and French. Throughout the study, seven types of language substitutions were identified and quantitatively analyzed.

Keywords: punctuation; interlingual asymmetry; parallel texts; search with exclusion; databases

DOI: 10.14357/08696527250207

EDN: DLDHEV

References

1. Chowdhary, K. R. 2020. Natural language processing. *Fundamentals of artificial intelligence*. New Delhi: Springer. 603–649. doi: 10.1007/978-81-322-3972-7_19.
2. Chopra, A., A. Prashar, and C. Sain. 2013. Natural language processing. *Int. J. Technology Enhancements Emerging Engineering Research* 1(4):131–134.
3. Ek, A., J. P. Bernardy, and S. Chatzikyriakidis. 2020. How does punctuation affect neural models in natural language inference. *Probability and Meaning Conference Proceedings*. Gothenburg: Association for Computational Linguistics. 109–116.
4. Chordia, V. 2021. PunKtuator: A multilingual punctuation restoration system for spoken and written text. *16th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics Proceedings: System Demonstrations*. Association for Computational Linguistics. 312–320. doi: 10.18653/v1/2021.eacl-demos.37.
5. Păiș, V., and D. Tufiș. 2022. Capitalization and punctuation restoration: A survey. *Artif. Intell. Rev.* 55(3):1681–1722. doi: 10.1007/s10462-021-10051-x.
6. Nozaki, J., T. Kawahara, K. Ishizuka, and T. Hashimoto. 2022. End-to-end speech-to-punctuated-text recognition. Cornell University. 5 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2207.03169> (accessed April 22, 2025).

7. Zhou, Z., T. Tan, and Y. Qian. 2022. Punctuation prediction for streaming on-device speech recognition. *IEEE Conference (International) on Acoustics, Speech and Signal Processing Proceedings*. IEEE. 7277–7281. doi: 10.1109/ICASSP43922.2022.9746366.
8. Garbovskiy, N. K. 2007. *Teoriya perevoda* [Theory of translation]. 2nd ed. Moscow: Moscow State University Pubs. 544 p. EDN: UUJKUZ.
9. Lekomtseva, I. A., and T. V. Kuraleva. 2018. Mezhtsazykovaya asimmetriya v perevode [Interlingual asymmetry in translation]. *Baltiyskiy gumanitarnyy zh.* [Baltic Humanitarian J.] 7(1):101–104. EDN: YWKWLS.
10. Zaliznyak, Anna A., I. M. Zatsman, O. Yu. In'kova, and M. G. Kruzhkov. 2015. Nadkorpornye bazy dannykh kak lingvisticheskiy resurs [Supracorpora databases as a linguistic resource]. *7th Conference (International) on Corpus Linguistics Proceedings*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University. 211–218.
11. Zaliznyak, Anna A., I. M. Zatsman, and O. Yu. Inkova. 2017. Nadkorpornaya baza dannykh konnektorov: postroenie sistemy terminov [Supracorpora database on connectives: Term system development]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(1):100–108. doi: 10.14357/19922264170109. EDN: YOCMYN.
12. Kruzhkov, M. G. 2021. Kontseptsiya postroeniya nadkorpornykh baz dannykh [Conceptual framework for supracorpora databases]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 31(3):101–112. doi: 10.14357/08696527210309. EDN: UMWNIU.
13. Goncharov, A. A. 2023. Annotirovanie parallel'nykh korpusov: podkhody i napravleniya razvitiya [Parallel corpus annotation: Approaches and directions for development]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 17(4):81–87. doi: 10.14357/19922264230411. EDN: GDKDOZ.
14. Zakharov, V. P., and S. Yu. Bogdanova. 2020. *Korpornaya lingvistika* [Corpus linguistics]. 3rd ed. St. Petersburg: Saint Petersburg State University. 234 p.
15. Goncharov, A. A. 2023. Poisk s isklyucheniem v parallel'nykh tekstakh [Search with exclusion in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(4):102–114. doi: 10.14357/08696527230410. EDN: CVPFDV.
16. Goncharov, A. A., and O. Yu. Inkova. 2019. Metodika poiska implitsitnykh logiko-semanticeskikh otnosheniy v tekste [Methods for identification of implicit logical-semantic relations in texts]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(3):97–104. doi: 10.14357/19922264190314. EDN: MWGFJW.
17. Goncharov, A. A. 2022. Metody poiska implitsitnykh logiko-semanticeskikh otnosheniy v parallel'nykh tekstakh [Methods for retrieval of implicit logical-semantic relations from parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 32(4):32–44. doi: 10.14357/08696527220404. EDN: VBWRFS.
18. Nuriev, V. A., and S. D. Ignatova. 2024. Nadkorpornaya baza dannykh kak instrument izucheniya punktuatsii [Supracorpora database as a tool for studying punctuation]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 19. Lingvistika i mezhkul'turnaya kommunikatsiya* [Moscow State University Bulletin. Ser. 19. Linguistics and Intercultural Communication] 27(4):147–158. doi: 10.55959/MSU-2074-1588-19-27-4-11. EDN: KVNQWW.

Received March 12, 2025

Accepted April 15, 2025

Contributors

Ignatova Sophia D. (b. 2001) — engineer, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; ignatova_sophia@mail.ru

Goncharov Alexander A. (b. 1994) — scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; a.gonch48@gmail.com

Buntman Nadezhda V. (b. 1957) — Candidate of Science (PhD) in philology, associate professor, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; nabunt@hotmail.com

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ МОНИТОРИНГОМ СИТУАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ

*А. П. Сучков*¹

Аннотация: Осуществлен анализ подходов к управлению подсистемой мониторинга для обеспечения лица, принимающего решения (ЛПР), информацией, качество которой достаточно для эффективного управленческого воздействия на свои силы и средства с целью нормализации ситуации. На основе построения трехуровневой модели данных мониторинга обоснованы способы вычисления целевых показателей (ЦП) для различных качественных характеристик информации — достоверности, полноты, актуальности и др. Результаты мониторинга обстановки поступают в подсистему поддержки принятия решений (ППР) по нормализации ситуации (устранение уязвимостей, первичное реагирование, расчет и расстановка необходимых сил и средств, ликвидация последствий, анализ и выводы). Повышение качества добываемой информации может достигаться путем осуществления обратной связи с подсистемой мониторинга обстановки с целью эффективной идентификации ситуаций на различных стадиях их жизненного цикла (ЖЦ) (включая анализ предпосылок их возникновения и возможного предотвращения на начальных стадиях их развития).

Ключевые слова: мониторинг; ситуация; качество информации; управление

DOI: 10.14357/08696527250208

EDN: DRQWBF

1 Введение

Эффективность реализации процессов принятия решений в ситуационных системах управления во многом зависит от полноты и достоверности информации о складывающейся обстановке, получаемой от разнообразных источников информации, образующих подсистему мониторинга. Возможность управления подсистемой мониторинга путем организации обратной связи позволяет повысить качество информации именно в направлениях, увеличивающих ситуационную осведомленность ЛПР. Это делает актуальным рассмотрение и изучение в рамках всей системы управления отдельного цикла управления подсистемой мониторинга обстановки.

В [1–5] обоснована циклическая функциональная модель систем ситуационного управления, включающая пять стадий: целеполагание; мониторинг; анализ; решение; действие. Взаимосвязь между процессами, реализующими эти стадии, проиллюстрирована на рис. 1.

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, ASuchkov@ipiran.ru

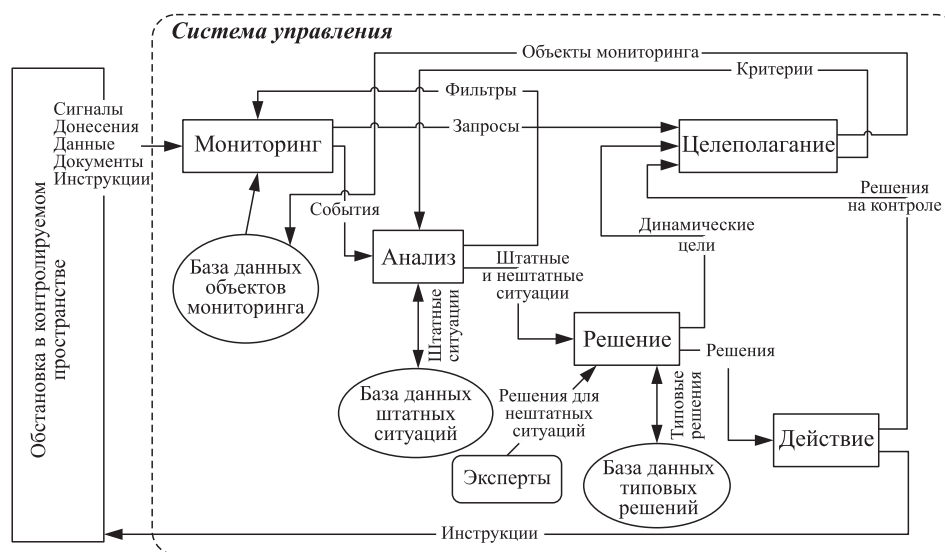


Рис. 1 Функциональная модель ситуационной системы управления

Ситуационный анализ, реализующий ППР в системах управления, опирается на такие понятия, как событие, обстановка, ситуация, угроза, управление. Ситуация определяется уровнем отслеживаемых угроз в контролируемом пространстве; текущая обстановка характеризуется событиями — изменениями состояния контролируемых объектов, образующими некоторые разворачивающиеся во времени наблюдаемые и регистрируемые потоки. При этом под управлением понимается целенаправленное воздействие органа управления на подчиненные ему или взаимодействующие элементы обстановки (ресурсы) по нейтрализации угроз.

Под угрозой в процессах управления понимается ситуация или совокупность ситуаций, развитие которых противоречит целям управления и отдаляет текущее состояние от целевого.

Понятие ситуационного анализа используется в процессах управления, когда возникает необходимость выработки управленческих решений в режиме реального времени в условиях сложной обстановки, складывающейся в отношении контролируемых объектов. Ситуационный анализ обеспечивает на основе событийного мониторинга обстановки идентификацию ситуаций (угроз) на различных стадиях их ЖЦ, слежение за состоянием ситуаций, прогноз сценариев их развития, а также поддержку процесса выработки управляющих воздействий для достижения целевой ситуации (нормализация ситуации) [1]. По аналогии с процессами управления информационной безопасностью [6–8] можно определить обобщенные стадии ЖЦ угрозы:

- появление потенциальной возможности, связанной с возникающими и существующими уязвимостями;
- первоначальный инцидент реализации угрозы;
- развитие угрозы;
- окончание реализации угрозы;
- регенерация угрозы при неустранении уязвимостей.

Примером широкомасштабной системы мониторинга служит аппаратно-программный комплекс «Безопасный город» (АПК БГ), внедренный практически во всех регионах страны (от региональных центров до отдельных муниципальных образований). Целью создания и внедрения АПК БГ ставится повышение общего уровня общественной безопасности, правопорядка и безопасности среды обитания за счет существенного улучшения координации деятельности сил и служб, ответственных за решение этих задач, путем внедрения (в соответствии с едиными функциональными и технологическими стандартами) комплексной информационной системы, обеспечивающей прогнозирование, мониторинг, предупреждение и ликвидацию возможных угроз, а также контроль устранения последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) [9]. По своей сути это пассивная система фиксации событий на основе многочисленных многомодальных источников данных для информирования соответствующих служб с уклоном на ликвидацию последствий ЧС и с минимальными возможностями по их профилактике и предотвращению. Такой перекося является следствием отсутствия системного целеполагания с количественными показателями минимизации причиненного ущерба и максимизации предотвращенного ущерба, а также отсутствия обратной связи с источниками данных для эффективной ППР [10].

Можно утверждать, что одна из основных проблем мониторинга ситуационной обстановки заключается в обеспечении ЛПР информацией, качество которой *достаточно* для принятия управленческого решения. Повышение качества добываемой информации может достигаться путем осуществления обратной связи с подсистемой мониторинга обстановки с целью эффективной идентификации ситуаций на различных стадиях их ЖЦ (включая анализ предпосылок их возникновения и возможного предотвращения на начальных стадиях их развития).

В настоящей статье обосновываются подходы к решению этой научной проблемы.

2 Анализ проблемы управления мониторингом

Всякое управление должно быть целесообразным, и поставленная проблема предполагает определение цели управления подсистемой мониторинга — это повышение качества событийной информации в интересах поддержания процесса принятия решений. Качество информации — это совокупность свойств информации, характеризующих степень ее соответствия потребностям (целям) ее использования [11], и основные из них:

- **достоверность** — соответствие информации реальному положению дел;
- **своевременность** — формирование и получение информации в нужный момент времени;
- **актуальность** — недавнее возникновение информации, которая еще не стала восприниматься как устаревшая;
- **полезность** — способность информации удовлетворять какую-либо человеческую потребность;
- **доступность** — беспрепятственная реализация субъектами своего права на доступ к информации;
- **полнота** — содержание в информации оптимального состава (набора показателей), который достаточен для принятия правильного решения;
- **точность** — степень близости получаемой информации к реальному состоянию объекта, процесса, явления и т. п.

Целью подсистемы управления мониторингом ставится достижение определенного уровня качества информации, достаточного для принятия обоснованных решений по парированию наблюдаемых угроз. Под целеполаганием в любой системе управления понимается процесс установления и формализации целей, которые должны быть конкретными, измеримыми, достижимыми, обеспеченными ресурсами и привязанными ко времени [10, 12]. Это предполагает формирование многоуровневой системы ЦП, системы управления и определение критериев оценки ЦП всех уровней (пороговые значения и временная привязка), планирование и учет динамических целей.

Для формирования совокупности целей управления мониторингом и обоснования измеримых ЦП необходимо охарактеризовать информационное содержание контролируемой обстановки. Элементы обстановки можно объединить в следующие обобщенные группы:

- состояние целей системы управления;
- контролируемые угрозы в системе управления;
- состояние элементов внешней среды и охраняемых объектов;
- подчиненные и взаимодействующие силы, средства и ресурсы;
- противодействующие и неконтролируемые факторы.

Для оценки качества мониторинга необходимо охарактеризовать структуру собираемых данных, достаточных для принятия решений. Ситуационная обстановка состоит из элементов обстановки, наблюдаемых с помощью средств освещения обстановки различной модальности: объективных средств контроля с помощью видео-, фото-, аудио-, сенсорных устройств, а также сообщений, текстовых донесений, открытых данных широкой доступности и т. п. Средства освещения обстановки фиксируют события — изменение состояния элементов

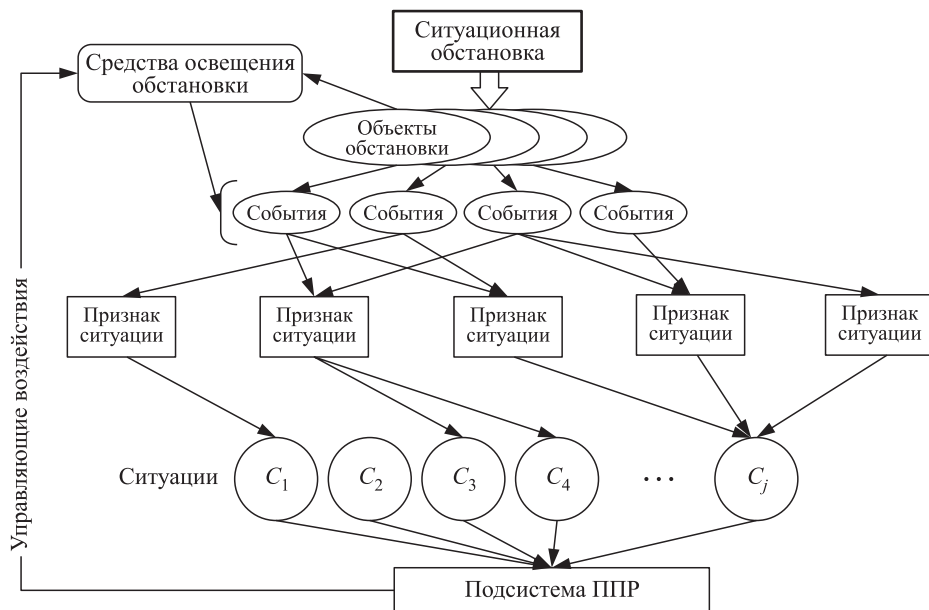


Рис. 2 Структура данных мониторинга ситуационной обстановки

обстановки (рис. 2). События формируют выявленные признаки ситуаций (угроз на определенной стадии ЖЦ), которые подразделяются на необходимые и достаточные признаки реализации угрозы. Вклад необходимых и достаточных признаков оценивается и взвешивается для проведения дальнейших оценок качества информации [11].

Результаты мониторинга обстановки поступают в подсистему ППР по нейтрализации угроз (устранение уязвимостей, первичное реагирование, расчет и расстановка необходимых сил и средств, ликвидация последствий, анализ и выводы). В случае недостаточности полноты, достоверности и других показателей качества данных для принятия решений выдаются управляющие воздействия на подсистему мониторинга для повышения их качества.

Для формализации представления данных мониторинга рассмотрим трехуровневую систему элементов (по аналогии с [13]). Первый уровень — данные о событиях, второй уровень — признаки ситуаций, третий — ситуации. Семантические связи между уровнями типа *has-a* отражают, как регистрируемые события формируют связанные с ними признаки ситуаций, которые, в свою очередь, позволяют идентифицировать возникающие ситуации. Результаты анализа достоверности, полноты и других показателей качества данных передаются в подсистему ППР. Следует заметить, что уровни событий и признаков могут иметь подуровни, отражающие возможность существования составных элементов, од-

нако рассмотрение трехуровневой системы не умаляет общность последующих построений.

Каждый элемент $e_{i,j}$ многоуровневой структуры помимо данных о его содержании сопровождается дополнительной информацией об атрибутах его связей с вышестоящими элементами модели и определяется K кортежами:

$$e_{i,j} \rightarrow (e_{i-1,k}, \text{н/д}, p_{i-1,k}, d_{i,j}), \quad i = 1, 2, 3, \quad k = \overline{1, K},$$

где $e_{i-1,k}$ — вышестоящий элемент в иерархии, их может быть один или более ($K \geq 1$) (для первого уровня — $\emptyset$); н/д — отношение к вышестоящему элементу (необходимый или достаточный) (для первого уровня — $\emptyset$); $p_{i-1,k}$ — весовой коэффициент в множестве необходимых и достаточных признаков по отношению к вышестоящему элементу $e_{i-1,k}$ (для первого уровня — $\emptyset$); $d_{i,j}$ — показатель достоверности значения $e_{i,j}$.

Предполагается, что показатели достоверности $d_{1,j}$ событий (первый уровень структуры данных) в подсистеме мониторинга получаются от средств освещения обстановки единообразным способом и представляют собой количественные величины (проценты, шкалы и т. п.).

Предлагаемая формализация данных мониторинга позволяет перейти к оценке ряда характеристик их качества для формирования ЦП подсистемы мониторинга.

3 Подходы к оценке показателей качества данных мониторинга

В первую очередь рассмотрим такие показатели качества информации, как достоверность, полнота и актуальность.

Обозначим $\mu(e_{i,j})$ показатель достоверности элемента $e_{i,j}$. В принятых обозначениях $\mu(e_{1,j}) = d_{1,j}$. Определим

$$Q_{i,j}^1 = \max_{j_k} \mu(e_{i-1,j_k}),$$

где e_{i-1,j_k} — достаточные признаки для элемента $e_{i,j}$, что дает максимальную достоверность среди всех наблюдаемых достаточных признаков $e_{i,j}$. Далее определим

$$Q_{i,j}^2 = \max \frac{\sum_{j_r} p_{i-1,j_r} \mu(e_{i-1,j_r})}{\sum_{j_r} p_{i-1,j_r}},$$

где e_{i-1,j_r} — необходимые признаки для элемента $e_{i,j}$, что дает средневзвешенную сумму достоверностей всех наблюдаемых необходимых признаков для $e_{i,j}$. Тогда достоверность $d_{i,j}$ элемента $e_{i,j}$ составит

$$d_{i,j} = \mu(e_{i,j}) = \max (Q_{i,j}^1, Q_{i,j}^2).$$

Следовательно, достоверность идентификации ситуации C_j определяется следующим образом:

$$\mu(C_j) = \mu(e_{3,j}).$$

Таким образом, в случае если достоверность идентификации ни одной ситуации не удовлетворяет критериям системы ППР, необходимо путем управляющих воздействий на подсистему мониторинга повысить достоверность хотя бы одного достаточного признака, либо повысить достоверность уже выявленных необходимых признаков с наибольшими по весу вкладами, либо выявить новые необходимые признаки ситуации.

Полнота информации о ситуации $v(C_i)$ определяется суммой весовых вкладов выявленных признаков:

$$v(C_i) = \frac{\sum_{j_r} p_{i-1,j_r} \mu(e_{i-1,j_r})}{\sum_j p_{i-1,j}},$$

где e_{i-1,j_r} — все выявленные необходимые и достаточные признаки ситуации C_i . Повышение полноты данных мониторинга достигается путем выявления новых признаков ситуаций.

Актуальность информации существенно зависит от стадии ЖЦ предполагаемых угроз. В частности, для первой стадии актуальность данных о выявленных уязвимостях со временем возрастает. На других стадиях реализации угрозы актуальность информации существенно зависит от скорости протекающих процессов и полностью с ней коррелирует. Процесс устаревания данных неравномерный — в течение некоторого начального периода еще сохраняется почти полная ценность сообщения, потом следует этап быстрого старения и, наконец, на третьем этапе ценность информации асимптотически приближается к некоторой константе. Примерный вид z -образной кривой устаревания информации может определяться с помощью экспертных оценок. Для практических целей достаточно, чтобы эксперт оценил интервалы времени, соответствующие квантилям в 90%, 50% и 10% сохранения ценности информации.

Оценка показателей доступности, своевременности, полезности и точности во многом носит качественный характер: например, показатель доступности во многом можно охарактеризовать уровнем доступа пользователя в смысле безопасности информации.

4 Выводы

Целью управления подсистемой мониторингом ставится достижение определенного уровня качества информации, достаточного для принятия обоснованных решений по парированию наблюдаемых угроз. Для формирования совокупности

целей управления мониторингом и обоснования измеримых ЦП проанализировано информационное содержание контролируемой обстановки. Для формализации представления данных мониторинга рассмотрена модель в виде трехуровневой системы элементов. Первый уровень — данные о событиях, второй уровень — признаки ситуаций, третий — ситуации. Семантические связи между уровнями отражают, как регистрируемые события формируют связанные с ними признаки ситуаций и сами ситуации. В статье предложены методы количественной и качественной оценки ЦП подсистемы мониторинга, на основе чего ЛПР представляются значения показателей качества поступающих данных для принятия обоснованных решений.

Литература

1. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Некоторые подходы к ситуационному анализу потоков событий // Открытое образование, 2012. № 1. С. 39–46. EDN: PLQHFZ.
2. Сучков А. П. Формирование системы целей для ситуационного управления // Системы и средства информатики, 2013. Т. 23. № 2. С. 187–197. doi: 10.14357/08696527130213. EDN: ROYATF.
3. Сучков А. П. Полнофункциональный процессный подход к реализации систем ситуационного управления // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 85–99. doi: 10.14357/08696527170106. EDN: YODDAZ.
4. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Информационное взаимодействие в распределенных системах ситуационного управления. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2021. 268 с. doi: 10.30826/94588-293-5. EDN: OGXXUY.
5. Сучков А. П. Система ситуационного управления как мультисервисная технология в облачной среде: сервисы аналитики // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 2. С. 88–100. doi: 10.14357/08696527230209. EDN: PMSFRS.
6. Профиль и жизненный цикл угрозы. https://bstudy.net/818248/informatika/profil_zhiznennyy_tsikl_ugrozy?ysclid=m8gz0m16iw666305780.
7. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Некоторые подходы к анализу факторов, влияющих на информационную безопасность систем искусственного интеллекта // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 3. С. 95–107. doi: 10.14357/08696527230308. EDN: QNXZBN.
8. Сучков А. П. Жизненный цикл кибератак на уязвимости систем машинного обучения // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 1. С. 80–91. doi: 10.14357/08696527240107. EDN: QLGHEH.
9. Концепция построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город»: Постановление Правительства РФ от 3 декабря 2014 г. № 2446-р. <https://mchs.gov.ru/dokumenty/2920>.
10. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Проблемы целеполагания в аппаратно-программном комплексе «Безопасный город» // Системы и средства информатики, 2024. Т. 34. № 4. С. 97–107. doi: 10.14357/08696527240408. EDN: MZBSSN.
11. Качество информации как проблема современного общества. https://spravochnik.ru/upravlenie_kachestvom/kachestvo_informacii_kak_problema_sovremennogo_obschestva.

12. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Целеполагание в аппаратно-программном комплексе «Безопасный город»: задачи и реалии // Технологии гражданской безопасности, 2020. Т. 17. № 3. С. 69–74. doi: 10.54234/CST.19968493.2020.17.3.65.12.69. EDN: EYGFFI.
13. Сучков А. П. Количественная оценка достоверности выводов на семантической сети при идентификации сложных объектов // Научная сессия МИФИ: Сб. науч. тр., 1999. Т. 7. С. 156–157.

Поступила в редакцию 03.03.2025

Принята к публикации 15.04.2025

SOME APPROACHES TO MANAGING SITUATIONAL MONITORING

A. P. Suchkov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The article analyzes approaches to the management of the monitoring subsystem to provide the decision-maker with information, the quality of which is sufficient for effective managerial influence on their own forces and means to normalize the situation. Based on the construction of a three-level monitoring data model, the methods of calculating target indicators are justified for various qualitative characteristics of information — reliability, completeness, relevance, etc. Improving the quality of the information obtained can be achieved by providing feedback to the situation monitoring subsystem to effectively identify situations at various stages of their life cycle (including analyzing the prerequisites for their occurrence and possible prevention at the initial stages of their development). The results of monitoring the situation are sent to the decision support subsystem for neutralizing the situation (vulnerability elimination, initial response, calculation and allocation of necessary forces and means, elimination of consequences, analysis, and conclusions). In case of insufficient completeness, reliability, and other indicators of data quality for decision-making, control actions are performed on the monitoring subsystem to improve their quality.

Keywords: monitoring; situation; information quality; management

DOI: 10.14357/08696527250208

EDN: DRQWBF

References

1. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2012. Nekotorye podkhody k situatsionnomu analizu potokov sobytiy [Approaches to situational analysis of events streams]. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education] 1:39–46. EDN: PLQHFZ.
2. Suchkov, A. P. 2013. Formirovanie sistemy tseley dlya situatsionnogo upravleniya [Formation of the goals system for situational control]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 23(2):187–197. doi: 10.14357/ 08696527130213. EDN: ROYATF.

3. Suchkov, A. P. 2017. Polnofunktsional'nyy protsessnyy podkhod k realizatsii sistem situatsionnogo upravleniya [A fully functional process-based approach to the implementation of situational control systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(1):85–99. doi: 10.14357/08696527170106. EDN: YODDAZ.
4. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2021. *Informatsionnoe vzaimodeystvie v raspredelennykh sistemakh situatsionnogo upravleniya* [Information interaction in distributed situational management systems]. Moscow: TORUS PRESS. 268 p. doi: 10.30826/94588-293-5. EDN: OGXXUY.
5. Suchkov, A. P. 2023. Sistema situatsionnogo upravleniya kak mul'tiservisnaya tekhnologiya v oblachnoy srede: servisy analitiki [Situational management system as a multiservice technology in a cloud environment: Analytic services]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(2):88–100. doi: 10.14357/08696527230209. EDN: PMSFRS.
6. Profil' i zhiznennyy tsikl ugrozy [Threat profile and lifecycle]. Available at: https://bstudy.net/818248/informatika/profil_zhiznennyy_tsikl_ugrozy?ysclid=m8gz0m16iw666305780 (accessed April 23, 2025).
7. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2023. Nekotorye podkhody k analizu faktorov, vliyayushchikh na informatsionnyu bezopasnost' sistem iskusstvennogo intellekta [Some approaches to the analysis of factors affecting the information security of artificial intelligence systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 33(3):95–107. doi: 10.14357/08696527230308. EDN: QNXZBN.
8. Suchkov, A. P. 2024. Zhiznennyy tsikl kiberatak na uyazvimosti sistem mashinnogo obucheniya [The lifecycle of cyberattacks on machine learning system vulnerabilities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(1):80–91. doi: 10.14357/08696527240107. EDN: QLGHEH.
9. Kontseptsiya postroeniya i razvitiya apparatno-programmnogo kompleksa “Bezopasnyy gorod”: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 3 dekabrya 2014 g. No. 2446-r [The concept of construction and development of the hardware and software complex “Safe City”: Government decree No. 2446-r dated 03.12.2014]. Available at: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/2920> (accessed April 23, 2025).
10. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2024. Problemy tselepolaganiya v apparatno-programmnom komplekse “Bezopasnyy gorod” [The problems of goal setting in the hardware and software complex “Safe City”]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 34(4):97–107. doi: 10.14357/08696527240408. EDN: MZBSSN.
11. Kachestvo informatsii kak problema sovremennogo obshchestva [Information quality as a problem in modern society]. Available at: https://spravochnick.ru/upravlenie_kachestvom/kachestvo_informacii_kak_problema_sovremennogo_obschestva (accessed April 23, 2025).
12. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2020. Tselepolaganie v apparatno-programmnom komplekse “Bezopasnyy gorod”: zadachi i realii [Goal setting in the hardware and software complex “Safe city”: Tasks and realities]. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil Security Technology] 17(3):69–74. doi: 10.54234/CST.19968493. 2020.17.3.65.12.69. EDN: EYGFFI.
13. Suchkov, A. P. 1999. Kolichestvennaya otsenka dostovernosti vyvodov na semanticheskoy seti pri identifikatsii slozhnykh ob"ektov [Quantitative assessment of the reliability of inferences on the semantic network in the identification of complex

objects]. *Nauchnaya sessiya MIFI: Sbornik nauchnykh trudov* [Scientific Session MEPhI: Collection of scientific papers] 7:156–157.

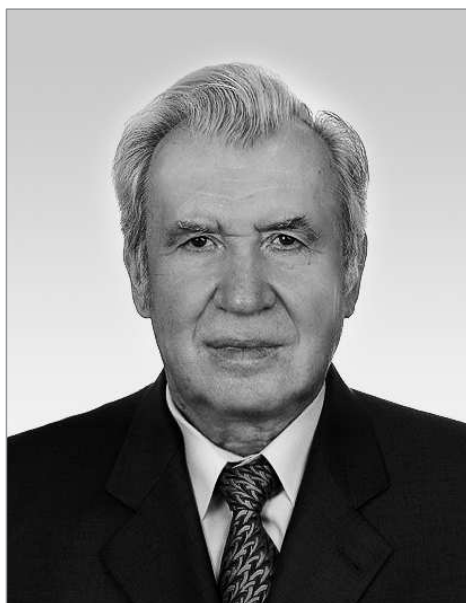
Received March 3, 2025

Accepted April 15, 2025

Contributor

Suchkov Alexander P. (b. 1954) — Doctor of Science in technology, leading scientist, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; ASuchkov@frccsc.ru

К 90-ЛЕТИЮ ЗАСЛУЖЕННОГО ДЕЯТЕЛЯ НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ К. К. КОЛИНА



Константин Константинович Колин

Константин Константинович Колин — доктор технических наук, профессор, известный ученый в области философских проблем науки и образования, развития информатики и создания сложных автоматизированных систем управления (АСУ). Он автор более 720 печатных научных работ, 20 монографий, ряда новых учебных программ и пособий для вузов. Имеет большой опыт научной работы в оборонно-промышленном комплексе СССР и в Российской академии наук.

Колин К. К. родился 28 мая 1935 г. в Фергане. Высшее образование он получил в Ленинградской военно-воздушной инженерной академии им. А. Ф. Можайского. Ее он окончил в 1959 г. по специальности инженера по радиообо-

рудованию Военно-Воздушных Сил и был прикомандирован (с оставлением на военной службе) к Министерству радиопромышленности СССР для выполнения работ по созданию АСУ войсками противовоздушной обороны (ПВО) страны.

В период с 1960 по 1971 гг. он работал в НИИ приборной автоматики Мин-радиопрома, где прошел путь от младшего научного сотрудника до начальника научной лаборатории — заместителя начальника отдела разработки алгоритмов АСУ ПВО страны. Здесь им была разработана и испытана на полигоне Капустин Яр первая отечественная операционная система для вычислительного комплекса АСУ ПВО, работающего в реальном масштабе времени. Результаты этих работ стали основой для защиты кандидатской (1967 г.) и докторской (1978 г.) диссертаций К. К. Колина, а также для написания двух монографий [1, 2], изданных в нашей стране.

Эти работы стали основой разработанной К. К. Колиным теории организации вычислительного процесса в автоматизированных системах, работающих в реальном масштабе времени, которая остается актуальной и в настоящее время. Они вызвали большой интерес отечественных и зарубежных специалистов, поэтому одна из этих монографий была сразу же переведена и издана в Болгарии [3] и Польше [4].

В 1971 г., по указанию Оборонного отдела ЦК КПСС, К. К. Колин был переведен в НИИ автоматической аппаратуры (НИИАА) (сегодня этот институт носит имя академика В. С. Семенихина) для выполнения работ по созданию Информационно-вычислительного центра ЦК КПСС. Главным конструктором этого проекта был академик В. С. Семенихин, а научным руководителем — академик В. М. Глушков. Создание и ввод в эксплуатацию этого Центра стало важным событием в области использования средств автоматизации в высших органах государственной власти нашей страны. Одним из результатов этих работ стала монография в области методологии создания информационно-вычислительных систем, написанная К. К. Колиным в соавторстве с К. Н. Евсюковым [5].

В НИИАА К. К. Колин прошел путь от начальника системного научно-тематического отдела до начальника комплексного научно-исследовательского отделения. Под руководством Генерального конструктора НИИАА академика В. С. Семенихина и его заместителей членов-корреспондентов АН СССР И. А. Мизина и П. А. Агаджанова в период 1971–1983 гг. им были выполнены разработки ряда проектов по созданию сложных информационно-вычислительных систем оборонного назначения. За их создание и внедрение К. К. Колин был в 1981 г. награжден орденом «Знак Почета».

В 1984 г. К. К. Колин был назначен генеральным директором Центрального научно-производственного объединения (ЦНПО) ЭКОР (Экономика и организация радиопромышленности) Министерства радиопромышленности СССР, основной задачей которого являлась комплексная информатизация этой оборонной отрасли. В этот период были развернуты работы по комплексной информатизации оборонных отраслей промышленности, которые осуществлялись под контролем Военно-промышленной комиссии (ВПК) при Совете Министров

СССР. Главным министерством был Минрадиопром, который осуществлял координацию работ в других оборонных отраслях. Поэтому решением ВПК К. К. Колин был назначен Главным конструктором отраслевой АСУ Минрадиопрома, а также председателем Совета главных конструкторов АСУ девяти оборонных отраслей промышленности.

Используя опыт создания автоматизированных систем военного назначения, он предложил методологию проектирования отраслевых АСУ, основанную на типовых проектных решениях создания комплексов автоматизации, а также на тех принципах поэтапного их ввода в эксплуатацию, которые сегодня известны как «технология создания открытых систем». За эти работы министром радиопромышленности СССР в 1985 г. ему было присвоено звание «Почетный радист». В 1986 г. он также был избран членом Ждановского районного совета народных депутатов г. Москвы.

В этот период времени К. К. Колин начал развивать сотрудничество с учеными Академии наук СССР. Примером здесь может служить разработка автоматизированной диалоговой системы комплексного планирования «Гранит». Она осуществлялась совместно со специалистами Вычислительного центра АН СССР (научные руководители проекта — академик Г. С. Поспелов и доктор технических наук К. К. Колин). Для реализации этого проекта в составе ЦНПО ЭКОР было создано специальное тематическое отделение, которое возглавил сотрудник ВЦ АН СССР доктор технических наук В. М. Солодов.

Система «Гранит» была основана на передовых методах программно-целевого управления и искусственного интеллекта. Она обеспечивала формирование в диалоговом режиме планов развития оборонных отраслей промышленности, сбалансированных по материальным, трудовым и финансовым ресурсам, что давало большой экономический эффект. Это был один из первых отечественных опытов применения методов искусственного интеллекта в отраслевой экономике.

С 1989 г. Константин Константинович работает в Институте проблем информатики РАН. В течение 10 лет он был заместителем директора по научной работе, исполняя при этом также и обязанности главного инженера института. За это время он много сделал для развития Института, создания и укрепления его материально-технической базы, оснащения подразделений необходимой вычислительной техникой, для организации научной и редакционно-издательской деятельности, подготовки научных кадров.

С начала 1990-х гг. по настоящее время свои научные исследования он сосредоточил главным образом в области изучения философских и гуманитарных проблем информатизации общества и связанных с этим научно-методологических аспектов развития информатики. Основным результатом этих работ стало формирование современных представлений об информатике как о фундаментальной науке и комплексной научной проблеме. В работах К. К. Колина показано, что информатика становится ядром новой перспективной научной отрасли — *информационных наук*. Его монографии по проблемам социальной информатики (см., например [6]) имеют высокий уровень цитирования, а монография «Философские

проблемы информатики» [7] переведена на китайский язык и издана в 2012 г. в Китае [8].

За результаты исследований проблем философии информации К. К. Колин в 2010 г. был избран Президентом Международного общества по изучению информации (Австрия), а в 2011 г. — членом Академического совета Международного исследовательского центра философии информации (Китай).

По его инициативе в 2008 г. в Сибирском федеральном университете совместно с рядом институтов РАН был создан Ведущий научно-образовательный центр «Информатика, информационные технологии и управление», а в 2010 г. — Научно-образовательный центр «Информационное общество» в составе Челябинской государственной академии культуры и искусств. К. К. Колин был назначен научным руководителем этого Центра и избран Почетным профессором этой Академии.

В последние годы К. К. Колин работает над формированием ряда новых направлений научных исследований, возникающих на стыках предметной области информатики с гуманитарными науками.

Им разработаны концептуальные основы *информационной культурологии* [9, 10] и *информационной антропологии*. Он считает, что первое из них должно стать научной базой для развития новой информационной культуры общества, а второе — основой информационной концепции познания природы человека [11].

Важное место в научной деятельности К. К. Колина занимают междисциплинарные исследования проблем национальной и глобальной безопасности [12]. Им также разработана принципиально новая концепция комплексной оценки качества жизни в современном обществе, которая необходима для решения стратегических задач государственного управления социально-экономическими процессами и обеспечения национальной и глобальной безопасности нашей страны [13].

Более 30 лет К. К. Колин является заместителем председателя Диссертационного совета при Институте проблем информатики РАН (с 2015 г. — при Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук). Он также избран членом Научного совета РАН по Евразийской интеграции и устойчивому развитию и входит в состав редколлегий и редсоветов ряда научных журналов России и других стран (Бельгии, Болгарии и Сингапура).

За научные заслуги К. К. Колин избран членом ряда российских и международных общественных академий наук и научных организаций. Он стал Почетным президентом Международного общества по изучению информации, которое создано в 1994 г. и имеет свою штаб-квартиру в Австрии. В 2005 г. Указом Президента России ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

В настоящее время Константин Константинович активно продолжает свою научную и общественную деятельность. Он назначен руководителем раздела научно-исследовательской работы по госбюджетной тематике ФИЦ ИУ РАН, готовит к печати очередную монографию по проблемам обеспечения национальной

безопасности России, выступает с докладами на российских и зарубежных конференциях, консультирует молодых ученых.

От имени коллектива Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук авторы желают Константину Константиновичу здоровья и дальнейших творческих успехов.

Литература

1. *Колин К. К., Липаев В. В.* Проектирование алгоритмов управляющих ЦВМ. — М.: Советское радио, 1970. 344 с.
2. *Липаев В. В., Колин К. К., Серебровский А. А.* Математическое обеспечение управляющих ЦВМ. — М.: Советское радио, 1972. 528 с.
3. *Колин К.* Математическо осигуряване на управляващи ЦИМ. — София: Техника, 1974. 548 с.
4. *Lipajew W. W., Kolin K. K.* Oprogramowanie podstawowe maszyn cyfrowych. — Ser. Biblioteka informatyki. — Warszawa: Panstwowe wydawnictwo naukowe, 1975. 388 p.
5. *Евсюков К. Н., Колин К. К.* Проектирование информационно-вычислительных систем. — М.: Статистика, 1977. 314 с.
6. *Колин К. К.* Фундаментальные основы информатики: Социальная информатика. — М.: Академический проект, 2000. 350 с.
7. *Колин К. К.* Философские проблемы информатики. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 264 с.
8. *Kolin K.* Philosophical problems in information sciences. — Beijing: China Social Sciences Press, 2012. 288 p.
9. *Колин К. К., Урсул А. Д.* Информационная культурология: предмет и задачи нового научного направления. — Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 249 p.
10. *Колин К. К., Урсул А. Д.* Информация и культура: введение в информационную культурологию. — М.: Стратегические приоритеты, 2015. 286 с.
11. *Колин К. К.* Информационная антропология: предмет и задачи нового направления в науке и образовании // Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств, 2011. № 17. С. 17–32.
12. *Колин К. К.* Глобальные угрозы развитию цивилизации в XXI веке // Стратегические приоритеты, 2014. № 1. С. 6–30.
13. *Колин К. К.* Гуманитарные аспекты понимания и оценки качества жизни в современном обществе // Знание. Понимание. Умение, 2022. № 2. С. 61–69.

*И. А. Соколов, И. И. Быстров, С. Н. Гринченко,
А. А. Зацаринный, И. М. Зацман, В. Н. Захаров, С. В. Козлов*

Бунтман Надежда Валентиновна (р. 1957) — кандидат филологических наук, доцент Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Васенин Иван Андреевич (р. 1998) — аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета

Гончаров Александр Анатольевич (р. 1994) — научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Дьяченко Юрий Георгиевич (р. 1958) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Игнатова София Дмитриевна (р. 2001) — инженер Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Казанцев Сергей Юрьевич (р. 1971) — доктор физико-математических наук, профессор Московского технического университета связи и информатики

Конашенкова Татьяна Дмитриевна (р. 1964) — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Корепанов Эдуард Рудольфович (р. 1966) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Листопад Сергей Викторович (р. 1984) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Лучко Александр Сергеевич (р. 1985) — ведущий системный администратор ООО «Автотор информационные технологии»

Миронов Юрий Борисович (р. 1985) — кандидат технических наук, ведущий инженер Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Сапожников Максим Вячеславович (р. 1998) — лаборант-исследователь Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Синицын Владимир Игоревич (р. 1968) — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Синицын Игорь Николаевич (р. 1940) — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Степченко Юрий Афанасьевич (р. 1951) — кандидат технических наук, заведующий отделом, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Сучков Александр Павлович (р. 1954) — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Терехин Дмитрий Николаевич (р. 1982) — аспирант Московского технического университета связи и информатики

Тюрин Сергей Феофентович (р. 1953) — доктор технических наук, заслуженный изобретатель РФ, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета; профессор кафедры «Математическое обеспечение вычислительных систем» Пермского государственного национального исследовательского университета

Урюпин Илья Вадимович (р. 1993) — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Шабанов Борис Михайлович (р. 1954) — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Правила подготовки рукописей статей для публикации в журнале «Системы и средства информатики»

Журнал «Системы и средства информатики» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информационных технологий.

Журнал издается на русском языке. По специальному решению редколлегии отдельные статьи могут печататься на английском языке.

Тематика журнала охватывает следующие направления:

- информационно-телекоммуникационные системы и средства их построения;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и сетей;
- методы и средства защиты информации.

1. В журнале печатаются статьи, содержащие результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях.

Публикация предоставленной автором(ами) рукописи не должна нарушать положений глав 69, 70 раздела VII части IV Гражданского кодекса, которые определяют права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации, в том числе авторские права, в РФ.

Ответственность за нарушение авторских прав, в случае предъявления претензий к редакции журнала, несут авторы статей.

Направляя рукопись в редакцию, авторы сохраняют свои права на данную рукопись и при этом передают учредителям и редколлегии журнала неисключительные права на издание статьи на русском языке (или на языке статьи, если он отличен от русского) и на перевод ее на английский язык, а также на ее распространение в России и за рубежом. Каждый автор должен представить в редакцию подписанный с его стороны «Лицензионный договор о передаче неисключительных прав на использование произведения», текст которого размещен по адресу <http://www.ipiran.ru/publications/licence.doc>. Этот договор может быть представлен в бумажном (в 2-х экз.) или в электронном виде (отсканированная копия заполненного и подписанного документа).

Если при подготовке статьи авторы использовали инструменты на основе искусственного интеллекта, они обязаны включить эту информацию в текст статьи.

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности публикации представленной статьи в открытой печати.

2. К статье прилагаются данные автора (авторов) (см. п. 8). При наличии нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией.
3. Редакция журнала осуществляет экспертизу присланных статей в соответствии с принятой в журнале процедурой рецензирования.

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.

4. Решение редколлегии о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редакции должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или L^AT_EX (.tex), дополнительно — в формате .pdf, на дискете, лазерном диске или электронной почтой. Предоставление бумажной рукописи необязательно.
7. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки.

Параметры страницы: формат — A4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху и снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3.

Основной текст: стиль — «Обычный», шрифт — Times New Roman, размер — 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине.

Рекомендуемый объем рукописи — не выше 10 страниц указанного формата. При превышении указанного объема редколлегия вправе потребовать от автора сокращения объема рукописи.

Сокращения слов, помимо стандартных, не допускаются. Допускается минимальное количество аббревиатур.

Все страницы рукописи нумеруются.

Шаблоны оформления представлены в интернете:

http://www.ipiran.ru/journal/template_iiep_ssi_2024.zip

8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:

- название статьи;
- Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
- место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
- сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_rus/authors.asp и
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_eng/authors.asp;
- аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
- ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами.
- источники финансирования работы (ссылка на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.).

9. Требования к спискам литературы.

Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в каждом из списков литературы в порядке первых упоминаний.

Списки литературы представляются в двух вариантах:

- (1) **Список литературы к русскоязычной части.** Русские и английские работы — на языке и в алфавите оригинала.
- (2) **References.** Русские работы и работы на других языках — в латинской транслитерации с переводом на английский язык; английские работы и работы на других языках — на языке оригинала.

Необходимо для составления списка “References” пользоваться размещенной на сайте <http://www.translit.net/ru/bgn/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу.

Список литературы “References” приводится полностью отдельным блоком, повторяя все позиции из списка литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы к русскоязычной части есть ссылки на иностранные публикации, набранные латиницей, они полностью повторяются в списке “References”.

Примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”:

Описание статьи из журнала:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Russ. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Описание материалов конференций:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Описание переводной книги (в списке литературы к русскоязычной части необходимо указать: / Пер. с англ. — после названия книги, а в конце ссылки указать оригинал книги в круглых скобках):

1. В русскоязычной части:

Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (*Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W.* Vibration problems in engineering. — 4th ed. — New York, NY, USA: Wiley, 1974. 521 p.)

2. В англоязычной части:

Timoshenko, S. P., D. H. Young, and W. Weaver. 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, NY: Wiley. 521 p.

Описание неопубликованного документа:

Latypov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004. Geology and production (NGT GiD). Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198. (In Russian, unpubl.)

Описание интернет-ресурса:

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov, V. I. 2003. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyy tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. Moscow. D.Sc. Diss. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovary informat-sionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

Описание ГОСТа:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichstva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow: Standardinform Publ. 10 p.

Описание патента:

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

10. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.

11. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:

- указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
- указывать в тексте письма название статьи, авторов и журнал, в который направляется статья;
- использовать attach (присоединение);
- в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.

12. Журнал «Системы и средства информатики» является некоммерческим изданием. Плата за публикацию не взимается, гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции журнала «Системы и средства информатики»:

Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ФИЦ ИУ РАН

Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05

e-mail: ssi@frccsc.ru (Стригина Светлана Николаевна)

<http://www.ipiran.ru/journal/collected>

Requirements for manuscripts submitted to Journal “Systems and Means of Informatics”

Journal “Systems and Means of Informatics” publishes theoretical, review, and discussion articles on the research and development in the field of information technology.

The journal is published in Russian. By a special decision of the editorial board, some articles can be published in English.

Topics covered include the following areas:

- information and communication systems and tools of their design;
- architecture and software of computational complexes and networks; and
- methods and tools of information protection.

1. The Journal publishes original articles which have not been published before and are not intended for simultaneous publication in other editions. An article submitted to the Journal must not violate the Copyright law. Sending the manuscript to the Editorial Board, the authors retain all rights of the owners of the manuscript and transfer the nonexclusive rights to publish the article in Russian (or the language of the article, if not Russian) and its distribution in Russia and abroad to the Founders and the Editorial Board. Authors should submit a letter to the Editorial Board in the following form:

Agreement on the transfer of rights to publish:

“We, the undersigned authors of the manuscript “. . . ,” pass to the Founder and the Editorial Board of the Journal “Systems and Means of Informatics” the nonexclusive right to publish the manuscript of the article in Russian (or in English) in both print and electronic versions of the Journal. We affirm that this publication does not violate the Copyright of other persons or organizations.

Author(s) signature(s): (name(s), address(es), date).”

This agreement should be submitted in paper form or in the form of a scanned copy (signed by the authors).

The Editorial Board has the right to request from the authors an official expert conclusion that the submitted article has no classified data prohibited for publication.

If authors used artificial intelligence (AI)-based tools in preparing their manuscript, they must include this information in the text of the article.

2. A submitted article should be attached with **the data on the author(s)** (see item 8). If there are several authors, the contact person should be indicated who is responsible for correspondence with the Editorial Board and other authors about revisions and final approval of the proofs.
3. The Editorial Board of the Journal examines the article according to the established reviewing procedure. If authors receive their article for correction after reviewing, it does not mean that the article is approved to be published. The corrected article should be sent to the Editorial Board for the subsequent review and approval.
4. The decision on the article publication or its rejection is communicated to the authors. The Editorial Board may also send the reviews on the submitted articles to the authors. Any discussion upon the rejected articles is not possible.
5. The edited articles will be sent to the authors for proofread. The comments of the authors to the edited text of the article should be sent to the Editorial Board as soon as possible.
6. The manuscript of the article should be presented electronically in the MS WORD (.doc or .docx) or L^AT_EX (.tex) formats, and additionally in the .pdf format. All documents may be sent by e-mail or provided on a CD or diskette. A hard copy submission is not necessary.

7. The recommended typesetting instructions for manuscript.

Pages parameters: format A4, portrait orientation, document margins (cm): left — 2.5, right — 1.5, above — 2.0, below — 2.0, footer 1.3.

Text: font — Times New Roman, font size — 14, paragraph indent — 0.5, line spacing — 1.5, justified alignment.

The recommended manuscript size: not more than 10 pages of the specified format. If the specified size exceeded, the editorial board is entitled to require the author to reduce the manuscript.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site:

http://www.ipiran.ru/journal/template_jiep_ssi_2024.zip

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_rus/authors.asp and
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2019_29_03_eng/authors.asp;
- abstract (not less than 100 words) both in Russian and in English. Abstract is a short summary of the article that can be published separately. The abstract is the main source of information on the article and it could be included in leading information systems and data bases. The abstract in English has to be an original text and should not be an exact translation of the Russian one. Good English is required. In abstracts, avoid references and formulae.
- Indexing is performed on the basis of keywords. The use of keywords from the internationally accepted thematic Thesauri is recommended.
Important! Keywords must not be sentences.
- Acknowledgments.

9. References. Russian references have to be presented both in English translation and in Latin transliteration (refer <http://www.translit.net/ru/bgn/>).

Please take into account the following examples of Russian references appearance:

Article in journal:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Russ. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Journal article in electronic format:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B.P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Conference proceedings:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Books and other monographs:

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogenera-torov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publ. 352 p.

Dissertation and Thesis:

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovaryia informat-sionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. Moscow: IPI RAN. PhD Thesis. 23 p.

State standards and patents:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. M.: Standardinform Publ. 10 p.

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

References in Latin transcription are presented in the original language.

References in the text are numbered according to the order of their first appearance; the number is placed in square brackets. All items from the reference list should be cited.

10. Manuscripts and additional materials are not returned to Authors by the Editorial Board.
11. Submissions of files by e-mail must include:
 - the journal title and author's name in the "Subject" field;
 - the article title, authors' names, and the journal title, whereto the paper is being submitted, in the text of the e-mail;
 - an article and additional materials have to be attached using the "attach" function;
 - an electronic version of the article should contain the file with the text and a separate file with figures.
12. "System and Means of Informatics" journal is not a profit publication. There are no charges for the authors as well as there are no royalties.

Editorial Board address:

FRC CSC RAS, 44, block 2, Vavilov Str., Moscow 119333, Russia

Ph.: +7 (499) 135 86 92, Fax: +7 (495) 930 45 05

e-mail: ssi@frccsc.ru (to Svetlana Strigina)

http://www.ipiran.ru/english/journal_systems.asp