

ISSN 1684-8853 (print); ISSN 2541-8610 (online)

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

3(100)/2019



3(100)/2019

PEER REVIEWED JOURNAL

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

**Founder**

«Information and Control Systems», Ltd.

**Publisher**Saint-Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

M. Sergeev

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

**Deputy Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

**Executive secretary**

O. Muravtsova

**Editorial Board**

S. Andreev

PhD, Tampere, Finland

V. Anisimov

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Professor, Beer-Sheva, Israel

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

A. Dudin

Dr. Sc., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD., Professor, Riverside, USA

M. Favorskaya

Dr. Sc., Professor, Krasnoyarsk, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

A. Hramov

Dr. Sc., Professor, Innopolis, Russia

L. Jain

PhD, Professor, Canberra, Australia

V. Khimenko

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

G. Maltsev

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

G. Matvienko

Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia

A. Myllari

PhD, Professor, Grenada, West Indies

Y. Podoplyokin

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

J. Seberry

PhD, Professor, Wollongong, Australia

A. Shalyto

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Novosibirsk, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

T. Sutikno

PhD, Associate Professor, Yogyakarta, Indonesia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Professor, Vologda, Russia

**Editor:** A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovaika**Design:** M. Chernenko, Y. Umnitina**Layout and composition:** Y. Umnitina**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: [i-us.spb@gmail.com](mailto:i-us.spb@gmail.com)

Tel.: +7 - 812 494 70 02

**THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS***Balonin N. A., Sergeev M. B., Seberry J., Sinitsyna O. I. Circles on lattices and Hadamard matrices*

2

**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL***Favorskaya M. N., Jain L. C. Saliency detection in deep learning era: trends of development*

10

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS***Tomchina O. P., Polyakhov D. N., Tokareva O. I., Fradkov A. L. Adaptive control of time-varying non-linear plants by speed-gradient algorithms*

37

**SYSTEM AND PROCESS MODELING***Shokin Yu. I., Yurchenko A. V. Models of organizing research data storage and usage: basic principles, processes and implementation mechanisms*

45

*Smirnov A. V., Levashova T. V. Models of decision support in socio-cyber-physical systems*

55

**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION***Sergeev M. B., Nenashev V. A., Sergeev A. M. Nested code sequences of Barker – Mersenne – Raghavarao*

71

**STOCHASTIC DYNAMICS AND CHAOS***Khimenko V. I. Random processes with random transitions between stable states*

82

**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM***Juwiler I., Bronfman I., Blaunstein N. Sh. Optical data signals in fiber optic communication links with fading*

94

*Maltsev G. N., Evteev A. V. Studying noise immunity of radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals and synchronization delay errors*

105

**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS***Khorev V. S., Maksimenko V. A., Pitsik E. N., Runnova A. E., Kurkin S. A., Hramov A. E. Analysis of motor activity using electromyogram signals*

114

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

121

Submitted for publication 06.05.19. Passed for printing 21.06.19. Format 60×84<sub>1/8</sub>.  
Phototype SchoolBookC. Digital printing.Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI.  
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia  
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI.  
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, RussiaThe journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Pressa Rossii» catalogue:  
№ 15385 — semiannual subscript.The Journal was registered in the Ministry of Press,  
Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation.  
Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002.  
Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom,  
Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR)  
due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd.,  
JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.  
© Corporate authors, 2019

3(100)/2019

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩИЕ  
СИСТЕМЫ

**Учредитель**  
ООО «Информационно-управляющие системы»

**Издатель**  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

**Главный редактор**  
М. Б. Сергеев,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

**Зам. главного редактора**  
Е. А. Круж,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

**Ответственный секретарь**  
О. В. Муравцова

**Редакционная коллегия:**  
С. Д. Андреев,  
канд. техн. наук, Тампере, Финляндия  
В. Г. Анисимов,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Б. П. Безручко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ  
Н. Блаунштейн,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль  
Л. С. Джайн,  
д-р наук, проф., Канберра, Австралия  
А. Н. Дудин,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь  
И. И. Думер,  
д-р наук, проф., Риверсайд, США  
А. И. Зейфман,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ  
К. Кристоделу,  
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США  
Г. Н. Мальцев,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Г. Г. Матвиенко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ  
А. А. Мюллер,  
д-р наук, профессор, Гренада, Вест-Индия  
Ю. Ф. Подоплёкин,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Д. Себерри,  
д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия  
А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Т. Суткин,  
д-р наук, доцент, Джакарта, Индонезия  
М. Н. Фаворская,  
д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ  
Л. Фортуна,  
д-р наук, проф., Катания, Италия  
А. Л. Фрадков,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
В. И. Хименко,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
А. Е. Храмов,  
д-р физ.-мат. наук, Иннополис, РФ  
А. А. Шальто,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
А. П. Шелета,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Ю. И. Шокин,  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ  
З. М. Юлдашев,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Р. М. Юсупов,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

**Редактор:** А. Г. Ларионова  
**Корректор:** Т. В. Звертановская  
**Дизайн:** М. Л. Черненко, Ю. В. Умницына  
**Компьютерная верстка:** Ю. В. Умницына

**Адрес редакции:** 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,  
сайт: <http://i-us.ru>

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА****Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Себерри Дж., Синицына О. И.***Окружности на решетках и матрицы Адамара*

2

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ****Favorskaya M. N., Jain L. C.** *Saliency detection in deep learning era:**trends of development*

10

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ****Томчина О. П., Поляхов Д. Н., Токарева О. И., Фрадков А. Л.***Адаптивное управление нестационарными нелинейными объектами на основе алгоритмов скоростного градиента*

37

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ****Шокин Ю. И., Юрченко А. В.** *О моделях организации хранения**и использования научных данных: основные принципы, процессы и механизмы*

45

**Смирнов А. В., Левашова Т. В.** *Модели поддержки принятия**решений в социобиофизических системах*

55

**КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ****Сергеев М. Б., Ненашев В. А., Сергеев А. М.** *Вложенные кодовые**конструкции Баркера — Мерсенна — Рагхаварао*

71

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА И ХАОС****Хименко В. И.** *Случайные процессы со случайными переходами**между устойчивыми состояниями*

82

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ****Juwiler I., Bronfman I., Blaustein N. Sh.** *Optical data signals in fiber**optical communication links with fading*

94

**Мальцев Г. Н., Евтеев А. В.** *Исследование помехоустойчивости**радиотехнических систем передачи информации**с шумоподобными фазоманипулированными сигналами**при наличии ошибок синхронизации по задержке*

105

**УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ****Хорев В. С., Максименко В. А., Пицик Е. Н., Руннова А. Е.,****Куркин С. А., Храмов А. Е.** *Анализ двигательной активности**с использованием сигналов электромиограмм*

114

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

121

Журнал входит в БД SCOPUS, в RSCI на платформе Web of Science и в 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.

Сдано в набор 06.05.19. Подписано в печать 21.06.19. Формат 60×84<sup>1/8</sup>.

Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 14,8. Уч.-изд. л. 19,9. Тираж 1000 экз (1-й завод 85 экз.). Заказ № 269.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить

в любом отделении связи по каталогу «Пресса России»:

№ 15385 — полугодовой индекс.

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г. Перерегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

© Коллектив авторов, 2019

## Окружности на решетках и матрицы Адамара

Н. А. Балонин<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-7338-4920](https://orcid.org/0000-0001-7338-4920), [korbendfs@mail.ru](mailto:korbendfs@mail.ru)

М. Б. Сергеев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-3845-9277](https://orcid.org/0000-0002-3845-9277)

Дж. Себери<sup>б</sup>, доктор наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-9558-4293](https://orcid.org/0000-0002-9558-4293), [jennifer\\_seberry@uow.edu.au](mailto:jennifer_seberry@uow.edu.au)

О. И. Сеницына<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0002-2819-4682](https://orcid.org/0000-0002-2819-4682)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

<sup>б</sup>Университет Вуллонгонг, Вуллонгонг, Новый Южный Уэльс 2522, Австралия

**Введение:** гипотеза Адамара о существовании всех матриц порядков, кратных четырем, и проблема Гаусса о числе точек в круге относятся к ряду важных поворотных пунктов в развитии математики. Они стимулировали развитие научных школ по всему миру с практически необозримым количеством работ. Приводятся обоснования, что эти научные задачи глубоко связаны, число точек Гаусса (точек на решетке  $\mathbb{Z}^3$ ) на сфероиде, конусе, параболоиде, параболе и их расположение диктует количество и виды матриц Адамара. **Цель:** указать верхнюю и нижнюю границы количества точек Гаусса на сфероиде с нечетными координатами в зависимости от порядка задачи с целью конкретизировать теорему Гаусса (о разрешимости квадратичных задач в треугольных числах проекциями на плоскость Лиувилля) оценками на случай, касающийся матриц Адамара. **Методы:** предложенные авторами ранее пути доказательства гипотезы Адамара на основании взаимно-однозначного соответствия между ортогональными матрицами и точками Гаусса дополнены еще одним, использующим свойства обобщенных окружностей на  $\mathbb{Z}^3$ . **Результаты:** доказано, что нижняя граница всех точек Гаусса с нечетными координатами равна радиусу экватора  $R$ , верхняя граница точек, размещенных выше экватора, равна длине этого экватора  $L = 2\pi R$  и общее число точек ограничено значением  $2L$ . В силу симметрии сфероида в секторе с положительными координатами (октанте) это дает значения  $R/8$  и  $L/4$ . Таким образом, число точек Гаусса с нечетными координатами не превышает длины периметра границы и не меньше относительной доли сектора в общем объеме фигуры. **Практическая значимость:** связанные с точками решетки матрицы Адамара имеют непосредственное практическое значение для задач помехоустойчивого кодирования, сжатия и маскирования видеоинформации.

**Ключевые слова** — точки Гаусса, проблема Гаусса, сфероид на решетке, ортогональные матрицы, матрицы Адамара, гипотеза Адамара, массив Балонина — Себери.

**Для цитирования:** Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Себери Дж., Сеницына О. И. Окружности на решетках и матрицы Адамара. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-2-9

**For citation:** Balonin N. A., Sergeev M. B., Seberry J., Sinityna O. I. Circles on lattices and Hadamard matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 2–9 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-2-9

### Введение

Окружности на решетках  $\mathbb{Z}^2$  — это классическая тема теории чисел [1], которая интересуется количеством  $N(R)$  точек с целыми координатами (точек Гаусса), попадающими в область, ограниченную окружностью  $x^2 + y^2 = R^2$  радиуса  $R$ . Приближенный ответ на этот вопрос очевиден (если брать во внимание взаимно-однозначное соответствие между точками Гаусса и квадратами решетки), его дает округленное значение площади соответствующего круга  $S = \pi R^2$ . Более точный ответ дает оценка сверху величины поправки  $E(R) = N(R) - \pi R^2$ .

Приведенная Гауссом грубая оценка  $E(R) < \sqrt{2}L(R)$ ,  $L(R) = 2\pi R$  — длина окружности, учитывает точки на окружности и близкие к окружности пограничные точки. Элементарные компьютерные проверки показывают, что число точек на пограничной окружности с ростом радиуса осциллирует относительно некоторого среднего значения  $\sqrt{R}$ . В 1915 г. Харди и Эдмунд Ландау [2, 3] пришли к выводу, что  $E(R)$  незначитель-

но, но превышает эту величину:  $E(R) < CR^{1/2+e}$ ,  $\varepsilon = 0,1298\dots$

Точное значение количества точек Гаусса  $K(R) = 4(d_3 - d_1)$  на окружности с целым значением  $n = R^2$  известно из истории нахождения числа разложений целого числа на сумму двух квадратов [1]. Оно оперирует количествами  $d_1$  и  $d_3$  нечетных делителей числа  $n$  вида  $4t + 1$  и  $4t + 3$ ,  $t$  — целое. Числа, разлагаемые на множители вида  $4t + 3$  или их нечетные степени, неразложимы на сумму двух квадратов.

Таким образом, небольшие окружности часто содержат одну точку Гаусса в квадранте (или не содержат ее). Чтобы поддерживать указанное растущее в среднем число точек для все более часто встречаемых составных значений  $n$ , точки Гаусса «переселяются» на островки в виде населенных окружностей. Точное значение числа точек не связано явно с величиной радиуса. Такие формулы существуют для выборок, в частности, для  $n = 5^k$  известно, что  $K(n) = 4k + 1$ . К сожалению, граница этого регулярного по количе-

ствам точек Гаусса семейства окружностей не может рассматриваться как оценка сверху для  $K(R) > 4(\log_5(R^2) + 1)$ .

### Связь точек Гаусса с матрицами Адамара

Условия существования ортогональных по столбцам матриц давно связывают с теоремами о разложении чисел (их порядков или порядков составных блоков) на суммы двух и более квадратов [4–8]. Это напрямую касается отмеченных в указанной литературе взвешенных матриц и матриц Адамара. Тем самым блочные матрицы с элементами 1 и  $-1$  представляют собой иллюстративный материал (в виде матричных портретов), касающийся известного теорем о разложениях чисел Ферма, Эйлера, Лагранжа.

Для построения симметричных блочных матриц достаточно трех блоков, поэтому подсчет точек Гаусса на сфероиде дает информацию о количестве видов матриц Адамара заданного порядка [9, 10]. Принципиальный и самый важный вопрос всей теории ортогональных массивов, который считается до сих пор не решенным (гипотеза Адамара), это вопрос существования матриц, и мы приводим еще один аргумент в пользу его положительного решения. В данной статье нас интересуют обобщенные окружности на решетках  $\mathbb{Z}^3$ , сфероиды, которые, в отличие от рассмотренного случая, изучены заметно хуже [10, 11].

Согласно отмеченным работам Харди и Ландау, точки на окружности в сочетании с присоединенными точками круга ведут себя более инертно, их разброс более предсказуем в том смысле, что если  $K(R) < F(R)$ , то  $E(R) < CR^{1/2+e} < F(R)$ .

Сфероид содержит на своей поверхности семейство окружностей, образованных целочисленными (по высоте) срезами трехмерных фигур. Соответственно, и количество точек Гаусса на

нем ведет себя, скорее, как среднее значение точек на окружности (напомним, пропорциональное корню квадратному из радиуса экватора). Точки Гаусса сфероида отвечают своим проекциям, точкам в круге экватора. Обратное неверно. Не все точки Гаусса в круге экватора разрешимы как целочисленные на поверхности сферы. Осцилляции количеств точек Гаусса на трехмерных поверхностях лежат в более узком коридоре, чем на окружности и в круге, не касаясь нижней границей 0.

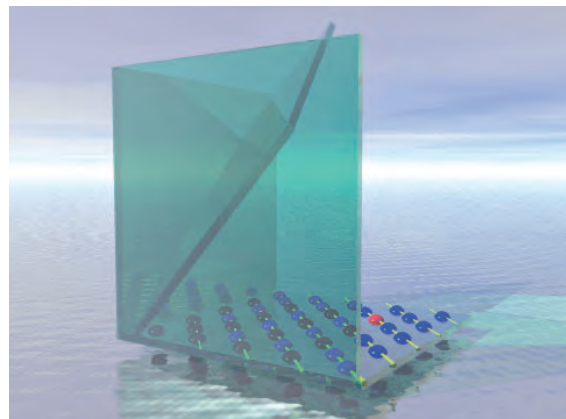
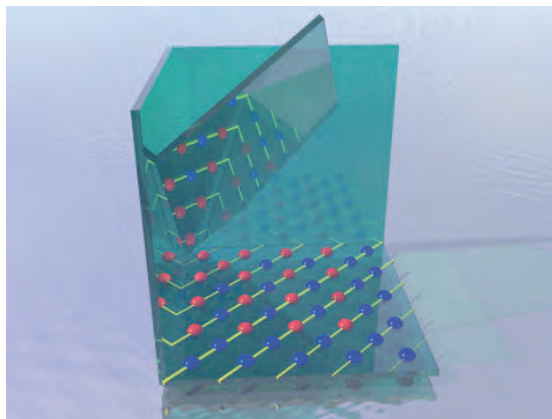
Более того, мы намерены показать, что отношение верхней и нижней границ пропорционально  $\pi$  по отношению к некоторой средней точке  $2\pi$ .

Для удобства читателя мы даем ниже несколько исторических справок на тему точек Эйлера и Гаусса.

### Задача Гольдбаха

Задача, которую Гольдбах передал товарищу по переписке, оказалась для Эйлера путеводной нитью в область теории числа. Оба они пришли к выводу, что любое четное число  $n$  состоит из суммы двух простых чисел [12]. Функция двух аргументов  $n = x + y$  описывает плоскость, проходящую через начало координат, наклоненную под  $45^\circ$  по отношению к горизонтальной плоскости (рис. 1).

Мы даем вид на нее двумя проекциями, чтобы трехмерное построение было более понятно. Линии одинакового уровня наклонной плоскости на высотах, равных четным числам, образуют при проекции на плоскость  $x, y$  гипотенузы прямоугольных равнобедренных треугольников. Смысл наблюдения Эйлера и Гольдбаха состоит в том, что нет такой гипотенузы, на которой не встречалась бы хотя бы одна точка (отмечаемая красным цветом) с координатами, равными про-



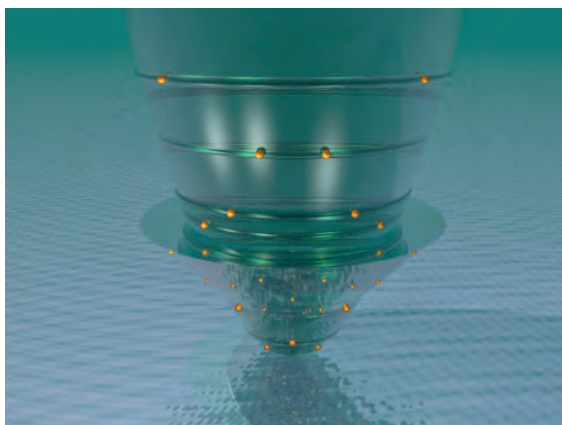
■ *Рис. 1.* Точки Эйлера — Гольдбаха  
 ■ *Fig. 1.* Euler — Goldbach points



стым числам. Бинарная проблема Гольдбаха, как называют эту задачу, не решена до сих пор, хотя проверена компьютерами до очень больших значений четных чисел. Задачи, связанные с квадратичными функциями, также сводятся к точкам на плоскости, и если мы не решаем проблему селекции точек на простые и составные (по координатам), задача заметно упрощается.

### Задача Гаусса — Лиувилля

В отличие от Эйлера и Гольдбаха, Гаусс искал целые точки внутри сечений конуса, окружность  $x^2 + y^2 = R^2$  — это сечение некоторого конуса на высоте  $R$ . Масштабированием вертикальной оси (откладывая по вертикальной оси значение квадрата вертикальной координаты конуса  $n = R^2$ ) конус преобразуется в параболоид  $n = x^2 + y^2$ , окружности сечений конуса отвечают окружностям параболоида (рис. 2).



■ *Рис. 2.* Точки Гаусса конуса и параболоида  
 ■ *Fig. 2.* Gauss points of a cone and paraboloid

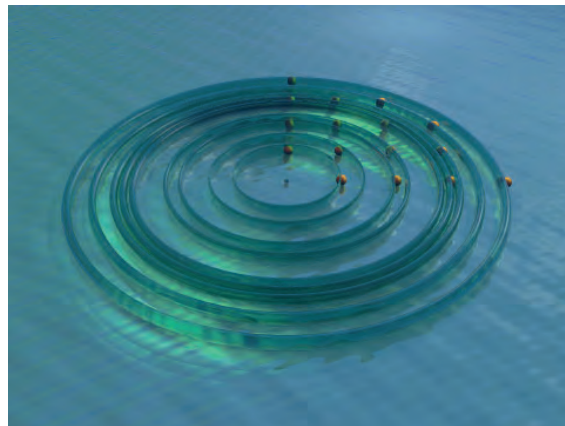
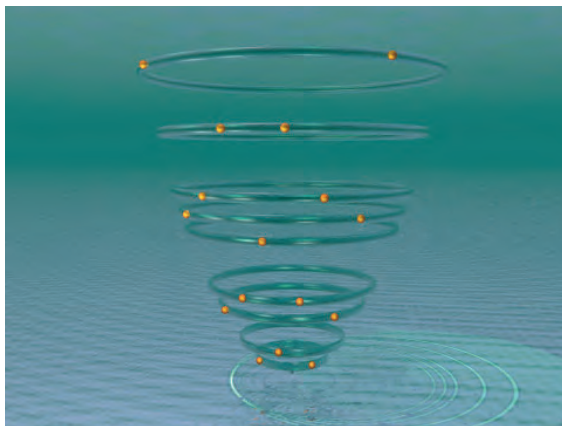
Для параболоида нет такой пары  $x, y$ , которая не нашла бы своего целочисленного разрешения. Проекции точек Гаусса на нем порождают решетку  $Z^2$ , на рис. 3 показаны точки квадранта (фигура симметрична).

Интерес к квадратичным кривым у Гаусса обусловлен открытием, которое он сделал еще студентом. Он заметил, что равноудаленные точки, достижимые на окружности с помощью циркуля и линейки, являются корнями цепочек квадратных уравнений. Пришедшие с античных времен задачи построения вписанных в окружность правильных треугольника, пятиугольника и, как он установил, семнадцатиугольника, имеют в этом смысле одинаковую природу; построение последнего также достижимо. В настоящее время существует несколько методов построения правильного семнадцатиугольника.

Подсчеты равноотстоящих точек вывели его на задачу обобщения понятия числа. Как и Эйлер, Гаусс видел соответствие между целочисленными по значениям координат точками на плоскости (точками Гаусса) и комплексными числами. Наличие непротиворечивой арифметики комплексных чисел позволяло выделить на плоскости подобие простых чисел.

Настоящий успех пришел к Гауссу, когда он занялся сферическими поверхностями  $x^2 + y^2 + z^2 = n$ . Преобразование сферы в плоскость хорошо знакомо нам по видам проекций глобуса на карту мира. Само по себе это не ново, но 10 июля 1796 студент Гаусс оставил запись в своем дневнике: Эврика!  $\text{num} = \Delta + \Delta + \Delta$ .

Нелинейными преобразованиями координат  $x^2 = 8\underline{x} + 1, y^2 = 8\underline{y} + 1, z^2 = 8\underline{z} + 1$  уравнение сферы преобразуется к уравнению плоскости вида  $\underline{x} + \underline{y} + \underline{z} = r$ , где  $r = (n - 4)/8$  для серии порядков  $n$  дает целые числа. Гаусс доказал давнее утверждение Ферма, что для любого целого  $r$  уравне-



■ *Рис. 3.* Проецирование точек Гаусса с образованием решетки  $Z^2$   
 ■ *Fig. 3.* Gauss point projection with grid  $Z^2$  formation

ние  $x + y + z = r$  разрешимо на множестве треугольных чисел [13]. Треугольные числа, как и квадратные, принадлежат к фигурным числам, известным с древности. Они представляют собой последовательные суммы целых чисел 1,  $1 + 2 = 3$ ,  $1 + 2 + 3 = 6$  и т. д.

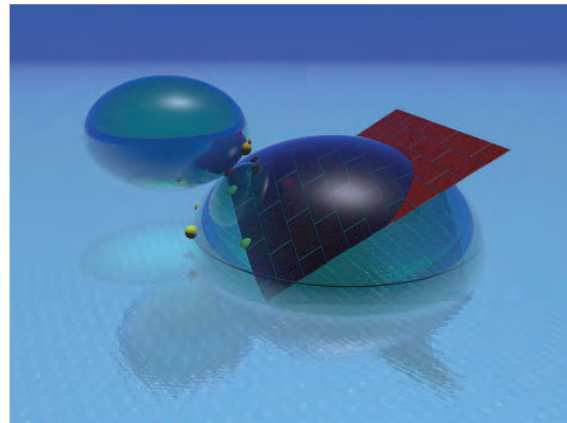
Лиувилль сделал следующий важный для нас шаг, он распространил теорему Гаусса на взвешенные суммы трех квадратов вида  $x^2 + 2y^2 + z^2 = n$  [14]. Таким образом, так же, как круг, выделенные задачей сфера и сфероид разрешимы как минимум одной ненулевой точкой, в остальном их поведение различно. Нас интересует в первую очередь сфероид, потому что он обобщает разложение чисел на сумму четырех квадратов. С обобщениями окружностей на решетках  $\mathbf{Z}^4$  нам не хотелось бы иметь дело, а при равенстве между собой любой пары координат четырехмерного пространства мы переходим к сфероиду Лиувилля.

### Изучение сфероида Лиувилля

Как это водится при решениях уравнений Диофанта, часть точек являются эфемерными (нам не годится решение типа «полтора землекопа»). Точек Гаусса с четными координатами нет на порядках  $n$ , кратных  $8(4k + 7)$ . Они являются дополнением (как присоединенные к окружности точки круга) и исчезают при сжатии сфероида вдвое со смещением его в точку  $v/2$  (по всем трем координатам). Так как задачи на поиски матриц Адамара приводят к уравнению малого сфероида, то, работая с большим, мы будем иметь в виду точки с нечетными координатами. Эту ситуацию с большим и малым (сжатым и смещенным) сфероидом и плоскостью Лиувилля для  $n = 36$  отражает рис. 4.

У сфероида  $x^2 + 2y^2 + z^2 = n$ , помимо большого радиуса экватора  $R = \sqrt{n}$ , есть вторая (вертикальная) полуось размера  $R/\sqrt{2}$ . На рисунке приведено три точки Гаусса с нечетными координатами в одном из октантов и плоскость  $x + 2y + z = r$ , проектирование на которую гарантированно дает точки с треугольными координатами. Сфероид, сжатый вдоль одной из осей, имеет двойственную природу, представляя собой совокупность сложенных стопкой окружностей или, это как посмотреть, совокупность эллипсов в иной нарезке.

**Правило 1.** При  $n = 4v$ ,  $v$  — нечетное, верхняя граница для точек с нечетными координатами, размещенными выше экватора, равна длине этого экватора  $L = 2\pi R$  (т. е. общее число точек ограничено значением  $2L$ ). Нижняя граница всех точек с нечетными координатами равна радиусу экватора  $R$ .



■ *Рис. 4.* Большой и малый сфероиды Лиувилля  
 ■ *Fig. 4.* Large and small Liouville spheroids

В силу симметрии сфероида это замечательное правило ограничивает верхнее и нижнее значения возможного числа точек в секторе с положительными координатами (октанте) значениями  $L/4$  и  $R/8$ . Таким образом, число точек Гаусса с нечетными координатами не превышает длины периметра границы и оно не меньше относительной доли октанта в общем объеме фигуры.

Доказательство первого утверждения состоит в том, что на границе действительно не уместить большее число целых точек, чем ее длина, тем более с нечетными координатами, а возможности, которые дают сечения сверху, столь быстро убывают, что длина границы экватора лимитирует число точек сверху. Что касается минимального числа точек, то радиус является осью для нарезанных на нем эллипсоидов; если каждый из них разрешим как минимум одной точкой, число точек ограничено размером фигуры. Учитывая, что нам нужны точки с нечетными координатами, в рассмотрение попадает радиус экватора, а не диаметр полной нарезки. Пропуски точек не влияют на оценку ввиду возможностей объемной фигуры так или иначе их компенсировать.

Мы привели, разумеется, простейшее обоснование установленных нами границ. Так как теоремы Гаусса и Лиувилля достаточны для принципиальной разрешимости задачи о точках на сфероиде, дополнительная компьютерная проверка правила для порядков матриц Адамара до миллиона дает нам в руки проверенный, практичный и надежный инструмент оценивания числа решений.

У сфероида есть два характеризующих его размера, эта двойственность проявляется в двойных оценках верхней и нижней границы на число точек Гаусса.

**Правило 2.** Для порядков  $n < 10^5/2$  верхняя граница для точек с нечетными координатами,

размещенными выше экватора, равна  $4\sqrt{2}R$  (в октанте в 4 раза меньше:  $\sqrt{2}R$ ). Нижняя граница всех точек с нечетными координатами равна  $4R/\pi$ , в октанте в 8 раз меньше.

Доказательство второго положения более чем элементарно и заключается в компьютерной проверке числа решений уравнений сфероида Лиувилля.

Отношения верхней и нижней границ в обоих случаях пропорционально  $\pi$ . Жесткое отношение составляет величину  $4\pi$ , для малых порядков координатор в  $\sqrt{2}$  уже.

**Правило 3.** Отношение верхней и нижней границ пропорционально  $\pi$ , по отношению к средней точке оно равно  $2\pi$ , что легко запомнить. Эти правила связывают число точек Гаусса для сжатого сверху сфероида, их нет в доступной нам научной литературе. Тем самым это существенно новые, неизвестные ранее (по крайней мере, широко) оценки для обобщенной задачи Гаусса. Ее значение усиливается рассматриваемым далее приложением к теории симметричных матриц Адамара.

Результаты компьютерного исследования задачи о числе точек Гаусса с нечетными координатами для  $n < 2 \times 10^5$  приведены на рис. 5 в виде двух качественных диаграмм: рисунок справа повторяет зависимость слева, но вдоль горизонтальной оси взят корень квадратный аргумента  $n$ .

Масштабирование приводит к характерному для квадратичных задач спрямлению границ. Возможные решения все лежат в секторе, для малых сфероидов более узком. Переключение одного типа возрастания числа точек на другой происходит примерно после первой четверти значений порядков. Всего было проверено значение аргумента до миллиона, тенденция сохранилась.

### Приложение к теории симметричных матриц Адамара

Матрицы Адамара — квадратные матрицы  $\mathbf{H}$  порядка  $n$  выше 1, 2, кратного 4, с элементами  $-1$  и  $1$  такие, что выполняется

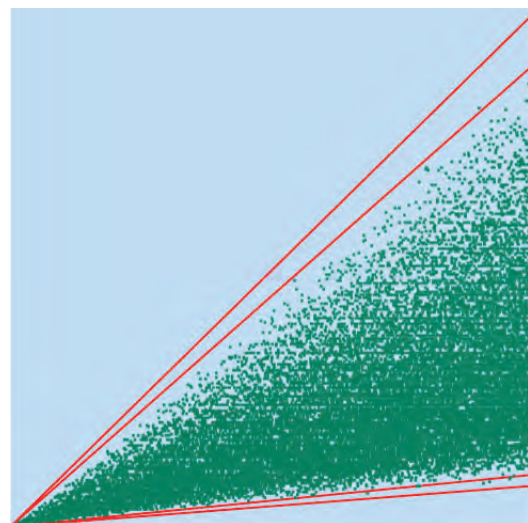
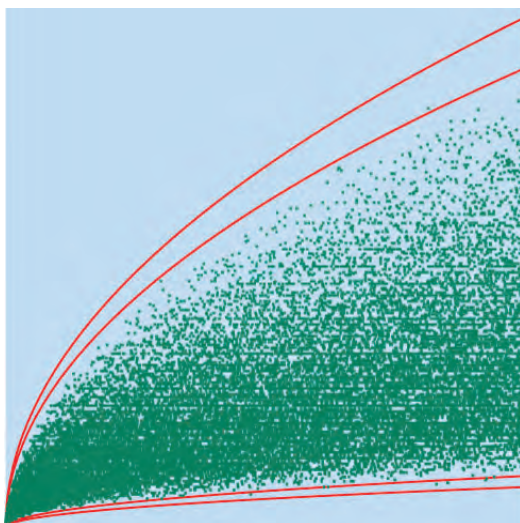
$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} = n\mathbf{I}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{I} = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)$  — единичная матрица [5, 6]. Эти матрицы появились благодаря работам основоположника матричной математики Дж. Сильвестра, который задал их рекурсивной и наиболее известной в теории матриц Адамара последовательностью  $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{A} \\ \mathbf{A} & -\mathbf{A} \end{pmatrix}$ , где  $\mathbf{A}$  — матрица Адамара на предыдущем шаге рекурсии. Начинать можно от  $\mathbf{A} = 1$ , как это делал Сильвестр, Адамар нашел еще две стартовые несимметричные матрицы 12-го и 20-го порядков [4].

Позднее в обиход вошли конструкции на двух не обязательно ортогональных основаниях  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ , например:  $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & -\mathbf{A}^T \end{pmatrix}$ , для симметричных матриц  $\mathbf{A} = \mathbf{A}^T$ . Дополним ее более универсальной конструкцией

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & -\mathbf{B}\mathbf{R} & -\mathbf{C}\mathbf{R} & -\mathbf{D}\mathbf{R} \\ -\mathbf{C}\mathbf{R} & \mathbf{R}\mathbf{D} & -\mathbf{A} & -\mathbf{R}\mathbf{B} \\ -\mathbf{B}\mathbf{R} & -\mathbf{A} & -\mathbf{R}\mathbf{D} & \mathbf{R}\mathbf{C} \\ -\mathbf{D}\mathbf{R} & -\mathbf{R}\mathbf{C} & \mathbf{R}\mathbf{B} & -\mathbf{A} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{A}^T$  — симметричный блок, условие (1) сводится к  $\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{B}^T \mathbf{B} + \mathbf{C}^T \mathbf{C} + \mathbf{D}^T \mathbf{D} = n\mathbf{I}$ . Симметрия второй



■ **Рис. 5.** Качественный график числа точек Гаусса на сфероиде Лиувилля  
 ■ **Fig. 5.** Qualitative graph of the Gauss point numbers on the Liouville spheroid



конструкции обеспечивается условием  $B = C$ , приводящим к (2). Итерационное расширение по правилу Сильвестра закрывает симметричными матрицами порядка с четным значением  $v$ . Поэтому более первичны конструкции с нечетным размером блоков  $v$ , когда  $r = (v - 1)/2$  — номер конструкции.

В научной литературе она получила наименование массива Балонина — Себерри, или, для простоты, Пропус: Эта Близнецов ( $\eta$  Gem /  $\eta$  Geminorum) — тройная звезда в созвездии Близнецов — имеет традиционное название Procyon. Учитывая сложившуюся практику наименований блоков матриц Адамара, так кратко называют иногда не весь массив, а блоки; будучи все симметричными, они совпадают с матрицами Вильямсона. Противоположный случай именуется массивом семейства Пропусов (Procyon-type array) [8, 9].

Связь симметричных матриц Адамара с задачей Гаусса — Лиувилля становится очевидной, если мы учтем, что количество  $-1$  в каждой строке блоков (орнаментальные коэффициенты [10, 11]) описывается формулами

$$k_1 = (v - x)/2, k_2 = (v - y)/2, k_3 = (v - z)/2, \quad (3)$$

данными над уравнением связи

$$x^2 + 2y^2 + z^2 = n. \quad (4)$$

Параметр ортогонального баланса  $\lambda = (k_1 + 2k_2 + k_3) - n/4$  задает число соседних  $-1$  в каждой паре строк матрицы  $H$  (в делителе  $n$  фигурирует количество блоков матрицы без учета их возможного тождества). Таким образом, доказательство теоремы Адамара о существовании всех матриц порядков, кратных 4, сводится к доказанным в теории чисел теоремам о разрешимости точек плоскости Гаусса — Лиувилля  $\underline{x} + 2\underline{y} + \underline{z} = r$  треугольными числами [1, 12].

### Бициклические матрицы и моноблоки

Для двублочной конструкции  $H$  необходимое условие существования несимметричной, в общем, матрицы Адамара заключается в разложимости ее порядка на сумму двух квадратов. Аналог сфероида в данном случае — окружность Лиувилля (срез ранее обсуждаемого параболоида) (рис. 6).

Роль малого сфероида Лиувилля играет вдвое более узкий параболоид с точками  $k_1 = (v - x)/2$ ,  $k_2 = (v - y)/2$ , с центром, смещаемым в точку  $v/2$  по обеим координатам. Положения его срезов показаны на рис. 7.

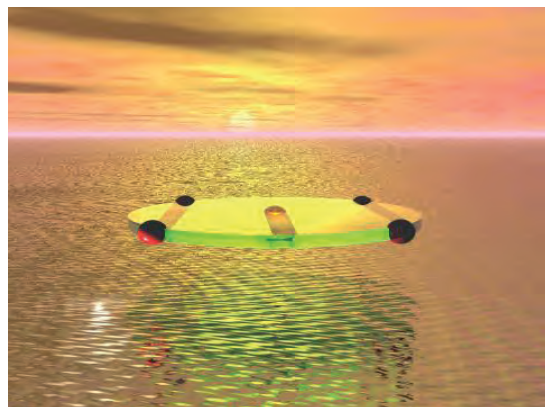
Компьютерные портреты матриц Адамара являются превосходным и мало известным иллюстративным материалом к древним числовым тео-

ремам Ферма, Эйлера, Лагранжа и Гаусса о разложениях чисел на суммы квадратов. Каждое такое разложение сопровождается своей матрицей, орнаментальные особенности которой тесно связаны с сортом поверхности, на котором точка расположена, и особенностями самих чисел (рис. 8).

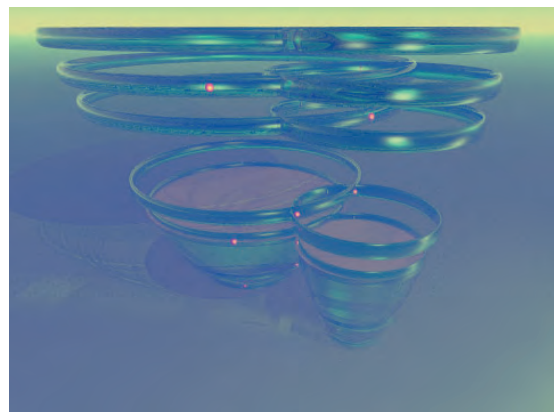
Например, порядок  $n = 4 \times 3^2 = 36$  разлагается на сумму двух квадратов, поскольку содержит критический делитель 3 в четной степени. Соответствующая матрица Адамара существует, однако на ее орнамент наложено более серьезное, чем в других таких случаях, ограничение: ее не реализовать при помощи двух циклических блоков  $A, B$ . Необходима более сложная конструкция, например в виде Пропуса.

Вместе с тем порядок  $n$  является квадратом, так что Пропус, в свою очередь, может рассматриваться как моноблок  $A$  с  $k_1 = (n - x)/2$ .

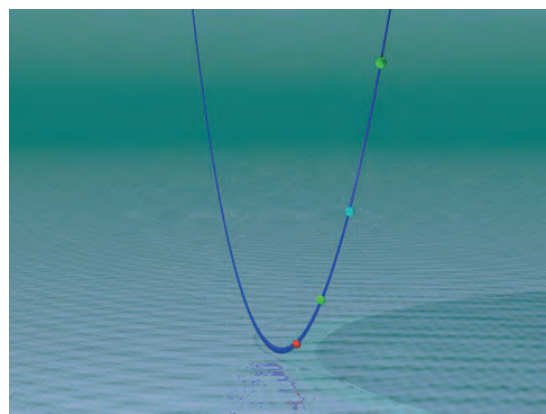
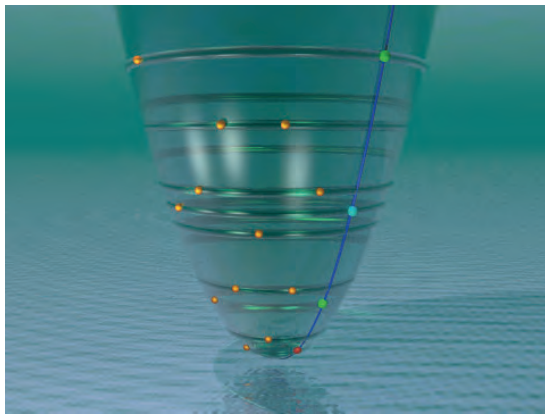
Точки Гаусса  $\{n, x\}$  размещены на параболе  $n = x^2$ ,  $x = 2u$  — четное число. Такого сорта перевертыши порождают так называемые регулярные матрицы Адамара со свойствами магических



■ Рис. 6. Точки Гаусса на окружностях Лиувилля  
 ■ Fig. 6. Gauss points on Liouville circles



■ Рис. 7. Окружности Лиувилля для начальных порядков  
 ■ Fig. 7. Liouville circles for initial orders



■ Рис. 8. Точки Лиувилля на параболе (срезе параболоида)

■ Fig. 8. Liouville points on a parabola (cut of a paraboloid)

квадратов: суммы строк и столбцов одинаковы между собой.

Хорошо известно, что четные сомножители не оказывают влияния на сам факт разложения порядка. Тем не менее одним лишь умножением порядка 36 на 4 мы переходим в расширенное пространство с  $n = 16 \times 3^2 = 144$ , в котором циклические парные блоки **A**, **B**, оказывается, существуют.

## Заключение

В работе исследована мало изученная связь задач об окружностях на решетках с темой ортогональных матриц. Эта связь дает нам в руки очень важные инструменты для установления внешнего вида матриц, регламентируемого орнаментальными коэффициентами (количествами  $-1$  в строках). Тщательное исследование сфероидов Лиувилля привело нас к выводу о том, что количество точек Гаусса на них отвечает известной теореме о наличии решений.

Установлено, что число решений растет с порядком и подчиняется секторным ограничениям, описанным нами.

Формулы для подсчетов минимального, среднего и максимального количества точек Гаусса на

сфероиде новы и ранее в научной литературе не встречались. Они важны, поскольку иллюстрируют не только качественно, но и количественно число различных между собой симметричных матриц Адамара — Пропусов, т. е. отвечают подробно на задачу, поставленную Жаком Адамаром более ста лет тому назад: существуют ли матрицы Адамара на порядках, кратных 4, каковы они, и сколько таких матриц существует.

## Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ при проведении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2.2200.2017/4.6.

## Благодарности

Мы приносим благодарность за многолетнее сотрудничество и поддержку профессору Драгомиру Джоковичу. Большую помощь в технической работе с рукописью статьи оказала Т. В. Балонина.

## Литература

1. Вавилов В. В., Устинов А. В. Окружности на решетках. *Квант*, 2006, № 6, с. 34–40.
2. Hardy G. H. On the expression of a number as the sum of two squares. *Quart. J. Math.*, 1915, vol. 46, pp. 263–283.
3. Landau E. Über die Gitterpunkte in einem Kreise. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen*, 1915, pp. 148–160 (In German).
4. Hadamard J. Résolution d'une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
5. Seberry J., Yamada M. Hadamard matrices, sequences, and block designs. In: *Contemporary design theory: A collection of surveys*/ J. H. Dinitz and D. R. Stinson, eds. John Wiley and Sons, 1992. Pp. 431–560.
6. *Handbook of combinatorial designs*. 2nd ed./ Charles J. Colbourn, Jeffrey H. Dinitz, eds. Chapman and Hall/CRC, 2006. 1000 p.
7. Yamada M., Seberry J. *Hadamard matrices constructed using number theory and algebra*. John Wiley (to appear).

8. Balonin N. A., Seberry J. Two infinite families of symmetric Hadamard matrices. *Australian Journal of Combinatorics*, 2017, vol. 69(3), pp. 349–357.
9. Balonin N. A., Balonin Y. N., Djokovic D. Z., Karbovskiy D. A., Sergeev M. B. Construction of symmetric Hadamard matrices. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 5, с. 2–11. doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.5.2 (16 Aug 2017; arXiv:1708.05098).
10. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Как гипотезе Адама-ра помочь стать теоремой. Ч. 1. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 6, с. 2–13. doi:10.31799/1684-8853-2018-6-2-13
11. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Как гипотезе Адама-ра помочь стать теоремой. Ч. 2. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 1, с. 2–10. doi:10.31799/1684-8853-2019-1-2-10
12. Стюарт И. *Величайшие математические задачи*. М., Альпина нон-фикшн, 2016. 460 с.
13. Гаусс К. Ф. *Труды по теории чисел*/ пер. Б. Б. Демьянова; под ред. И. М. Виноградова; комментарии Б. Н. Делоне. М., Изд-во АН СССР, 1959. 978 с.
14. Liouville J. Nouveaux théorèmes concernant les nombres triangulaires. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 1863, no. 8, pp. 73–84 (In French).

UDC 519.614

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-2-9

**Circles on lattices and Hadamard matrices**N. A. Balonin<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-7338-4920, korbendfs@mail.ruM. B. Sergeev<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-3845-9277J. Seberry<sup>b</sup>, Dr. Sc., Tech., Honorary Professor, orcid.org/0000-0002-9558-4293, jennifer\_seberry@uow.edu.auO. I. Sinityna<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0002-2819-4682<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Department of Computing and Information Technology, University of Wollongong, NSW 2522, Australia

**Introduction:** The Hadamard conjecture about the existence of Hadamard matrices in all orders multiple of 4, and the Gauss problem about the number of points in a circle are among the most important turning points in the development of mathematics. They both stimulated the development of scientific schools around the world with an immense amount of works. There are substantiations that these scientific problems are deeply connected. The number of Gaussian points ( $Z^3$  lattice points) on a spheroid, cone, paraboloid or parabola, along with their location, determines the number and types of Hadamard matrices. **Purpose:** Specification of the upper and lower bounds for the number of Gaussian points (with odd coordinates) on a spheroid depending on the problem size, in order to specify the Gauss theorem (about the solvability of quadratic problems in triangular numbers by projections onto the Liouville plane) with estimates for the case of Hadamard matrices. **Methods:** The authors, in addition to their previous ideas about proving the Hadamard conjecture on the base of a one-to-one correspondence between orthogonal matrices and Gaussian points, propose one more way, using the properties of generalized circles on  $Z^3$ . **Results:** It is proved that for a spheroid, the lower bound of all Gaussian points with odd coordinates is equal to the equator radius  $R$ , the upper limit of the points located above the equator is equal to the length of this equator  $L = 2\pi R$ , and the total number of points is limited to  $2L$ . Due to the spheroid symmetry in the sector with positive coordinates (octant), this gives the values of  $R/8$  and  $L/4$ . Thus, the number of Gaussian points with odd coordinates does not exceed the border perimeter and is no less than the relative share of the sector in the total volume of the figure. **Practical significance:** Hadamard matrices associated with lattice points have a direct practical significance for noise-resistant coding, compression and masking of video information.

**Keywords** — Gaussian points, Gauss problem, spheroid on a lattice, orthogonal matrices, Hadamard matrices, Hadamard conjecture, Balonin — Seberry array.

**For citation:** Balonin N. A., Sergeev M. B., Seberry J., Sinityna O. I. Circles on lattices and Hadamard matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 2–9 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-2-9

**References**

1. Vavilov V. V., Ustinov A. V. Circles on lattices. *Kvant*, 2006, no. 6, pp. 34–40 (In Russian).
2. Hardy G. H. On the expression of a number as the sum of two squares. *Quart. J. Math.*, 1915, vol. 46, pp. 263–283.
3. Landau E. Über die Gitterpunkte in einem Kreise. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen*, 1915, pp. 148–160 (In German).
4. Hadamard J. Résolution d’une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
5. Seberry J., Yamada M. *Hadamard matrices, sequences, and block designs*. In: *Contemporary design theory: A collection of surveys*. J. H. Dinitz and D. R. Stinson, eds. John Wiley and Sons, 1992. Pp. 431–560.
6. *Handbook of combinatorial designs*. 2nd ed. Charles J. Colbourn, Jeffrey H. Dinitz eds. Chapman and Hall/CRC, 2006. 1000 p.
7. Yamada M., Seberry J. *Hadamard matrices constructed using number theory and algebra*. John Wiley (to appear).
8. Balonin N. A., Seberry J. Two infinite families of symmetric Hadamard matrices. *Australian Journal of Combinatorics*, 2017, vol. 69(3), pp. 349–357.
9. Balonin N. A., Balonin Y. N., Djokovic D. Z., Karbovskiy D. A., Sergeev M. B. Construction of symmetric Hadamard matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 5, pp. 2–11. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.2 (16 Aug 2017; arXiv:1708.05098).
10. Balonin N. A., Sergeev M. B. Helping Hadamard conjecture to become a theorem. Part 1. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 6, pp. 2–13 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-6-2-13
11. Balonin N. A., Sergeev M. B. Helping Hadamard conjecture to become a theorem. Part 2. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 1, pp. 2–10 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-1-2-10
12. Stewart Ian. *The Great Mathematical Problems*. Profile Books, 2013. 320 p.
13. Gauss K. F. *Trudy po teorii chisel* [Works by number theory]. Moscow, AN SSSR Publ., 1959. 978 p.
14. Liouville J. Nouveaux théorèmes concernant les nombres triangulaires. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 1863, no. 8, pp. 73–84 (In French).



## Saliency detection in deep learning era: trends of development

M. N. Favorskaya<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0002-2181-0454](https://orcid.org/0000-0002-2181-0454), [favorskaya@sibsau.ru](mailto:favorskaya@sibsau.ru)

L. C. Jain<sup>b,c,d</sup>, PhD, Professor, [orcid.org/0000-0001-6176-3739](https://orcid.org/0000-0001-6176-3739)

<sup>a</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarsky Rabochoy Ave., 660037 Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>b</sup>University of Canberra, 11 Kirinari St., Bruce ACT 2617, Canberra, Australia

<sup>c</sup>Liverpool Hope University, Hope Park, Liverpool L16 9JD, UK

<sup>d</sup>University of Technology Sydney, PO Box 123, Broadway NSW 2007, Sydney, Australia

**Introduction:** Saliency detection is a fundamental task of computer vision. Its ultimate aim is to localize the objects of interest that grab human visual attention with respect to the rest of the image. A great variety of saliency models based on different approaches was developed since 1990s. In recent years, the saliency detection has become one of actively studied topic in the theory of Convolutional Neural Network (CNN). Many original decisions using CNNs were proposed for salient object detection and, even, event detection. **Purpose:** A detailed survey of saliency detection methods in deep learning era allows to understand the current possibilities of CNN approach for visual analysis conducted by the human eyes' tracking and digital image processing. **Results:** A survey reflects the recent advances in saliency detection using CNNs. Different models available in literature, such as static and dynamic 2D CNNs for salient object detection and 3D CNNs for salient event detection are discussed in the chronological order. It is worth noting that automatic salient event detection in durable videos became possible using the recently appeared 3D CNN combining with 2D CNN for salient audio detection. Also in this article, we have presented a short description of public image and video datasets with annotated salient objects or events, as well as the often used metrics for the results' evaluation. **Practical relevance:** This survey is considered as a contribution in the study of rapidly developed deep learning methods with respect to the saliency detection in the images and videos.

**Keywords** – salient region detection, salient object detection, salient event detection, deep learning, convolutional neural network, feature extraction.

**For citation:** Favorskaya M. N., Jain L. C. Saliency detection in deep learning era: trends of development. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 10–36. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-10-36

### Introduction

Saliency detection is a fundamental task in computer vision and includes three aspects, such as the region-based detection, object-based detection, and event-based detection. Salient regions are identified for integrating the entire segments into salient objects. If the goal of object detection is to find and identify a visual object, then the salient object detection means to retrieve an object, which attracts a human attention. The main proposition of these algorithms is in that a human vision focuses on the most distinctive parts of image or video sequence without any prior knowledge. Recently, a salient event detection is applied as a promising technique in video annotation.

The first saliency detection algorithms were proposed three decades ago [1], and since that time this topic attracts many researchers, who suggested numerous modifications of saliency detection for various computer vision tasks, such as image classification [2], person re-identification [3], image resizing [4], image inpainting [5], image cropping [6], image search [7], robot vision [8], and video summarization [9].

Saliency detection algorithms can be classified as two opposite types: top-down (faster, subcon-

scious, and data-driven saliency extraction) and bottom-up (slower, task-related, and knowledge-driven saliency extraction). Bottom-up models have been widely studied in cognitive fields. Note that with the emergence of Convolutional Neural Networks (CNN), a data-driven model becomes more high-level data model [10].

Generally speaking, top-down saliency detection is applied to goal-oriented detection, when prior knowledge regarding the object characteristics is known. According to the task goal, the top-down saliency algorithms design distinctive features, which are defined manually [11, 12] or automatically, e.g. using networks [13]. The low-level features easily extracted, such as edges, straight lines, and corners, allow to construct the salient regions. Thus, in [14] it was introduced five image objectness cues (multi-scale saliency of a window, color contrast, edge density, superpixels straddling, and location and size of a window), which localized the salient objects with a good visibility in a Bayesian framework. The famous histograms of oriented gradients for a human detection were presented in [15]. This method combined different features, such as fine-scale gradients, fine orientation binning, coarse spatial binning, and local-contrast normalization of overlapping blocks, that allowed to achieve the effective results of human recognition.

Bottom-up saliency detection focus on visual stimuli from the image or video scene, and the main incentives are the contrast or movement, respectively. Bottom-up saliency methods are not relevant to the task and more flexible. The majority of these methods were developed during the last few decades. Thus, the saliency score of a certain region was calculated as the sum of contrast values between one region and all the others in [16]. The color contrast of larger color regions was estimated based on the saliency scores, spatial weighting strength, and spatial distance between regions in the Euclidean metric. Some saliency algorithms exploit the idea that the regions with similar colors distributed more widely do not attract the human vision attention [17]. The idea of saliency filters and descriptors of saliency detection features has been explored since 2010s [18]. Extraction of saliency detection features had been remained manual low-level sub-task until novel machine learning techniques, such as CNNs, did not emerge.

### Generations of saliency detection methods

Saliency detection means a detection of the most attractive for human vision part of image or frame. Usually, saliency detection is interpreted as the salient object detection. However, the term “saliency detection” is widely used and includes the salient region detection as the first attempts of promoting this technique. At the same time, the salient event detection reflects the recent advantages in video analysis.

The *first generation of saliency models* was based on the multiple disciplines including, first of all, cognitive psychology and neuroscience, and then computer vision. Some fundamental investigations in the cognitive and psychological theories of bottom-up attention [19–21] influenced strongly on the development of the earliest saliency algorithms. Even first saliency models, which used multi-scale color contrast, intensity contrast, and orientation contrast maps processed by dynamic neural network [1], were able to detect conspicuous locations in scenes. At that time, evaluation of saliency detection methods was implemented by subsequent behavioral and computational investigations [22, 23].

The *second generation* is referred to 2000s, when a saliency detection was developed as a binary segmentation problem [24, 25]. This concept was inspired by salient regions and proto-objects detection [26, 27] and had led to tremendous publications in this scope. At present, such representation of saliency detection remains the main type of representation. The crucial issue is how saliency detection relates to such popular tasks of computer vision as image segmentation, object detection, and object generation.

The *third generation of saliency models* deals with CNNs propagation [28–30]. In contradistinction to classic methods based on contrast cues [16, 18, 31–33], the CNNs-based methods eliminate a necessity of handcrafted features extraction and facilitate a dependency on center bias knowledge. Usually CNN contains million of tunable parameters distributed in raw layers, which extract low-level features, and fine layers, which provide high-level features. Therefore, global and local information highlighting salient regions and their boundaries can be obtained. Since 2012, it is considered that CNN models perform in accuracy parameters the handcrafted feature-based models for pattern recognition, and saliency detection models are not exclusion. Thus, the mainstream direction in saliency detection is becoming CNN models [34]. More, this concept is propagated on video saliency detection, when the researchers are passing from the contrast analysis [35] to CNN-based models [36, 37].

Generally speaking, any saliency detection model should meet the following three criteria:

- saliency detection with low values of errors including missing salient regions and falsely marking of non-salient regions;
- high resolution of saliency maps for accurate salient objects localization;
- computational efficiency, especially fast salient regions detection.

At present, none of existing saliency detection algorithms satisfies to these criteria fully that causes a necessity to continue investigations in this scope.

### Development of saliency detection methods

#### Region-based saliency detection methods

The first classical approaches were oriented on the pixel-based saliency models based on the local center-surround differences due to low computational cost [1, 38]. Such models employed the sliding integration windows to estimate the center and surrounding appearances. The global compactness of color was another statement in saliency detection [18, 39]. This approach can be concerned to the region-based saliency detection, when a content-aware segmentation was a preliminary step before saliency detection in each extracted segment instead of each pixel [32, 40].

The invention of algorithm contributed significantly in region-based saliency detection [41]. The followers used this algorithm in many tasks of computer vision, including saliency detection task [42, 43].

Thus, in [43] a segment-based saliency detection method was based on the superpixels computed in multiple scales. The difference between superpixels was measured with the Wasserstein distance on  $L_2$  norm ( $W_2$ -distance). First, the simple linear iterative clustering algorithm extracted the superpixels

of more than 64 pixels at the finest scale because too small regions make the appearance distribution estimation less meaningful. Second, this procedure was repeated for three scales starting from the finest scale by decreasing the number of demanded superpixels by a factor of two.

**Object-based saliency detection methods**

Object-based detection models generate a salient object bounding box through segmenting the salient object based on the saliency maps [44]. Salient object detection has a significant meaning in many practical applications, such as image cropping [45], adaptive image display on mobile devices [46], extracting dominant colors on the object of interest for web image filter [47], image segmentation [48], visual tracking [49], among others.

Usually, the main intensity, color, contrast (including the color contrast, texture energy contrast, and texture gradient contrast) normalized maps, as well as the additional edge, angle, and symmetry saliency maps, are built with further fusion of all

types of maps [50]. Such algorithms differ in details of implementation.

However, a localizing the salient objects is always a very challenging problem that could not be solved sufficiently many years ago. We can refer to the challenges, such as various visual characteristics of objects, cluttered background, sometimes low resolution of images, and blurring. The CNNs application allows to overcome the main problems.

Rapid development of deep learning techniques led to the emergence of CNNs with different architectures tuned for practical applications [51–56]. Due to their properties, CNNs provide richer features, which allow to detect the salient object simultaneously on the lower and higher levels using the extracted low-level and high-level features, respectively. A family of CNN-based salient object detection methods includes many interesting decisions with the outstanding results. Let us consider some of them.

Tables 1 and 2 provide a description of static and dynamic CNN-based saliency models, respectively. Each model is explained by its architecture.

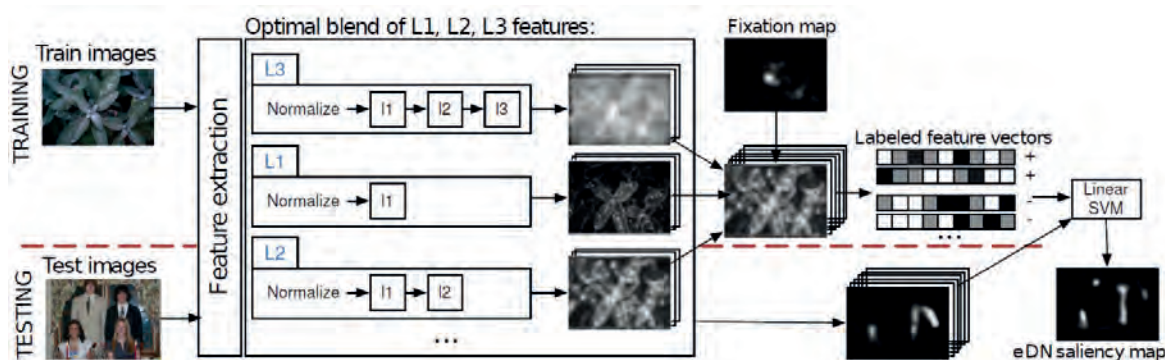
■ **Table 1.** Static CNN-based saliency models

Caption	Description
eDN (ensembles of Deep Networks), 2014	The eDN is the first attempt to apply a prototype of CNN for image saliency prediction (Fig. 1). First, a large number of 1–3 layered networks using biology inspired hierarchical features are constructed. Second, the independent models have been searched by hyper-parameter optimization. Third, the independent models combine into a single model by training a linear SVM [57]
DeepGaze I and DeepGaze II, 2014 and 2017	DeepGaze I is a relatively deeper CNN pre-trained by AlexNet and involved five layers [58]. After convolutional layers, a linear model computes an image salience (Fig. 2). Hereinafter, DeepGaze II [59] built upon DeepGaze I was implemented. Both networks explore the unique contributions between the low-level and high-level features towards a fixation prediction
Mr-CNN (Multi-resolution CNN), 2015	The multi-resolution three-layered Mr-CNN implements the automated learning of early features, bottom-up saliency, top-down factors, and their integration simultaneously using an eye-tracking mechanism [60]. Mr-CNN are learnt both low-level features related to bottom-up saliency and high-level features related to top-down factors in order to improve eye fixation prediction. The fixation and non-fixation image regions are extracted for training Mr-CNN (Fig. 3)
SALICON (SALiency In CONtext), 2015	SALICON uses the elements of AlexNet, VGG-16, and GoogLeNet architectures in order to provide a narrow semantic gap between the predicting eye fixations and strong semantic content [61]. It combines information of high-level and coarse-level semantics encoded in deep neural network pretrained in ImageNet for object recognition. Then both branches are concatenated to produce the final saliency map (Fig. 4)
ML-Net (Multi-Level Network), 2016	ML-Net combines the features extracted from different CNN levels [62]. It is composed of three main blocks: feature extraction CNN, feature encoding network that weights the low and high level feature maps, and prior learning network (Fig. 5)
JuntingNet and SalNet (Junting is the name of the main author and SALiency Network), 2016	This approach proposes two different architectures: a shallow CNN (JuntingNet), trained from scratch, and a deep CNN (SalNet) that reuses parameters from the bottom three layer of a network previously trained for classification [63]. The JuntingNet is inspired by the AlexNet and uses three convolutional and two fully connected layers, which are all randomly initialized. The SalNet contains eight convolutional layers with the first three being initialized from the VGG network (Fig. 6)
PDP (Probability Distribution Prediction), 2016	PDP CNN employs a new saliency map model, which formulates a map as a generalized Bernoulli distribution [64]. PDP CNN is trained using a novel loss functions, which pair the softmax activation function with measures designed to compute distances between probability distributions (Fig. 7). Experiments showed that new loss functions are more efficient than traditional loss functions

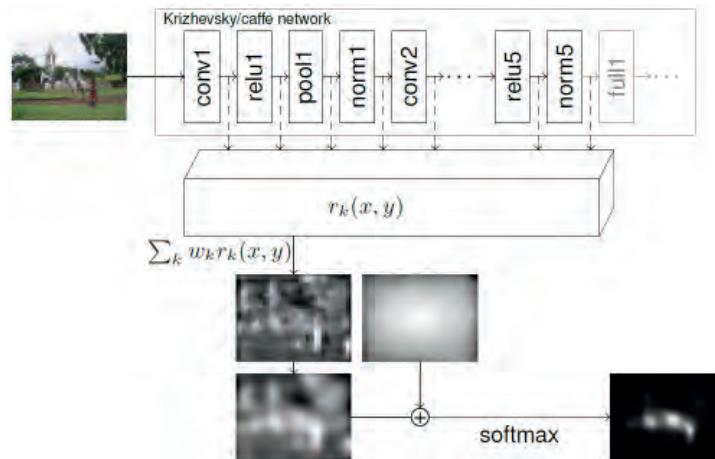


■ Table 1 (completed)

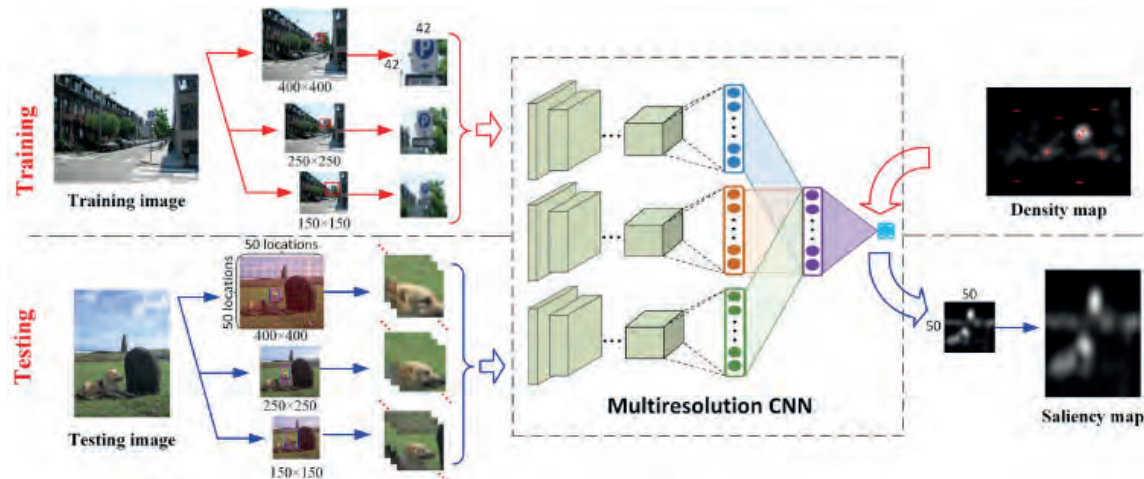
Caption	Description
DSCLRCN (Deep Spatial Contextual Long-term Recurrent Convolutional Neural network), 2016	DSCLRCN, first, learns local saliency of small image regions using CNN [65]. Then, it scans the image both horizontally and vertically using a deep spatial long short-term memory model to capture a global context. These two operations allow DSCLRCN to incorporate simultaneously and effectively the local and global contexts to infer an image saliency (Fig. 8)
FUCOS (Fully COnvolutional Saliency), 2016	FUCOS (Fig. 9) is applied to either gaze, or salient object prediction [66]. It integrates pre-trained layers from large-scale CNN models and is then fine-tuned on PASCAL-Context dataset [67]
SAM Net (Saliency Attentive Models), 2016	The core of SAM Net is Attentive Convolutional Long Short-Term Memory network (Attentive ConvLSTM) that focuses on the most salient regions of the input image to iteratively refine the predicted saliency map [68]. SAM Net combines a fully convolutional network with a recurrent convolutional network, endowed with a spatial attentive mechanism (Fig. 10)
ELM (Extreme Learning Machines), 2016	Ensemble of ELM [69] is based on a saliency model based on inter-image similarities and ensemble of extreme learning machine [70]. Firstly, a set of images similar to a given image is retrieved. A saliency predictor is then learned on this set using ELM and forming an ensemble. Finally, the saliency maps provided by the ensemble's members are averaged in order to construct the final map (Fig. 11)
DeepFix (Deep Fixation), 2017	DeepFix is a first fully CNN for accurate saliency prediction, which captures semantics at multiple scales with very large receptive fields [71]. It also incorporates Gaussian priors to further improve the learned weights (Fig. 12). Fully convolutional nets are spatially invariant that prevents them from modeling the location dependent patterns (e. g. centre-bias)
SalGAN (Saliency Generative Adversarial Network), 2017	SalGAN model [72] is the extended version of GANs [73]. It includes two networks: generator and discriminator. The generator is trained via back-propagation using a binary cross entropy (adversarial) loss on existing saliency maps. Then the result is passed to the discriminator that is trained to identify whether a saliency map was synthesized by the generator or built using a ground truth (Fig. 13)
DVA (Deep Visual Attention), 2017	In DVA model, an encoder-decoder architecture is trained over multiple scales to predict pixel-wise saliency [74]. The encoder network is topologically identical to the first 13 convolutional layers in the VGG-16 network and decoder network is used to map the low resolution encoder feature maps into dense full-input-resolution feature maps. DVA captures hierarchical global and local saliency information. It is based on a skip-layer network structure. Final multi-level saliency prediction is achieved via a combination of the global and local predictions (Fig. 14)
Attentional Push, 2017	Attention Push model based on shared attention considers a viewer of a scene actor and uses it to augment image salience [75]. It contains two pathways: an Attentional Push pathway, which learns the gaze location of the scene actors, and a saliency pathway. However, the limitation is that it is required to find the actor' head location respect to the camera (Fig. 15)
EML-NET (Expandable Multi-Layer NETwork), 2018	EML-NET is a scalable model, in which the encoder and decoder components are separately trained [76]. The encoder can contain more than one CNN model to extract features, and these models can have different architectures or be pre-trained on different datasets (Fig. 16)



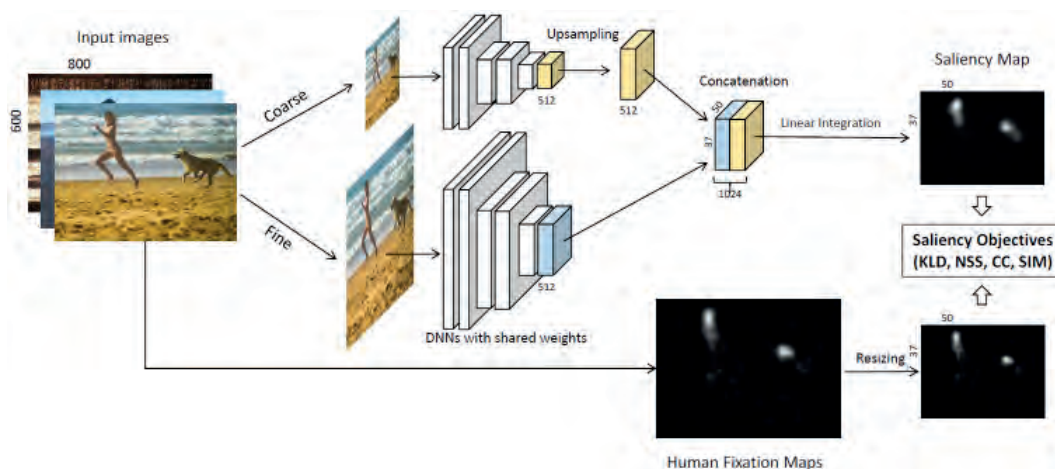
■ Fig. 1. The eDN architecture. Good multilayer feature extractors are found by a guided hyperparameter search (not shown) and combined into an optimal blend. Resulting feature vectors are labeled with empirical gaze data and fed into a linear SVM [57]



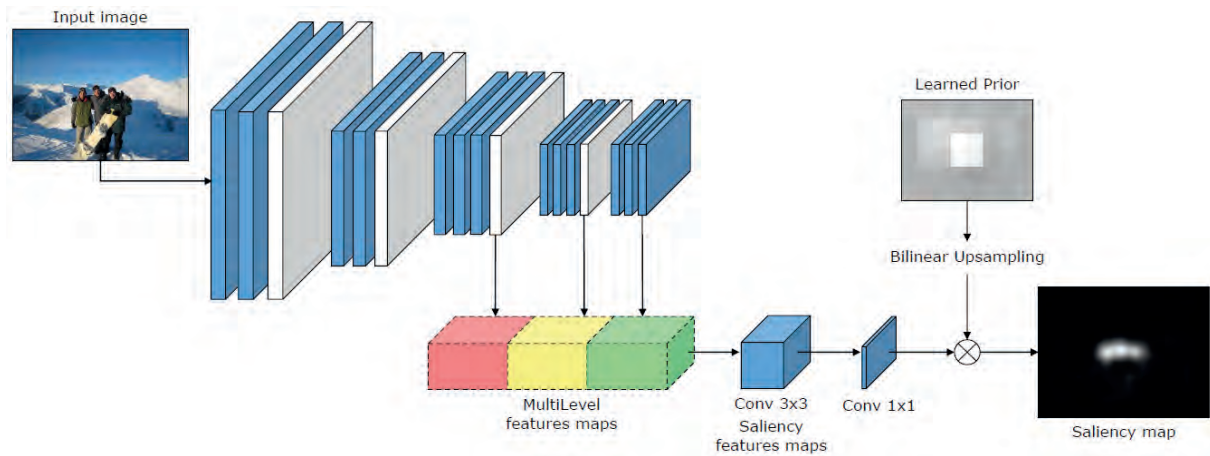
■ **Fig. 2.** The DeepGaze I architecture. The image is first downsampled and preprocessed with the Krizhevsky network. The responses of the layers are scaled up to the size of the largest network layer and normalized to have unit standard deviation. This list of maps is linearly combined and blurred with a Gaussian kernel. The model output is fed through a softmax rectification, yielding 2D probability distribution, which is used to compensate for the central fixation bias [58]



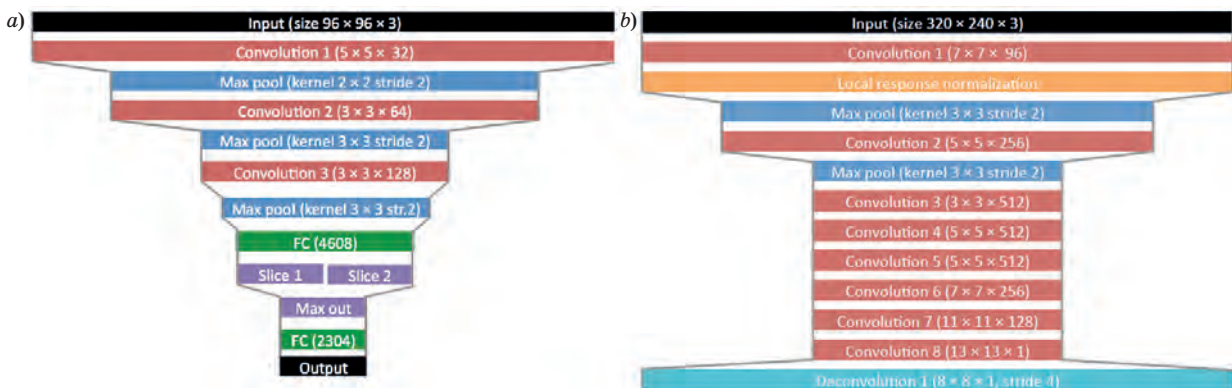
■ **Fig. 3.** The Mr-CNN architecture. The original image is rescaled to three scales (150 × 150, 250 × 250, and 400 × 400). The extracted 42 × 42 sized image regions with the same center locations are inputs to Mr-CNN. During testing, 50 × 50 sized samples are used to estimate their saliency values in order to reduce computation cost. The obtained down-sampled saliency map is rescaled to the original size [60]



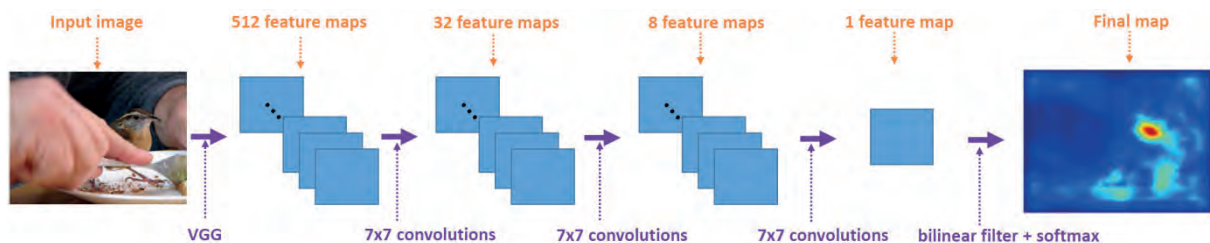
■ **Fig. 4.** The SALICON architecture consists of deep neural network applied at two different image scales. The last convolutional layer in the pretrained network feeds a randomly initialized convolutional layer with one filter that detects the salient regions. The parameters are learnt end-to-end with back-propagation [61]



■ **Fig. 5.** The ML-Net architecture computes the low and high level features from the input image. Extracted features maps are then fed to an Encoding network, which learns a feature weighting function to generate saliency-specific feature maps. A prior image is also learned and applied to the predicted saliency map [62]

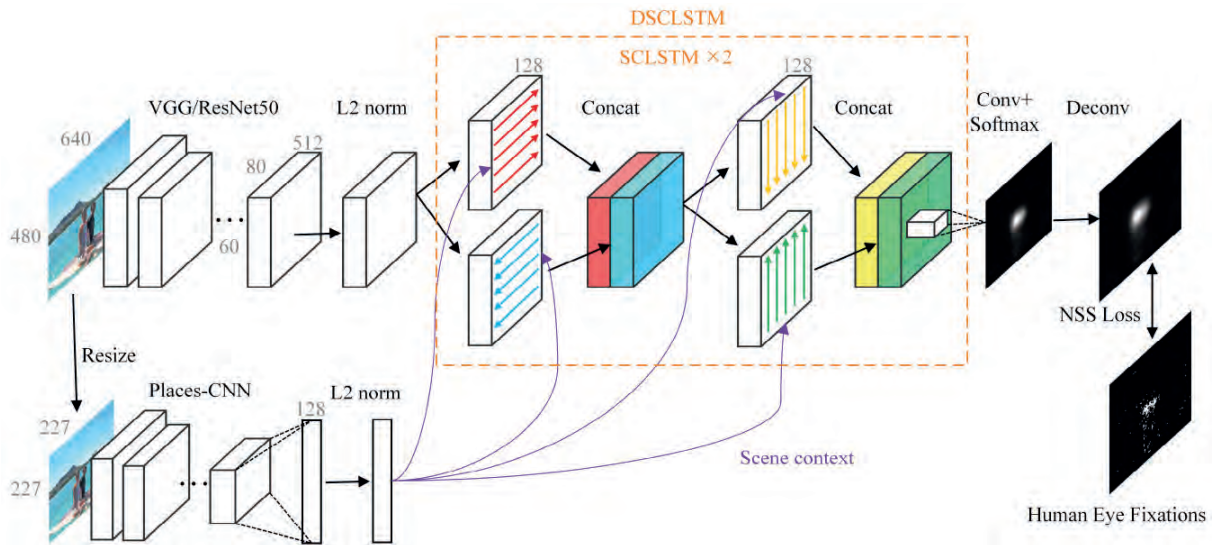


■ **Fig. 6.** The JuntingNet and SalNet architectures: *a* — JuntingNet has to a total of 64.4 million free parameters and uses lesser number of convolutional layers regarding AlexNet and VGG-16. The input images are resized to  $96 \times 96$ . The three max pooling layers reduce the initial  $96 \times 96$  feature maps down to  $10 \times 10$  by the last of the three pooling layers; *b* — SalNet is composed of 10 weight layers and a total of 25.8 million parameters. The architecture of the first three weight layers is compatible with the VGG layers [63]

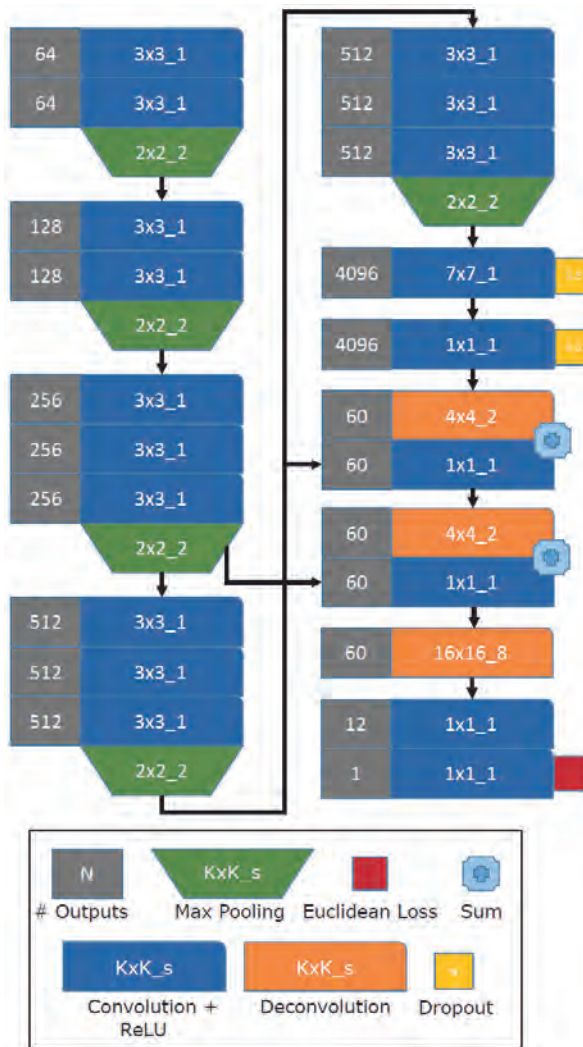


■ **Fig. 7.** The PDP CNN architecture. The input image is introduced into a CNN similar to VGGNet. Additional convolutional layers are then applied, resulting in a single response map which is upsampled and softmax-normalized to produce a final saliency map [64]

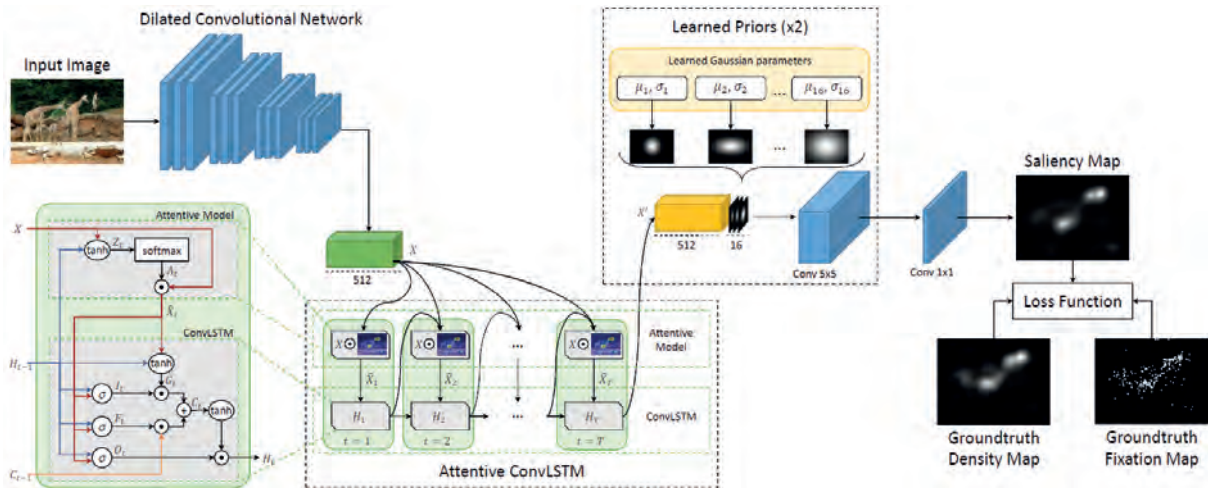




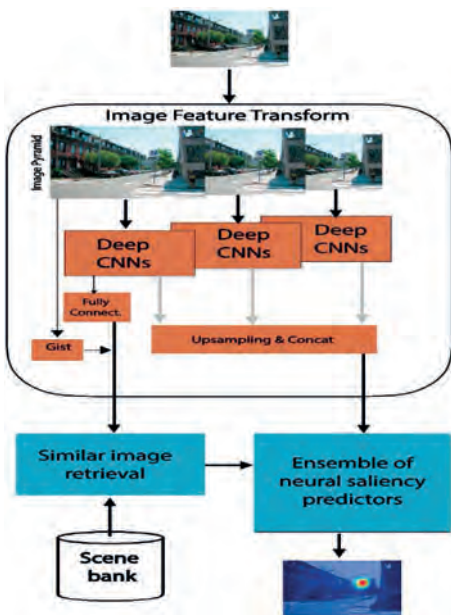
■ **Fig. 8.** The DSCLRCN architecture. First, local feature map and scene feature are extracted using pretrained CNNs. Then, a DSCLSTM model is adopted to simultaneously incorporate global context and scene context. Finally, saliency map is generated and upsampled [65]



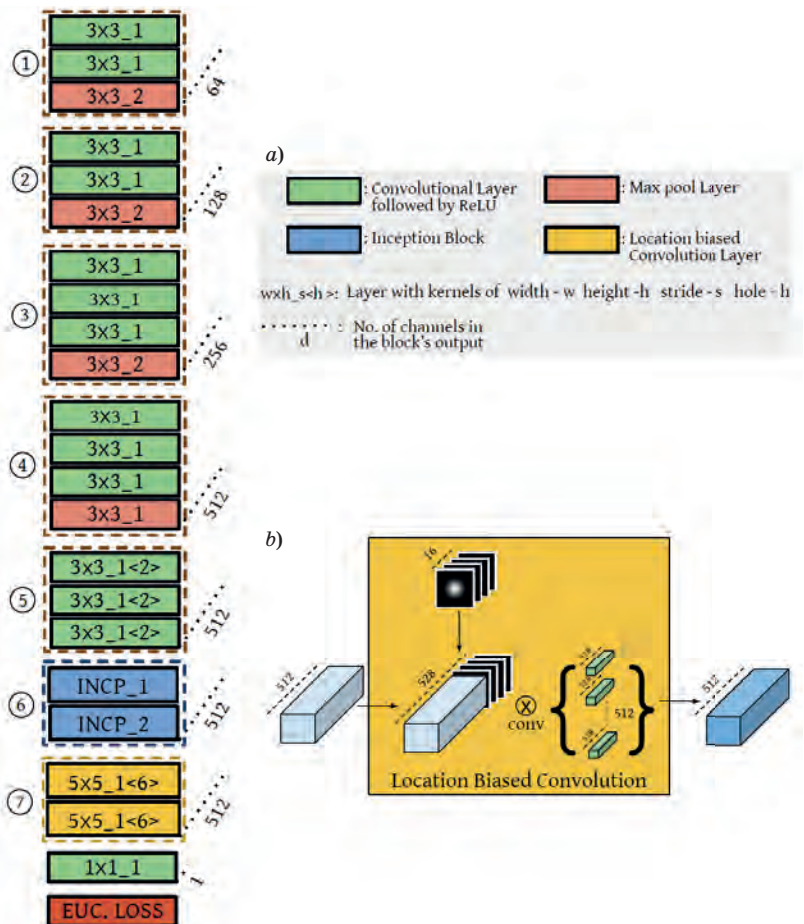
■ **Fig. 9.** The FUCOS architecture:  $K$  corresponds to kernel dimensions;  $s$  — to stride;  $N$  — to number of outputs; % — to the percent of dropout units [66]



■ Fig. 10. The SAM Net architecture. After computing a set of feature maps on the input image through architecture called Dilated Convolutional Network, an Attentive Convolutional LSTM sequentially enhances saliency features thanks to an attentive recurrent mechanism. Predictions are then combined with multiple learned priors to model the tendency of humans to fix the center region of the image [68]

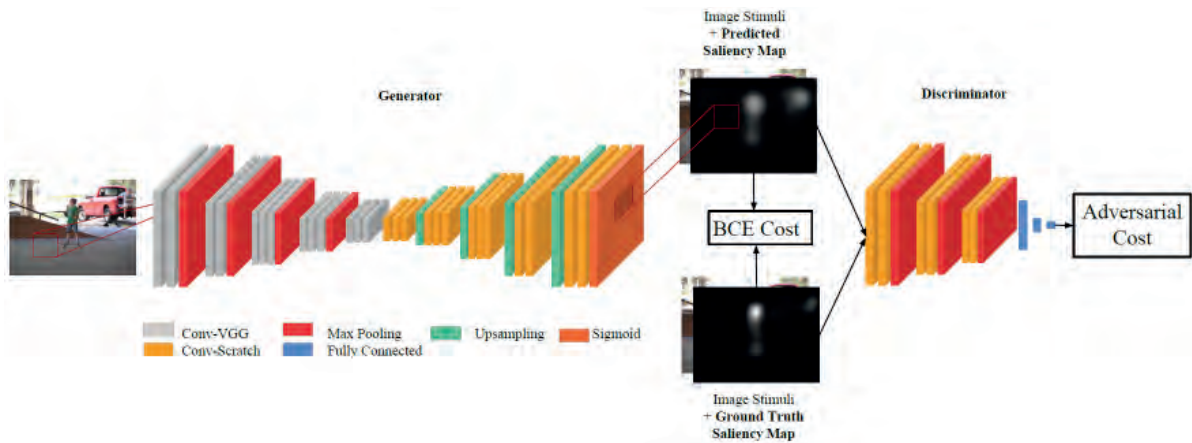


■ Fig. 11. The ELM architecture. The image feature transform performs produces a pool of features. The similar image retrieval finds the top most similar images, stored in the scene bank. Then Ensemble of neural saliency predictors forms a prediction saliency map [70]

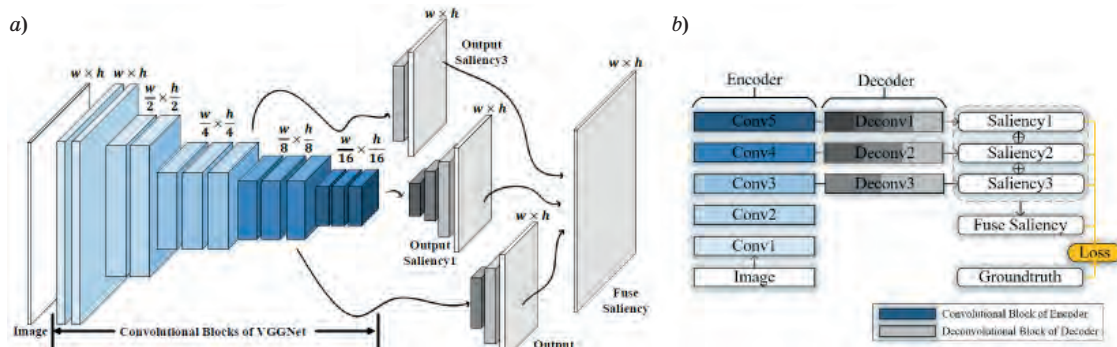


■ Fig. 12. The DeepFix architecture: a — starting from the first convolutional block 1, the number of channels in the outputs of successive blocks gradually increase as 64, 128, 256, 512 that enables the net to progressively learn richer semantic representations of the input image; b — additional location biased convolution filter for learning location dependent patterns in data (centre-bias present in the eye-fixations) [71]

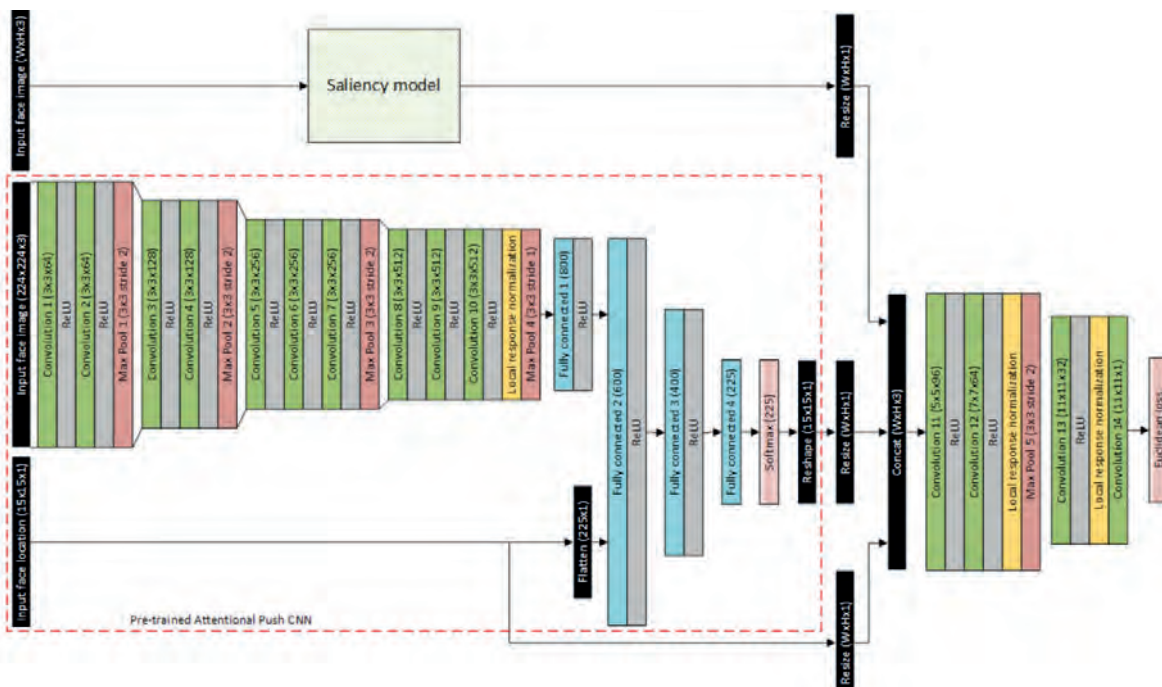




■ Fig. 13. The SalGAN architecture detects a salient object as real or fake. Generator network produces the predicted saliency map, which with ground truth saliency map is feed into the discriminator network [72]

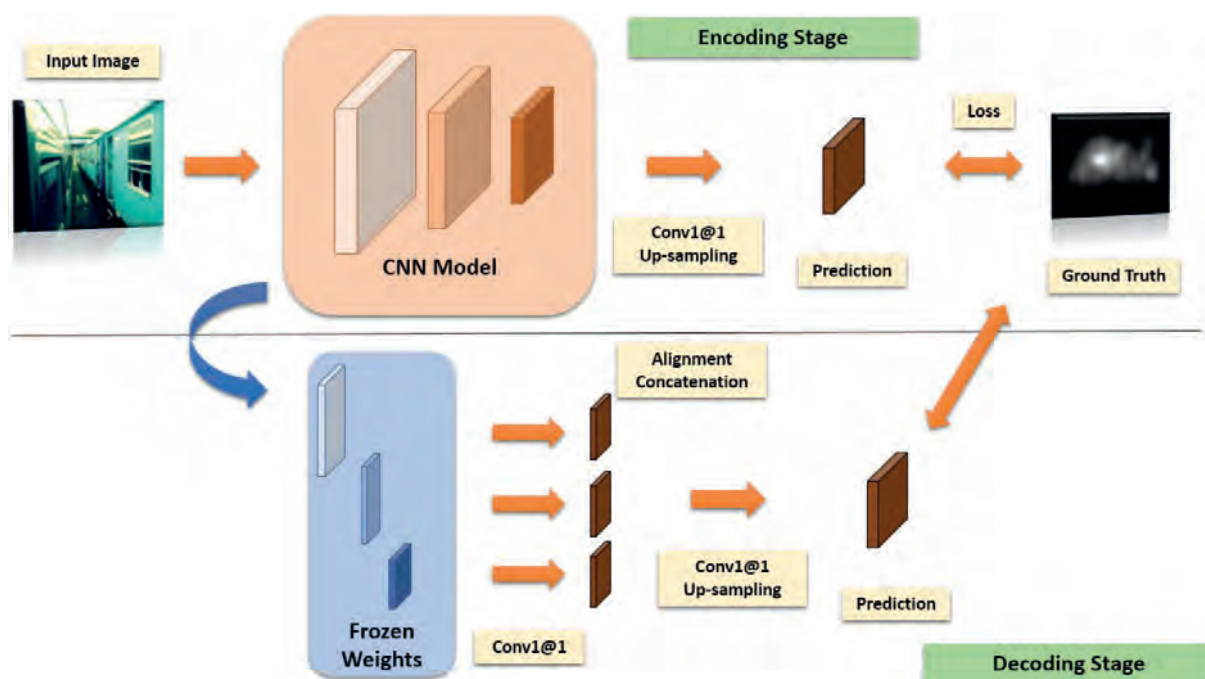


■ Fig. 14. The DVA architecture: *a* — attention model learns to combine multi-level saliency information from different layers with various receptive field sizes; *b* — deep visual attention network adopts the encoder-decoder architecture. The supervision is directly fed into hidden layers, encouraging the model to learn robust features and generate multi-scale saliency estimates [74]



■ Fig. 15. The Attention push architecture (augmented saliency network). Data conditioning layers are depicted in black. The attentional push network is indicated by the red dashed line [75]





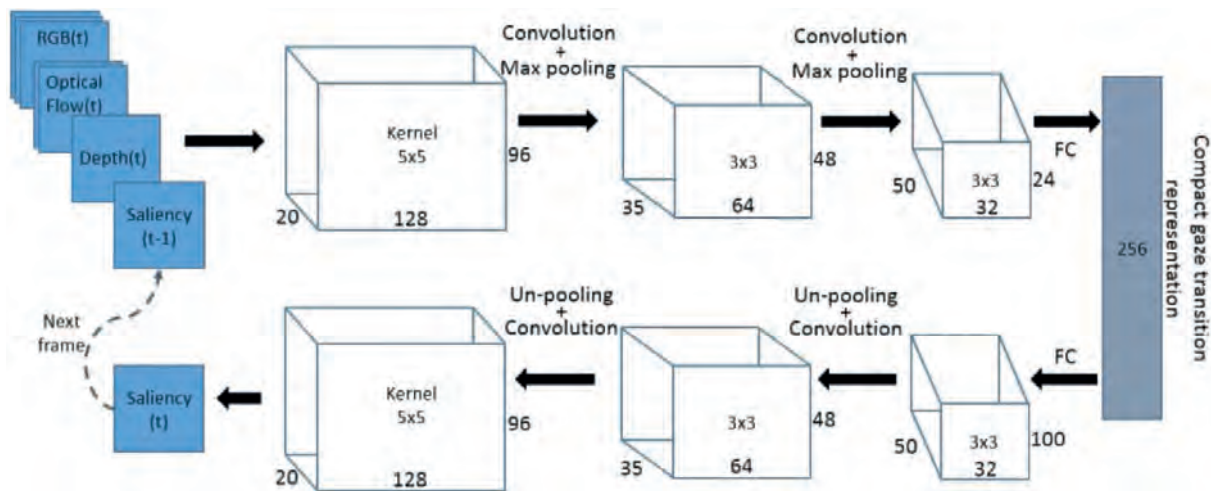
■ **Fig. 16.** The EML-NET architecture. During training a decoder (in order to combine the multi-level features), the weights of EML-NET model are frozen so that the size of the models can be halved due to no gradients being required [76]

■ **Table 2.** Dynamic CNN-based saliency models

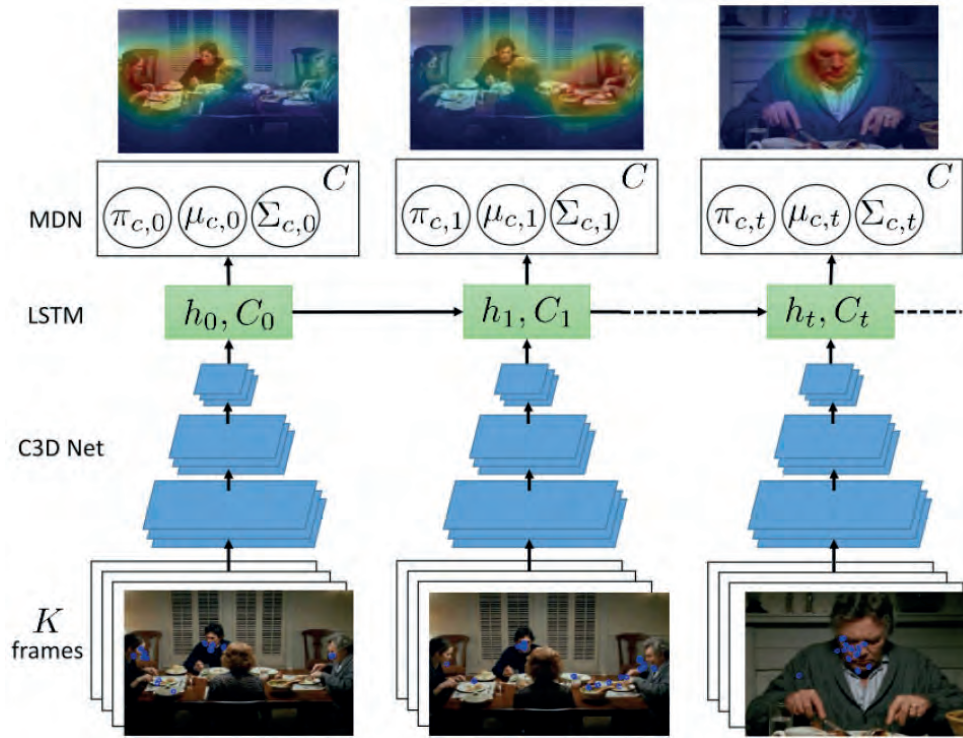
Caption	Description
RGBD generative CNN, 2016	RGBD generative CNN predicts a saliency map for a frame, given the fixation map of the previous frame [77]. Two principals were proposed for saliency detection. First, the gaze slightly varies between frames, and when it does change significantly, it is constrained to a limited number of foci of attention. Second, an actor usually follows the action by shifting their gaze to a new interesting location. Due to these common principals, a sparse candidate set of salient locations are considered and transitions between them over time are predicted (Fig. 17). This means that depth perception has an impact on human attention
RMDN (Recurrent Mixture Density Network), 2016	RMDN for saliency prediction has three levels [78]. The input clip of 16 frames is fed to a 3D CNN, whose output becomes the input to a LSTM. Then a linear layer projects the LSTM representation to a Gaussian mixture model, which describes the saliency map (Fig. 18). Finally, C3D model was connected to the recurrent network in order to perform a temporal aggregation of past clip-level signals. In a similar manner, Liu et al. [79] applied LSTMs to predict video saliency maps, relying on both short- and long-term memory of attention deployment
Deep CNN, 2016	Deep CNN ensures the learning of salient areas in order to predict the saliency maps in videos [80]. First, extraction of salient and non-salient patches in video frames is implemented. Then on the basis of these classifications, a visual fixation map is predicted (Fig. 19)
OM-CNN (Object-to-Motion CNN), 2017	OM-CNN (Fig. 20) predicts saliency of intra-frame, which integrates both objectness and object motion in a uniform deep structure [81]. The objectness and object motion information are used to predict the intraframe saliency of videos. Inter-frame saliency is computed by means of a structure-sensitive [82]

■ Table 2 (completed)

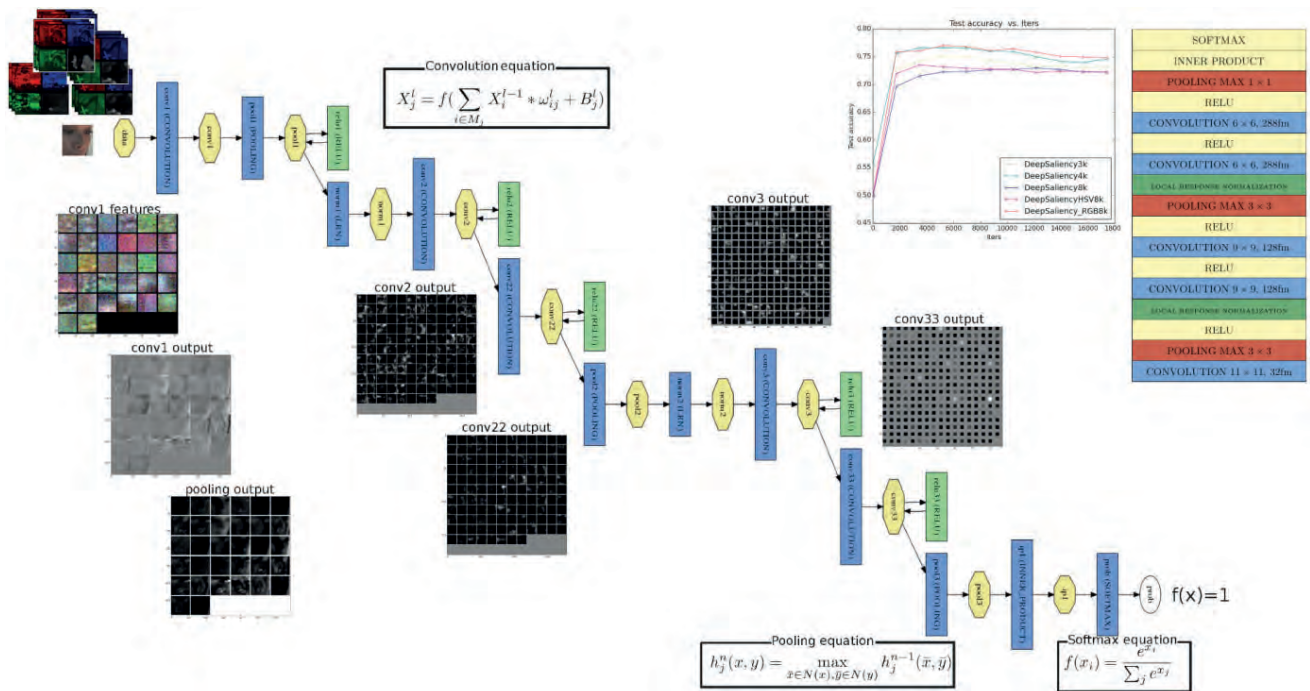
Caption	Description
ConvLSTM (Convolutional Long Short-Term Memory network), 2018	Multi-stream ConvLSTM augments the state-of-the-art static saliency models with dynamic attentional push (shared attention) [82]. This network contains a saliency pathway and three push pathways (Fig. 21). The multi-pathway structure is followed by an augmenting ConvNet by minimizing the relative entropy between the augmented saliency and viewers fixation patterns on videos
The SSNet (Spatial Saliency Network), TSNet (Temporal Saliency Network), STSMaxNet (Spatio-Temporal Max Fusion Network), and STSConvNet (Spatio-Temporal Convolution Fusion Network) architectures, 2018	This is a family of CNNs proposed for predicting saliency from RGB dynamic scenes [83]. SSNet model employs a static saliency model for dynamic saliency prediction by simply ignoring temporal information and using the input video frame alone (Fig. 22). TSNet model is a single stream network contributing a temporal information to the saliency prediction. STSMaxNet model accepts both video frame and the corresponding optical flow image as the inputs and merges together the spatial and temporal single stream networks via an element-wise max fusion. STSConvNet model integrates the spatial and temporal streams by applying a convolutional fusion. The last two models apply two-stream CNN architecture for a video saliency prediction
ACL (Attentive CNN-LSTM), 2018	Attentive CNN-LSTM architecture is based on a video saliency model with a supervised attention mechanism [84]. CNN layers are utilized for extracting the static features within the input frames, while convolutional LSTM is utilized for sequential fixation prediction over successive frames (Fig. 23). An attention module is applied to enhance spatially informative features. The spatial and temporal factors of dynamic attention allow ConvLSTM to learn the temporal saliency representations efficiently
SG-FCN (Spatial Gained Fully Convolutional Network), 2018	SG-FCN is a robust deep model that utilizes the memory and motion information to capture the salient points across the successive frames [85]. The inputs of SGF model are the current frame, the saliency maps in previous frame, and the moving object boundary map, while the output is a spatiotemporal prediction that ensures the time and space consistency (Fig. 24)



■ Fig. 17. The RGBD generated CNN architecture supports a saliency reconstruction using a generative CNN. The input is the saliency calculated for the previous frame and additional information from the current frame. Then the data is encoded, and only the saliency of the current frame is reconstructed [77]

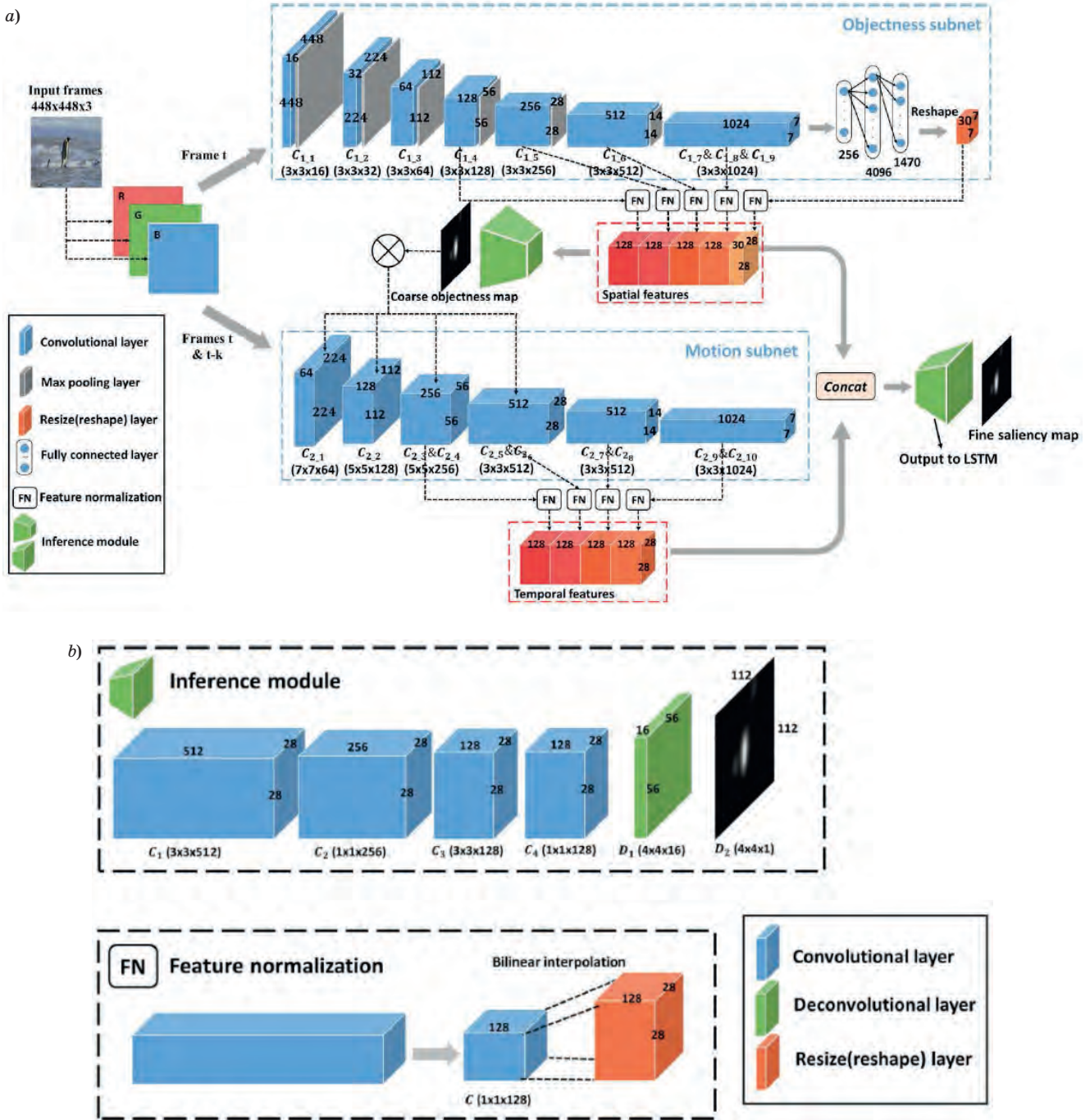


■ Fig. 18. The RMDN architecture. The input clip of  $K$  frames is fed into 3D CNN, whose output becomes the input of LSTM network. Finally, a linear layer projects the LSTM representation to the parameters of a Gaussian mixture model, which describes the saliency map [78]



■ Fig. 19. The Deep CNN architecture includes five layers of convolution, three layers of pooling, five layers of rectified linear units, two normalization layers, and one layer of Inner product followed by a loss layer [80]

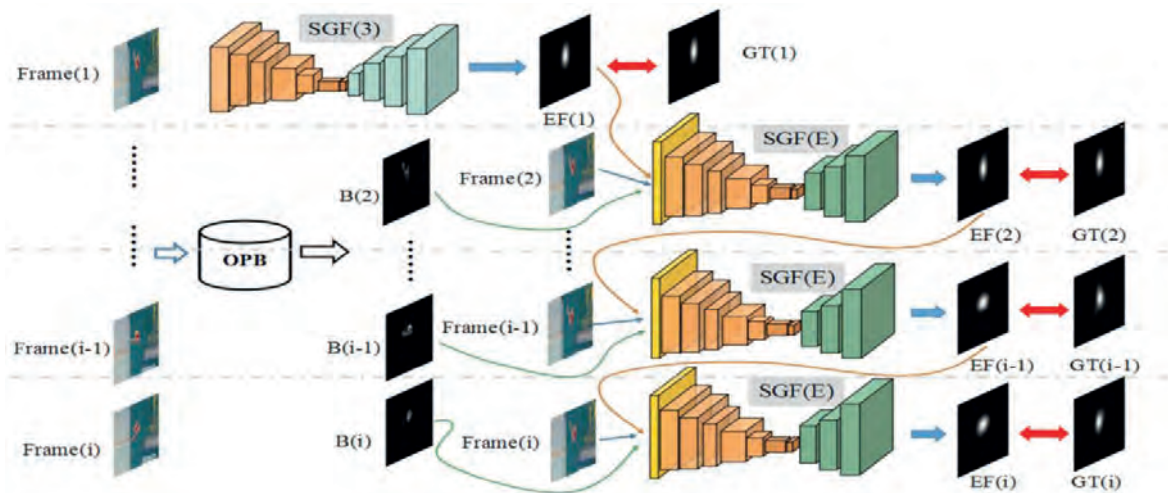




■ Fig. 20. The OM-CNN architecture for predicting a video saliency of intra-frame: a — the overall architecture of OM-CNN; b — the details for sub-modules of inference module and feature normalization [81]







■ **Fig. 24.** The SG-FCN architecture: SGF(3) is used to handle the first frame because neither motion nor temporal information is available. From the next frame onward, the SGF(E) model takes EF(1) from SGF(3), a fast moving object edge map B(2) from the OPB algorithm, and the current frame(2) as the input, and directly outputs the spatiotemporal prediction EF(2) [85]

Thus, the CNN approach for salient object detection in images had been developed intensively since 2014, while a deep learning for salient event detection in videos was activated since 2016. At present, this is a mainstream of investigations in this scope.

**Event-based saliency detection methods**

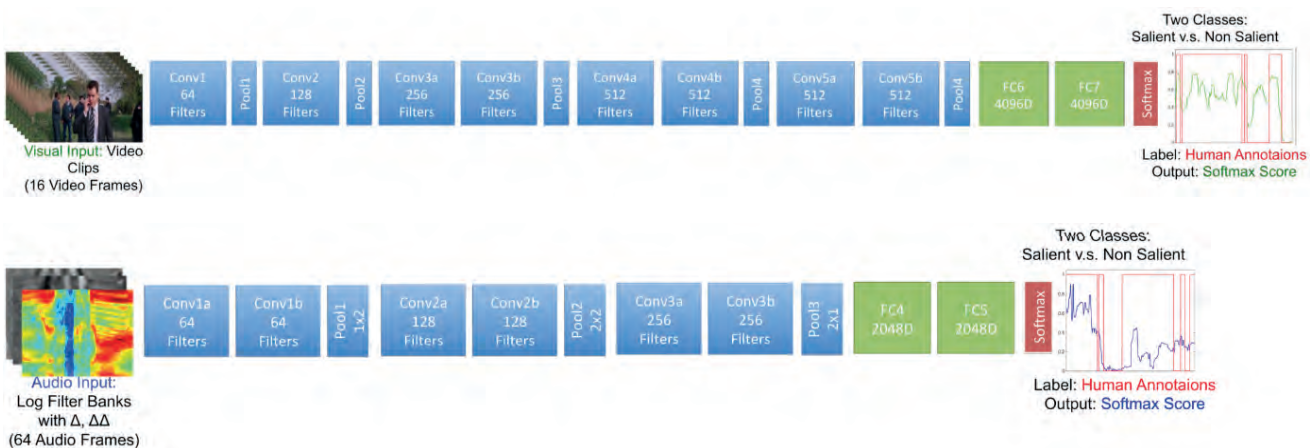
Event detection for the task of video summarization and abstraction appeared after millennium and was oriented on key-frames' extraction, especially in the most descriptive and informative video shorts. The traditional approach is to find the hand-crafted features, which ought to be generic, compact, efficient to compute, and simple to implement [86]. Nowadays, CNN approach prevails in the event-based saliency detection also.

The CNN approaches for video content analysis are classified into two main categories: the learn-

ing local spatiotemporal filters (so-called C3D method) and the incorporating optical flow using two-stream CNNs.

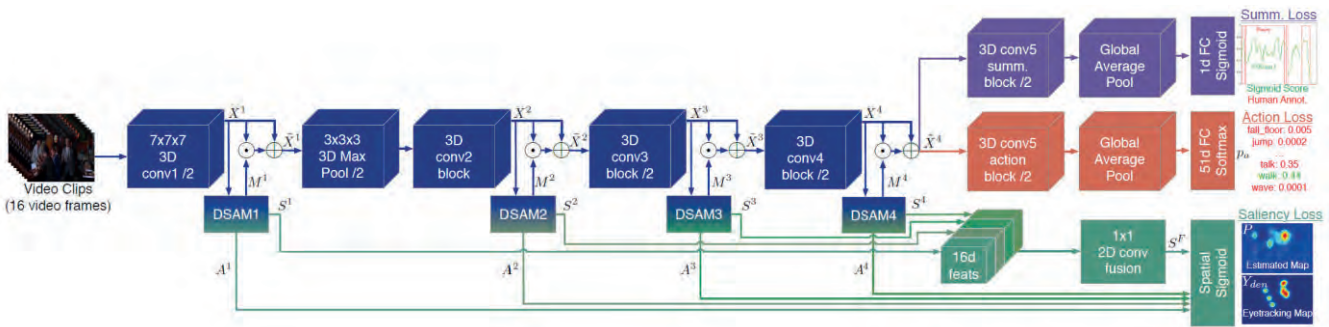
In [37], C3D network was employed for video stream, while for the audio stream 2D CNN similar to VGG network was applied for a salient event detection in movies. The architectures of these CNNs are depicted in Fig. 25.

The 3D CNN can model successfully the temporal information due to the convolutions and pooling operations are applied inside spatio-temporal cuboids, while the classic CNNs work only in the spatial domain. The dimension of the feature maps in each convolutional layer of C3D is  $n \times t \times h \times w$ , where  $n$  is the number of filters in each layer;  $t$  is the number of video frames;  $w$  and  $h$  are the width and height of each frame. Videos are split into non-overlapping 16-frame RGB clips, which are used as in-



■ **Fig. 25.** CNN architectures: a — saliency detection using C3D; b — audio saliency detection using 2D CNN [37]





■ **Fig. 26.** SUSiNet architecture. The multi-task spatio-temporal network is based on the ResNet architecture and has three different branches associated with the different spatio-temporal tasks [87]

put to the networks. The proposed C3D network has eight convolutional layers (with kernels  $3 \times 3 \times 3$  and the stride of all these kernels are 1 in both spatial and temporal domain), five max-pooling layers (with kernels  $2 \times 2 \times 2$  except for the first one), and two fully connected layers, followed by a softmax output layer.

For the audio stream, 2D CNN was employed for acoustic event detection. The raw audio signal was represented in 2D time-frequency domain and preserve locality in both axes. Note that conventional mel-frequency cepstral coefficients cannot maintain locality to the frequency axis due to the discrete cosine transform projection.

Another example is a multi-task spatio-temporal network called SUSiNet (See, Understand and Summarize it Network) that can execute the saliency estimation, visual concept understanding, and video summarization [87]. The SUSiNet, which architecture is depicted in Fig. 26, is a single network that is jointly end-to-end trained for all three mentioned above tasks.

Implementation of SUSiNet is very similar to 3D ResNet-50 architecture [88], which has showed competitive performance and computational budget for the task of action recognition. As starting point, the weights from the pretrained model in the Kinetics 400 database are used.

The input samples in the network consist of 16-frames RGB video clips spatially resized at  $112 \times 112$  pixels. Also data augmentation for random generation of training samples is utilized. For saliency estimation, spatial transformations to the 16 frames of the video clip had been done. The eye-tracking based saliency maps is extracted from the median frame, which has been considered as the ground truth map of the whole clip.

### Saliency datasets

Validation of saliency algorithms has been done using the public datasets. Visual material

from these datasets is marked by different ways. Traditional saliency datasets are annotated using information about eye movements of humans watching the images or videos. Recent datasets follow two trends: increasing visual material and introducing new saliency measures based on contextual annotations (e.g. image categories). One of the last trends for large scale data annotation is the application of crowdsourcing schemes, such as gaze tracking using webcams [89] or mouse movements [90, 91] instead of the lab-based eye trackers.

Let us consider the recent image and video datasets.

### Image datasets

The work for creation of salient object detection in the images was initialized since 2012 and nowadays continues to evolve new versions of public datasets.

**MIT Saliency Benchmark dataset (MIT300)** includes 300 natural images [92, 93]. This dataset was the first dataset with held-out human eye movements using eyetracker ETL 400 ISCAN (240 Hz). In MIT300 dataset, the eye fixations of 39 observers are available per an image, more than in other datasets of similar size. Eye movements were collected under different conditions, such as free viewing, visual search, and so on. The robustness of the data depends on the eye tracking setup (participant distance to the eye tracker, calibration error, and image size) and number of eye fixations collected.

**CAT2000** contains two sets of images: train and test images [94]. The train images (100 from each category) and fixations of 18 observers are shared but six observers are held-out. Test images are available but fixations of all 24 observers are held out. The eyetracker: EyeLink1000 (1000 Hz) was employed for CAT2000 dataset collection.

**SALICON** is the largest crowd-sourced saliency dataset [95]. The images were imported from Microsoft COCO dataset and contain MS COCO's pixelwise semantic annotations. The SALICON con-

tains 10 000 training images, 5000 validation images, and 5000 test images (Fig. 27). The mouse-contingent saliency was stored using Amazon mechanical turk. Minor discrepancies between the eye movements and mouse movements led to that SALICON dataset is used for rough training, and then the deep saliency models are fine tuned on MIT1000 or CAT2000 datasets, which contain information of predicting fixations.

**MSRA10K** is formally named as **THUS10000** [96]. It contains 195 MB of images and binary masks. Pixel accurate salient object labeling was implemented for 10 000 images from MSRA dataset. **MSRA-B** dataset involves 5000 images from

hundreds of different categories. Because of its diversity and large quantity, MSRA-B has been one of the most widely used datasets in salient object detection literature. Most images in this dataset have only one salient object, and, hence, this dataset becomes a standard dataset for evaluating the capability of processing simple scenes. The ground truth of MSRA-B is represented in a form of the labeled rectangles, which were drawn by nine participants. Thus, the objects are segmented into rectangles in order to obtain the binary masks as the pixelwise annotations.

**ECSSD** is an extension of Complex Scene Saliency Dataset (CSSD) [97]. The matter is that the



■ Fig. 27. Samples of salient detection images from SALICON dataset [95]



images from MSRA-B dataset have a primarily simple and smooth background. In the contradiction, ECSSD dataset was created using structurally complex images with their ground truth binary masks, which were made by five participants. ECSSD dataset contains 1000 semantically meaningful but structurally complex natural images. Samples are depicted in Fig. 28.

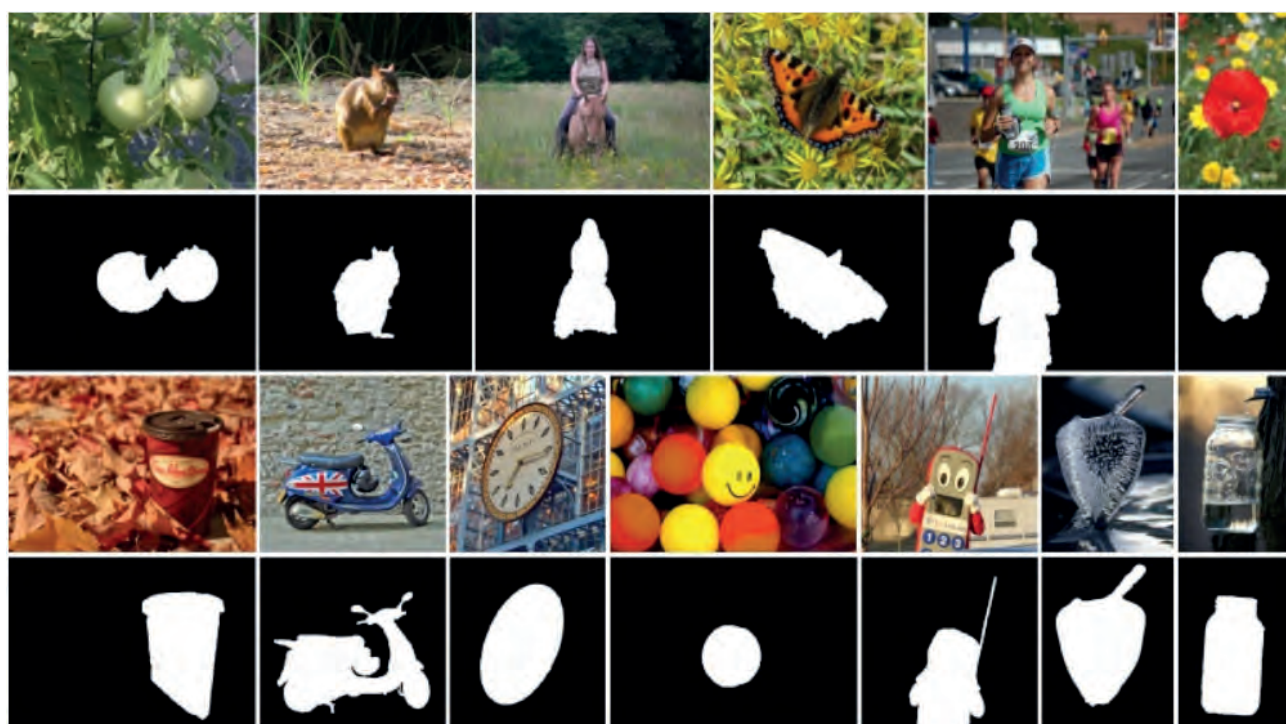
HKU-IS (University of Hong Kong ) is a large-scale dataset that contains more than 4400 challenging images with the salient objects annotated as binary masks, where 50.34% images have the multiple salient objects, and 21% have the salient regions touching the boundary. Most of images in this dataset have low contrast with more than one salient object [98]. In order to remedy the weakness of dataset images containing one salient object and 98% of the pixels in the border belonging to the background, the HKU-IS dataset provides a more challenging dataset. The HKU-IS dataset is divided into three parts: 2500 images for training, 500 images for validation and the remaining 1447 images for testing.

PASCAL has a goal to recognize objects from a number of visual object classes in realistic scenes [99]. The 20 object classes images categorized into “Person” (person), “Animal” (bird, cat, cow, dog, horse, sheep), “Vehicle” (aeroplane, bicycle, boat, bus, car, motorbike, train), and “Indoor” (bottle, chair, dining table, potted plant, sofa, tv/monitor). The main purposes are the classification, detection,

and segmentation with additional tasks, such as the person layout, action classification, and ImageNet large scale recognition. The train/validation data has 10 103 images containing 23 374 annotated objects (regions of interests) and 4203 segmentations. The saliency detection function does not support directly. However, some images can be chosen as a saliency detection subset [100].

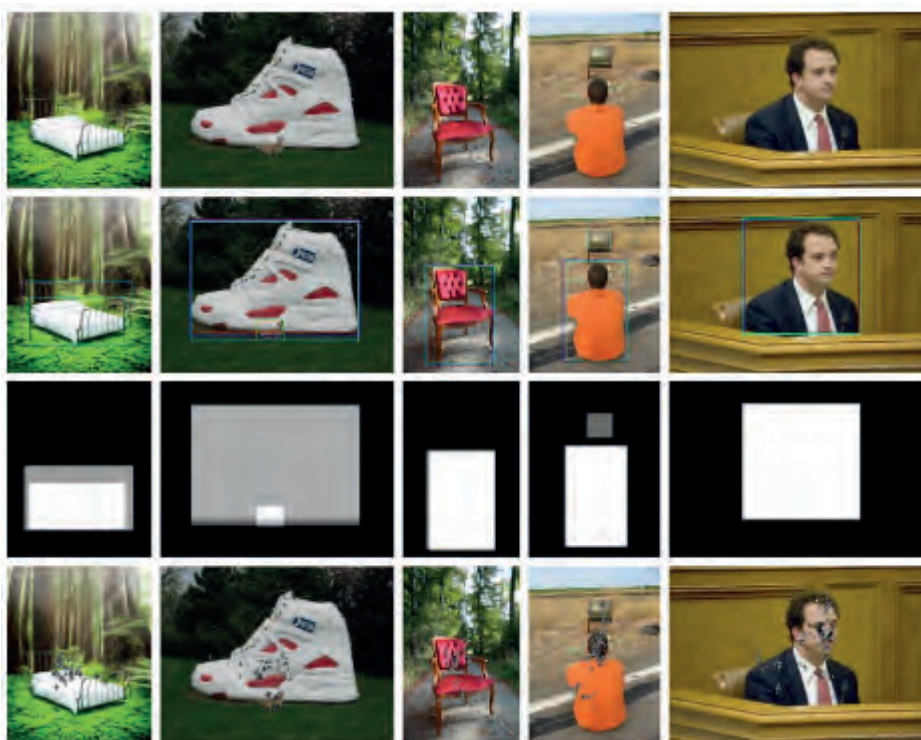
SOD (Salient Object Detection) is a collection of salient object boundaries based on Berkeley Segmentation Dataset (BSD) [101]. It contains 300 images, most of which possess the multiple salient objects. All of these datasets consist of the ground truth human annotations. Seven objects are asked to choose the salient object(s) in each image used in BSD. Each subject is shown randomly as a subset of the Berkeley segmentation dataset with boundaries overlapped on the corresponding images. Participant can then choose which regions or segments correspond to salient objects by clicking on them.

DUT-OMRON dataset includes the nature images for the research of more applicable and robust methods in both salient object detection and eye fixation prediction [102]. The DUT-OMRON dataset consists of 5168 high quality images manually selected from more than 140,000 images. The images of DUT-OMRON database have one or more salient objects and a relatively complex background. The pixel-wise ground truth, bounding box ground truth, and eye-fixation ground truth in large scaled images were constructed (Fig. 29).



■ Fig. 28. Samples of original and binary ground-truth masked images from ECSSD [97]





■ *Fig. 29.* Samples from DUT-OMRON dataset. From top to bottom: original image; bounding box ground truth, pixel-wise ground truth; average of the five binary masks; and eye-fixation ground truth [102]

Saliency video datasets are considered in the following Section.

### Video datasets

A spectrum of saliency video datasets is consistency extended. Often saliency video datasets are built using public video datasets that were constructed for other purposes.

**DAVIS** dataset is a special dataset containing a ground-truth of human attention in RGBD video sequences [103]. The videos from DAVIS dataset represent the scenarios, where a depth-aware saliency is beneficial [77]. The RGBD videos were acquired by built in the phone/tablet/laptop depth/stereo cameras or 3D sensors, such as Kinect or LiDAR. Video sequences contain the static and dynamic indoors and outdoors scenes, such as video conference, surveillance, tracking, and obstacle avoidance. Nearly 54 videos with varying durations ranging from 25 to 200 s were chosen from public datasets. The videos were converted to a 30 frame-rate, resulting in approximately 100K frames across all videos. Gazeport GP3 Eye Tracker with the Gazeport Analysis Standard software was applied for the eye movements' monitoring of 91 participants.

**LEDOV** (Large-scale Eye-tracking Database of Videos) dataset involves 538 videos, in total 179 336 frames and 6431 s, equally divided into six

non-overlapping groups with similar numbers of videos in content (i. e., human, animal and man-made object) [104]. Videos were collected according to the following four criteria [81]: the diverse video content (daily blogs, documentaries, movies, sport casts, TV shows, etc.) including at least one object, high quality video (high quality of videos with at least 720 p resolution and 24 Hz frame rate), and the stable shots (212 videos were obtained with stable camera motion and 316 videos were received without any camera motion). For monitoring the binocular eye movements, an eye tracker Tobii TX300 was used in carefully conducted experiments.

**DIEM** (visualizing Dynamic Images and Eye Movements with a tool called Computational Algorithms for Representation and Processing of Eye-movements (CARPE)) dataset contains 85 high-definition natural videos including movie trailers, advertisements, and so on. Each video sequence has the eye fixation data collected from approximately 50 different human subjects. [105]. The DIEM project is an investigation of how people look and see. The applied CARPE technique allows one to begin visualizing eye-movement data in a number of ways. The project includes a number of different visualization options: the low level visual features that process the input video to show flicker or edges, the heat-maps that show where people are looking, the clustered heat-maps that use pattern recognition to define the best model of fixations for

each frame, and the peek-through, which uses the heat-map information to only show parts of the video where people are looking.

**UCFSports** dataset is collected from broadcast television channels, such as the BBC and ESPN, and a wide range of websites, which consists of a set of sport actions [106]. The UCFSports dataset contains 150 video sequences with  $720 \times 480$  resolution and cover a range of scene and viewpoints. The dataset includes 10 actions, such as diving (14 videos), golf swing (18 videos), kicking (20 videos), lifting (6 videos), riding horse (12 videos), running (13 videos), skateboarding (12 videos), swing-bench (20 videos), swing-side (13 videos), and walking (22 videos), for recognition purpose. Recently, additional human gaze annotations were collected in [107]. These fixations were collected over 16 human subjects under the task specific and task independent free viewing conditions.

**COGNIMUSE** is a recent multi-modal video database annotated with the saliency, events, semantics, and emotion with application to summarization [108]. The COGNIMUSE database includes data collection, data conversion, and annotation in different phases [109]. The dataset consists of half-hour continuous segments (with the final shot/scene included) from seven Hollywood movies (three and a half hours in total), five travel documentaries (20 min long each), and a full-length annotated movie, namely “Gone with the Wind” (the first part with a total duration 104 min). All database videos have been annotated with the sensory and semantic saliency, audio-visual events and emotion. The structure of COGNIMUSE project is depicted in Fig. 30.

First, the movie clips are manually segmented (cut or fade), and scenes defined as a complete, con-

tinuous chain of actions (shots). The average shot and scene duration for the movies are 3.5 s–2.3 min, while for the travel documentaries, the respective duration is 3–40 s. Second, the sensory and semantic saliency content annotation (segments that captured the viewer’s attention with respect to the following layers) is performed.

Let us hope that the saliency image and video datasets will be developed in future providing more complex and diverse wildlife visual content like the COGNIMUSE database.

### Evaluation metrics

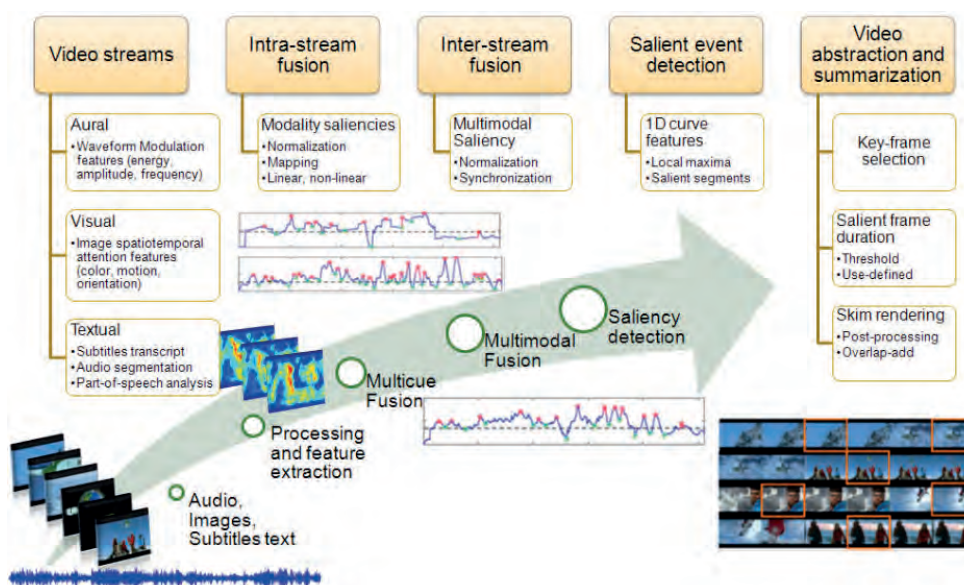
Saliency models are usually evaluated by comparing their predicting maps to the human fixation maps. Generally, the evaluation metrics fall into two categories: location-based (computing some statistics at fixated locations) and distribution-based (comparing smoothed prediction and fixation maps).

#### Location-based metrics

**Receiver Operating Characteristic ROC.** The ROC is a binary classification measure of the intersected area between the predicted saliency and human fixations. At various thresholds, the trade-off between True Positive Rates (TPR) and False Positive Rates (FPR) is plotted:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}, \quad FPR = \frac{FP}{FP + TN}, \quad (1)$$

where  $TP$  and  $FP$  are the truth positive and truth negative, respectively;  $TN$  and  $FN$  are the truth negative and false negative, respectively.



■ Fig. 30. Structure of COGNIMUSE project [108]

The ROCs are computed by two ways. The first way is to measure the intersection between a saliency map and a ground-truth distribution of human fixation. The second way uses a uniform random sample of image pixels as negatives and the saliency map values are defined above threshold at these pixels as false positives.

**Area Under ROC Curve (AUC).** The AUC is an integration of the spatial area under the ROC curve such that the random guessing score is 0.5. A score above 0.5 indicates that predictions are above random guessing. The AUC curves have modifications, such as AUC-Judd, AUC-Borji, and Shuffled AUC (sAUC) [110].

**Precision-recall and F-measure.** The estimates Precision and Recall are defined according to equation

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}; \quad \text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (2)$$

F-measure determines a successfulness of salient object detection respect to the chosen binary threshold provided by equation

$$F(T) = \frac{(1 + \beta^2) \text{Precision}(T) \times \text{Recall}(T)}{\beta^2 \times \text{Precision}(T) + \text{Recall}(T)}, \quad (3)$$

where  $\beta$  is an empirical coefficient.

**Normalized Scanpath Saliency (NSS).** The NSS is a measure of the normalized saliency at fixations. Unlike in the AUC, the absolute saliency values are part of the normalization calculation. Thus, NSS is sensitive to false positives, relative differences in saliency across the image, and general monotonic transformations. However, due to the mean saliency value subtraction during a computation, NSS is invariant to the linear transformations like the contrast offsets (given a saliency map  $P$  and a binary map of fixation locations  $Q^B$ ):

$$NSS(P, Q^B) = \frac{1}{N} \sum_i \bar{P} \times Q_i^B, \quad (4)$$

where

$$N = \sum_i Q_i^B \quad \text{and} \quad \bar{P} = \frac{P - \mu(P)}{\sigma(P)},$$

where  $N$  is the total number of fixated pixels.

Positive NSS indicates correspondence between the maps above chance (chance is at 0) and negative NSS indicates the anti-correspondence. For instance, a unity score corresponds to fixations falling on portions of the saliency map with a saliency value one standard deviation above average.

**Information Gain (IG).** The IG was proposed in [111] as an information-theoretic metric that measures saliency model performance beyond systematic

ic bias (e. g., a center prior baseline). Given a binary map of fixations  $Q^B$ , a saliency map  $P$ , and a baseline map  $B$ , information gain is computed as

$$IG(P, Q^B) = \frac{1}{N} \sum_i Q_i^B (\log_2(\varepsilon + P_i) - \log_2(\varepsilon + B_i)), \quad (5)$$

where  $\varepsilon$  is the regularization parameter.

The IG is measured in bits per fixation. This metric measures the average information gain of the saliency map over the center prior baseline at fixated locations (i. e., where  $Q^B = 1$ ). The IG assumes that the input saliency maps are probabilistic, properly regularized, and optimized to include a center prior. As it was mentioned in [111], a score above zero indicates that the saliency map predicts the fixated locations better than the center prior baseline.

### Distributed-based metrics

**Similarity (or histogram) Intersection Metric (SIM).** The SIM measures the similarity between two distributions, viewed as histograms. The earliest version of SIM was interpreted as a metric for color-based and content-based image matching. For saliency task, the SIM is introduced as a simple comparison between pairs of saliency maps. The SIM is computed as the sum of the minimum values at each pixel, after normalizing the input maps (given a saliency map  $P$  and a continuous fixation map  $Q^D$ ):

$$SIM(P, Q^D) = \sum_i \min(P_i, Q_i^D), \quad (6)$$

where

$$\sum_i P_i = \sum_i Q_i^D = 1.$$

The SIM of 1 indicates the distributions are the same, while the SIM of 0 indicates no overlap. Note that the model with the sparser saliency map has a lower histogram intersection with the ground truth map. Also, the SIM is sensitive to the missing values and penalizes predictions that fail to account of all ground truth data. The SIM is good for evaluating the partial matches, when a subset of the saliency map reflects well the ground truth fixation map. As a side-effect, false positives tend to be penalized lesser than false negatives.

**Pearson's Correlation Coefficient (CC).** The CC, also called linear correlation coefficient, specifies the statistical relationship between the predicted saliency map and human ground-truth. The saliency map and human ground-truth are treated as random variables, and the strength and direction between the two variables are measured by CC estimate:



$$CC(P, Q^D) = \frac{\text{cov}(P, Q^D)}{\sigma(P) \times \sigma(Q^D)}, \quad (7)$$

where  $\text{cov}(S, F)$  denotes the covariance between the saliency map  $P$  and fixation map  $Q^D$ . High positive CC values occur at locations, where both the saliency map and ground truth fixation map have values of similar magnitudes. A score of zero indicates that two maps are not correlated.

For visualizing CC each pixel  $i$  has value

$$V_i = \frac{P_i \times Q_i^D}{\sqrt{\sum_j (P_j^2 + (Q_j^D)^2)}}$$

Due to its symmetric computation, the CC cannot distinguish whether differences between the maps are due to false positives or false negatives.

**Kullback — Leibler (KL) distance.** The KL is a general information-theoretic measure of the difference between two probability distributions. In saliency detection, the KL show how the saliency predictions and ground truth fixations are interpreted as distributions. The KL metric takes as input a saliency map  $P$  and a ground truth fixation map  $Q^D$ , and evaluates the loss of information, when  $P$  is used to approximate  $Q^D$ :

$$KL(P, Q^D) = \sum_i Q_i^D \log \left( \varepsilon + \frac{Q_i^D}{\varepsilon + P} \right), \quad (8)$$

where  $\varepsilon$  is a regularization constant. A score of 0 indicates that two maps are identical. A positive score indicates the divergence between two maps.

**Earth Mover's Distance (EMD).** The EMD incorporates spatial distance into evaluation. It was introduced as a spatially robust metric for image matching. The linear time variant of EMD has a view [112]

$$\begin{aligned} \widehat{EMD}(P, Q^D) &= \\ &= \min_{\{f_{ij}\}} \sum_{i,j} f_{ij} d_{ij} + \left| \sum_i P_i - \sum_j Q_j^D \right| \times \max_{i,j} d_{ij}, \end{aligned} \quad (9)$$

under the constrains

$$f_{ij} \geq 0 \quad \sum_j f_{ij} \leq P_i \quad \sum_j f_{ij} \leq Q_j^D \quad \sum_j f_{ij} = \min \left( \sum_i P_i, \sum_j Q_j^D \right),$$

where each  $f_{ij}$  represents the amount of density transported (or the flow) from the  $i$ th supply to the  $j$ th demand and  $d_{ij}$  is the ground distance between bin  $i$  and bin  $j$  in the distribution.

A larger EMD indicates a larger difference between two distributions, while an EMD of 0 indicates that two distributions are the same. Generally, the saliency maps that spread density over a larger area have larger EMD values (worse scores). The EMD penalizes false positives proportionally to the spatial distance they are from the ground truth.

**Matching Score (MSc).** Due to saliency does not suppose the classification, the matching scores define how relevant the feature map is to the salient object. The matching score  $MS$  is defined as the sum of the absolute differences between the saliency map  $P$  and ground truth  $F$ , expressed as

$$MSc = \sum_i \sum_j |P_{i,j} - F_{i,j}|, \quad (10)$$

where  $i$  and  $j$  denote the row and column matrix indexes, respectively.

The estimates for 3D salient object detection are proposed in [113]. Early saliency models computed a multi-scale representation of a mesh and observed a local vertex property (curvature, surface variation, or normal displacement changes at different scales). The following saliency models achieved robustness and speed by segmenting a mesh into the patches represented by descriptors using a ranking process that specifies patch distinctiveness. Recent saliency models focus on the point sets. Let us consider briefly the saliency metrics focusing on recent saliency models.

**Saliency of large point sets (LS).** The LS metric was the first one that supports saliency detection on large points sets [114]. Saliency is considered as a combination of point distinctiveness at two scales with point association. The LS assigns higher saliency to regions near foci of attention. Distinctiveness is computed by comparing local neighbourhoods described by the Fast Point Feature Histograms (FPFH) [115], which consists of 33D histograms of angles between oriented points in a local region.

**Mesh saliency via spectral processing (MS).** The MS metric proposed a spectral-based approach [116]. The MS is more robust metric that analyzes the changes in local vertex properties. The  $n$  lowest frequencies of log-Laplacian spectrum  $L$  are applied. The log-Laplacian spectrum amplifies the low-frequency variation of the Laplacian spectrum and detects the most “fundamental” saliencies.

**Cluster-based point set saliency (CS).** The CS allows to detect a fine-scale saliency with better time complexity [117]. The point sets are segmented into  $K$  clusters, and a cluster saliency is computed as a sum of cluster distinctiveness and spatial distribution. Cluster distinctiveness is based on the mean FPFH of points belonging to that cluster. The CS metric uses a method similar to [114].

**PCA-based saliency (PS).** The PS value is computed as the absolute value of the FPFH descriptors

projected onto the largest principal axis after the mean centering.

In [109], guidelines for designing the saliency benchmarks are offered. For example, the KL-divergence and IG metrics are suggested for evaluating probabilistic saliency models. If the saliency models are not probabilistic but capture behavior including the systematic biases, then NSS or Pearson's CC are recommended.

## Summery and conclusions

The CNN-based models are trained in a single end-to-end manner, combining feature extraction, feature integration, and saliency value prediction that led to a large gap in performance relative to traditional saliency models. The CNN capability to extract the high-level image features and capture the global context is extremely useful to predict fixation locations and, as a result, saliency detection.

The accuracy and speed of CNN depends on many factors, among which are the following: CNN parameters and setting, errors of models, transfer learning, hardware platform, and routine. Deep learning models have shown the impressive performance in saliency detection. However, they continue to miss the key elements in the images and videos. Partially, this effect is caused by a human annotation of public datasets, when several participants mark close but different salient regions in visual material. One of the ways to avoid errors is to train CNNs on different tasks, to learn to detect gaze and action. Another way is additional informa-

tion about important regions in image, for instance person in indoor/outdoor environment, animal in the wild, the most informative traffic sign on the road, and forth.

It is well-known that CNN extracts million of features. However, the question, which features are the best for saliency prediction, is unsolved. It is considered that one of the first CNNs, ImageNet involving five layers [118] provides extraction of corners, edges, and colors at layer 2, texture information at level 3, and class-specific features at levels 4 and 5. Some researchers try to analyze information in each layer in order to understand a local effectiveness. In this sense, CNNs transform from "black box" structure to more predicted system.

Combination of several CNNs is becoming a conventional approach for decision related to complex task. Thus, in [30], a combination of 13-layered VGG network [119] pre-trained on the ImageNet dataset and 5-layered convolutional network based on selection (SCnet) was applied for salient object detection. The issues of accuracy and speed estimates for such combined CNNs require future investigations.

However, new deep saliency models still suffer from several shortcomings before they can reach a level of human accuracy. Failure analysis allows to design better optimization models, CNN architecture, datasets, and training and evaluation procedures. To close the gap between the human input/output model and saliency models, it is necessary to understand how attention is deployed in humans. We strongly believe that only common efforts and multidiscipline cooperation will lead to better results in saliency detection and prediction.

## References

- Itti L., Koch C., Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1998, vol. 20, no. 11, pp. 1254–1259.
- Cooley C., Coleman S., Gardiner B., Scotney B. Saliency detection and object classification. *Proc. 19th Irish Machine Vision and Image Processing Conf. (IMVIP 2017)*, 2017, pp. 84–90.
- Bi S., Li G., Yu Y. Person re-identification using multiple experts with random subspaces. *Int. J. Image Graph.*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 151–157.
- Avidan S., Shamir A. Seam carving for content-aware image resizing. *ACM Trans. Graph.*, 2007, vol. 26, no. 3, pp. 1–10.
- Aswathy S., Unnikrishnan A. S., Santhosh B. S. An integrated approach for image inpainting based on saliency detection. *Int. J. Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2017, vol. 6, no. 6, pp. 104–114.
- Marchesotti L., Cifarelli C., Csurka G. A framework for visual saliency detection with applications to image thumbnailing. *Proc. IEEE 12th Int. Conf. Computer Vision*, 2009, pp. 2232–2239.
- Wang P., Wang J., Zeng G., Feng J., Zha H., Li S. Salient object detection for searched web images via global saliency. *Proc. 2012 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2012, pp. 3194–3201.
- Zhu W., Liang S., Wei Y., Sun J. Saliency optimization from robust background detection. *Proc. 27th IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2014)*, 2014, pp. 2814–2821.
- Ma Y. F., Lu L., Zhang H. J., Li M. A user attention model for video summarization. *Proc. 10th ACM Int. Conf. Multim.*, 2002, pp. 533–542.
- Zhang J., Malmberg F., Sclaroff S. *Visual saliency: from pixel-level to object-level analysis*. Springer International Publishing, 2019. 138 p.
- Zhang, Q., Lin, J., Tao, Y., Li, W., Shi Y. Salient object detection via color and texture cues. *Neurocomputing*, 2017, vol. 243, pp. 35–48.
- Yang, B., Zhang, X., Chen, L., Yang, H., Gao Z. Edge guided salient object detection. *Neurocomputing*, 2017, vol. 221, pp. 60–71.

13. Hu Y., Chen Z., Chi Z., Fu H. Learning to detect saliency with deep structure. *Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man Cybern.*, 2015, pp. 1770–1775.
14. Alexe B., Deselaers T., Ferrari V. Measuring the objectness of image windows. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2012, vol. 34, no. 11, pp. 2189–2202.
15. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision Pattern Recognition*, 2005, vol. 1, pp. 886–893.
16. Cheng M., Mitra N. J., Huang X., Torr P. H., Hu S. Global contrast based salient region detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2015, vol. 37, no. 3, pp. 569–582.
17. Felzenszwalb P. F., Huttenlocher D. P. Efficient graph-based image segmentation. *Int. J. Comput. Vision*, 2004, vol. 59, no. 2, pp. 167–181.
18. Perazzi F., Krahenbuhl P., Pritch Y., Hornung A. Saliency filters: Contrast based filtering for salient region detection. *IEEE 2012 Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012, pp. 733–740.
19. Treisman A. M., Gelade G. A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 1980, vol. 12, pp. 97–136.
20. Koch C., Ullman S. *Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry*. In: Vaina L. M. (eds.) *Matters of intelligence. Synthese library (Studies in epistemology, logic, methodology, and philosophy of science)*, Springer, 1987, vol. 188, pp. 115–141.
21. Wolfe J. M., Cave K. R., Franzel S. L. Guided search: an alternative to the feature integration model for visual search. *J. Exp. Psychol. Human.*, 1989, vol. 15, no. 3, pp. 419–433.
22. Parkhurst D., Law K., Niebur E. Modeling the role of salience in the allocation of overt visual attention. *Vision Research*, 2002, vol. 42, no. 1, pp. 107–123.
23. Bruce N. D., Tsotsos J. K. Saliency based on information maximization. *Proc. 18th Int. Conf. "Neural Information Processing Systems"*, 2005, pp. 155–162.
24. Achanta R., Estrada F., Wils P., Susstrunk S. Salient region detection and segmentation. In: Gasteratos A., Vincze M., Tsotsos J. K. (eds.) *Computer Vision Systems, Int. Conf. Computer Vision Systems*, LNCS, 2008, vol. 5008, pp. 66–75.
25. Liu T., Yuan Z., Sun J., Wang J., Zheng N., Tang X., Shum H.-Y. Learning to detect a salient object. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2011, vol. 33, no. 2, pp. 353–367.
26. Liu F., Gleicher M. Region enhanced scale-invariant saliency detection. *IEEE Int. Conf. Multimedia and Expo*, 2006, pp. 1477–1480.
27. Walther D., Koch C. Modeling attention to salient proto-objects. *Neural Networks*, 2006, vol. 19, no. 9, pp. 1395–1407.
28. He S., Lau R. W. H., Liu W., Huang Z., Yang Q. SuperCNN: a superpixelwise convolutional neural network for salient object detection. *Int. J. Computer Vision*, 2015, vol. 115, no. 3, pp. 330–344.
29. Li X., Zhao L., Wei L., Yang M. H., Wu F., Zhuang Y., Ling H., Wang J. Deepsaliency: multi-task deep neural network model for salient object detection. *IEEE Trans. Image Process.*, 2016, vol. 25, no. 8, pp. 3919–3930.
30. Cao F., Liu Y., Wang D. Efficient saliency detection using convolutional neural networks with feature selection. *Information Sciences*, 2018, vol. 456, pp. 34–49.
31. Ma Y.-F., Zhang H.-J. Contrast-based image attention analysis by using fuzzy growing. *Proc. 7th ACM Int. Conf. on Multimedia*, 2003, pp. 374–381.
32. Cheng M.-M., Zhang G.-X., Mitra N. J., Huang X., Hu S.-M. Global contrast based salient region detection. *Proc. 2011 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011, pp. 409–416.
33. Shi K., Wang K., Lu J., Lin L. PISA: Pixelwise image saliency by aggregating complementary appearance contrast measures with spatial priors. *Proc. 2013 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013, pp. 2115–2122.
34. Li G., Yu Y. Deep contrast learning for salient object detection. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 478–487.
35. Bin S., Li Y., Ma L., Wu W., Xie Z. Temporally coherent video saliency using regional dynamic contrast. *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, 2013, vol. 23, no. 12, pp. 2067–2076.
36. Koutras P., Maragos P. A perceptually based spatio-temporal computational framework for visual saliency estimation. *Signal Processing: Image Communication*, 2015, vol. 38, pp. 15–31.
37. Koutras P., Zlatinski A., Petros Maragos P. Exploring CNN-based architectures for multimodal salient event detection in videos. *Proc. 13th IEEE Image, Video, and Multidimensional Signal Processing*, 2018, pp. 1–5.
38. Klein D. A., Frintrop S. Center-surround divergence of feature statistics for salient object detection. *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision*, 2011, pp. 2214–2219.
39. Yeh H.-H., Chu-Song Chen C.-S. From rareness to compactness: Contrast-aware image saliency detection. *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process.*, 2012, pp. 1077–1080.
40. Xie Y.-L., Lu H.-C., Yang M.-H. Bayesian saliency via low and mid level cues. *IEEE Trans. Image Process.*, 2013, vol. 22, no. 5, pp. 16809–1698.
41. Achanta R., Shaji A., Smith K., Lucchi A., Fua P., Susstrunk S. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2012, vol. 34, no. 11, pp. 2274–82.
42. Ren Z., Hu Y., Ling-Tien Chia L.-T., Rajan D. Improved saliency detection based on superpixel clustering and saliency propagation. *Proc. ACM Int. Conf. Multimedia*, 2010, no. 2, pp. 1099–1102.
43. Zhu L., Klein D. A., Frintrop S., Cao Z., Cremers A. B. Multi-scale region-based saliency detection using W2 distance on N-dimensional normal distributions. *Proc. 2013 IEEE Int. Conf. Image Process.*, 2013, pp. 176–180.



44. Frintrop S. *VOCUS: A visual attention system for object detection and goal-directed search*. LNAI 3899. Springer, 2006. 216 p.
45. Santella A., Agrawala M., DeCarlo D., Salesin D., Cohen M. Gaze-based interaction for semi-automatic photo cropping. *Proc. ACM CHI 2006 Conf. on Human Factors in Computing Systems*, 2006, vol. 1, pp. 771–780.
46. Chen L.-Q., Xie X., Fan X., Ma W.-Y., Zhang H., Zhou H.-Q. A visual attention model for adapting images on small displays. *Multimedia Syst*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 353–364.
47. Wang P., Zhang D., Zeng G., Wang J. Contextual dominant color name extraction for web image search. *Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Multimedia and Expo Workshops*, 2012, pp. 319–324.
48. Ko B. C., Nam J.-Y. Object-of-interest image segmentation based on human attention and semantic region clustering. *J. Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 2006, vol. 23, no. 10, pp. 2462–2470.
49. Garcia G. M., Klein D. A., Stuckler J., Frintrop S., Cremers A. B. Adaptive multi-cue 3D tracking of arbitrary objects. *DAGM/OAGM 2012: Pattern Recognition*, LNCS, 2012, vol. 7476, pp. 357–366.
50. Favorskaya M., Buryachenko V. *Fast salient object detection in non-stationary video sequences based on spatial saliency maps*. In: De Pietro G., Gallo L., Howlett R. J., Jain L. C. (Eds.) *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services*, SIST, 2016, vol. 55, pp. 121–132.
51. Wang L., Ouyang W., Wang X., Lu H. Visual tracking with fully convolutional networks. *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision*, 2015, pp. 3119–3127.
52. Dong C., Loy C. C., He K., Tang X. Image super-resolution using deep convolutional networks. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2016, vol. 38, no. 2, pp. 295–307.
53. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2017, vol. 39, no. 4, pp. 640–651.
54. Patacchiola M., Cangelosi A. Head pose estimation in the wild using convolutional neural networks and adaptive gradient methods. *Pattern Recognition*, 2017, vol. 71, pp. 132–143.
55. Nogueira K., Penatti O. A., dos Santos J. A. Towards better exploiting convolutional neural networks for remote sensing scene classification. *Pattern Recognition*, 2017, vol. 61, pp. 539–556.
56. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2017, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149.
57. Vig E., Dorr M., Cox D. Large-scale optimization of hierarchical features for saliency prediction in natural images. *Proc. 2014 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 2798–2805.
58. Kummerer M., Theis L., Bethge M. Deep gaze I: Boosting saliency prediction with feature maps trained on ImageNet. 2014. *arXiv preprint arXiv:1411.1045*.
59. Kummerer M., Wallis T. S., Gatys L. A., Bethge M. Understanding low- and high-level contributions to fixation prediction. *Proc. Int. Conf. Computer Vision*, 2017, pp. 4799–4808.
60. Liu N., Han J., Zhang D., Wen S., Liu T. Predicting eye fixations using convolutional neural networks. *Proc. 2015 IEEE Conf. Computer Vision Pattern Recognition*, 2015, pp. 362–370.
61. Huang X., Shen C., Boix X., Zhao Q. SALICON: Reducing the semantic gap in saliency prediction by adapting deep neural networks. *Proc. IEEE Intern. Conf. on Computer Vision*, 2015, pp. 262–270.
62. Cornia M., Baraldi L., Serra G., Cucchiara R. A deep multilevel network for saliency prediction. *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*, 2016, pp. 3488–3493.
63. Pan J., Sayrol E., Giro-i Nieto X., McGuinness K., O'Connor N. E. Shallow and deep convolutional networks for saliency prediction. *Proc. 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 598–606.
64. Jetley S., Murray N., Vig E. End-to-end saliency mapping via probability distribution prediction. *Proc. 2016 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 5753–5761.
65. Liu N., Han J. A deep spatial contextual long-term recurrent convolutional network for saliency detection. 2016. *preprint arXiv:1610.01708*.
66. Bruce N. D., Catton C., Janjic S. A deeper look at saliency: feature contrast, semantics, and beyond. *Proc. 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 516–524.
67. Mottaghi R., Chen X., Liu X., Cho N.-G., Lee S.-W., Fidler S., Urtasun R., Yuille A. The role of context for object detection and semantic segmentation in the wild. *Proc. 2014 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 891–898.
68. Cornia M., Baraldi L., Serra G., Cucchiara R. Predicting human eye fixations via an LSTM-based saliency attentive model. 2016. *arXiv preprint arXiv:1611.09571*.
69. Huang G.-B., Zhu Q.-Y., Siew C.-K. Extreme learning machine: theory and applications. *Neurocomputing*, 2006, vol. 70, no. 1-3, pp. 489–501.
70. Tavakoli H. R., Borji A., Laaksonen J., Rahtu E. Exploiting inter-image similarity and ensemble of extreme learners for fixation prediction using deep features. 2016. *arXiv preprint arXiv:1610.06449v1*.
71. Kruthiventi S. S., Ayush K., Babu R. V. DeepFix: A fully convolutional neural network for predicting human eye fixations. *IEEE Trans. Image Processing*, 2017, vol. 26, no. 9, pp. 4446–4456.
72. Pan J., Ferrer C. C., McGuinness K., O'Connor N. E., Torres J., Sayrol E., Giro-i Nieto X. SalGAN: Visual saliency prediction with generative adversarial networks. 2017. *arXiv preprint arXiv:1701.01081*.
73. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y.

- Generative adversarial nets. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014, pp. 2672–2680. *arXiv preprint arXiv:1406.2661*.
74. Wang W., Shen J. Deep visual attention prediction. 2017. *arXiv preprint arXiv:1705.02544*.
75. Gorji S., Clark J. J. Attentional push: A deep convolutional network for augmenting image saliency with shared attention modeling in social scenes. *Proc. 2017 IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, vol. 2, no. 4, 2017, pp. 2510–2519.
76. Jia S., Bruce N. D. B. EML-NET: An expandable multi-layer network for saliency prediction. 2018. *arXiv preprint arXiv:1805.01047*.
77. Leifman G., Rudoy D., Swedish T., Bayro-Corrochano E., Raskar R. Learning gaze transitions from depth to improve video saliency estimation. *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, 2017, vol. 3, pp. 1698–1707.
78. Bazzani L., Larochelle H., Torresani L. Recurrent mixture density network for spatiotemporal visual attention. *Proc. Int. Conf. Learning Representations*, 2017, pp. 1–15.
79. Liu Y., Zhang S., Xu M., He X. Predicting salient face in multipleface videos. *Proc. 2017 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, pp. 4420–4428.
80. Souad Chaabouni, Benois-Pineau J., Hadar O., Ben Amar C. Deep learning for saliency prediction in natural video. 2016. *arXiv preprint arXiv:1604.08010*.
81. Jiang L., Xu M., Wang Z. Predicting video saliency with object-to-motion CNN and two-layer convolutional LSTM. 2017. *arXiv preprint arXiv:1709.06316*.
82. Gorji S., Clark J. J. Going from image to video saliency: Augmenting image saliency with dynamic attentional push. *Proc. 2018 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 7501–7511.
83. Bak C., Kocak A., Erdem E., Erdem A. Spatio-temporal saliency networks for dynamic saliency prediction. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2018, vol. 20, no. 7, pp. 1688–1698.
84. Wang W., Shen J., Guo F., Cheng M.-M., Borji A. Revisiting video saliency: A large-scale benchmark and a new model. *Proc. 2018 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 4894–4903.
85. Sun M., Zhou Z., Hu Q., Wang Z., Jiang J. SG-FCN: A motion and memory-based deep learning model for video saliency detection. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, pp. 1–12.
86. Tran D., Bourdev L., Fergus R., Torresani L., Paluri M. Learning spatiotemporal features with 3D convolutional networks. *Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Computer Vision*, 2015, pp. 4489–4497.
87. Koutras P., Maragos P. SUSiNet: See, Understand and Summarize it. 2019. *arXiv preprint arXiv:1812.00722v2*.
88. Hara K., Kataoka H., Satoh Y. Can spatiotemporal 3D CNNs retrace the history of 2d CNNs and ImageNet. *Proc. 2018 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 6546–6555.
89. Xu P., Ehinger K. A., Zhang Y., Finkelstein A., Kulkarni S. R., Xiao J. Turkergaze: Crowdsourcing saliency with webcam based eye tracking. 2015. *arXiv preprint arXiv:1504.06755*.
90. Jiang M., Huang S., Duan J., Zhao Q. SALICON: Saliency in context. *Proc. 2015 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, pp. 1072–1080.
91. Kim N. W., Bylinskii Z., Borkin M. A., Gajos K. Z., Oliva A., Durand F., Pfister H. BubbleView: an alternative to eyetracking for crowdsourcing image importance. 2017. *arXiv preprint arXiv:1702.05150*.
92. MIT saliency benchmark. Available at: <http://saliency.mit.edu/datasets.html> (accessed 17 April 2019).
93. Judd T., Durand F., Torralba A. A benchmark of computational models of saliency to predict human fixations. 2012. *Technical report MIT-CSAIL-TR-2012-001*.
94. Borji A., Laurent Itti L. CAT2000: A large scale fixation dataset for boosting saliency research. 2015. *arXiv preprint arXiv:1505.03581*.
95. Saliency in Context. Available at: <http://salicon.net/> (accessed 18 April 2019).
96. MSRA10K Salient Object Database. Available at: <https://mmcheng.net/msra10k/> (accessed 11 April 2019).
97. Extended Complex Scene Saliency Dataset (ECSSD). Available at: <http://www.cse.cuhk.edu.hk/leojia/projects/hsaliency/dataset.html> (accessed 11 April 2019).
98. Li G., Yu Y. Visual Saliency based on multiscale deep features. *Proc. 2015 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, pp. 5455–5463.
99. Visual Object Classes Challenge 2010 (VOC2010). Available at: <http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/voc2010/index.html> (accessed 18 April 2019).
100. Everingham M., Van Gool L., Williams C. K. I., Winn J., Zisserman A. The PASCAL visual object classes (VOC) challenge. *Int. J. Computer Vision*, 2010, vol. 88, no. 2, pp. 303–338.
101. Salient Objects Dataset (SOD). Available at: <http://elderlab.yorku.ca/SOD/> (accessed 18 April 2019).
102. The DUT-OMRON Image Dataset. Available at: <http://saliencydetection.net/dut-omron/> (accessed 18 April 2019).
103. DAVIS: Densely Annotated Video Segmentation. Available at: <https://davischallenge.org/> (accessed 15 April 2019).
104. The Large-scale Eye-tracking Database of Videos (LEDOV) for video saliency. Available at: <https://github.com/remega/LEDOV-eye-tracking-database> (accessed 15 April 2019).
105. The DIEM Project. Available at: <https://thediem-project.wordpress.com/> (accessed 18 April 2019).
106. UCF Sports Action Data Set. Available at: [https://www.crcv.ucf.edu/data/UCF\\_Sports\\_Action.php](https://www.crcv.ucf.edu/data/UCF_Sports_Action.php) (accessed 18 April 2019).
107. Mathe S., Sminchisescu C. Actions in the eye: Dynamic gaze datasets and learnt saliency models for visual recognition. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2015, vol. 37, no. 7, pp. 1408–1424.

108. COGNIMUSE Database. Available at: <http://cognimuse.cs.ntua.gr/database> (accessed 18 April 2019).
109. Zlatintsi A., Koutras P., Evangelopoulos G., Malandrakis N., Efthymiou N., Pastra K., Potamianos A., Maragos P. COGNIMUSE: A multimodal video database annotated with saliency, events, semantics and emotion with application to summarization. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2017, vol. 2017, no. 1, p. 54.
110. Bylinskii Z., Judd T., Oliva A., Torralba A., Durand F. What do different evaluation metrics tell us about saliency models? 2017. *arXiv preprint arXiv:1604.03605*.
111. Kummerer M., Wallis T. S., Bethge M. Information-theoretic model comparison unifies saliency metrics. *Proc. National Academy Sciences*, 2015, vol. 112, no. 52, pp. 16054–16059.
112. Pele O., Werman M. A linear time histogram metric for improved sift matching. *Proc. 10th European Conf. Computer Vision*, 2008, part III, pp. 495–508.
113. Tasse F. P., Kosinka J., Dodgson N. A. Quantitative analysis of saliency models. *Proc. SIGGRAPH ASIA*, 2016, Technical Briefs, pp. 19.1–19.4.
114. Shtrom E., Leifman G., Tal A. Saliency detection in large point sets. *Proc. 2013 IEEE Int. Con. Computer Vision*, 2013, pp. 3591–3598.
115. Rusu R. B., Blodow N., Beetz M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration. *Proc. 2009 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2009, pp. 1848–1853.
116. Song R., Liu Y., Martin R. R., Rosin P. L. Mesh saliency via spectral processing. *ACM Trans. Graph.*, 2014, vol. 33, no. 1, pp. 6:1–6:17.
117. Tasse F. P., Kosinka J., Dodgson N. Cluster-based point set saliency. *Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Computer Vision*, 2015, pp. 163–171.
118. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Proc. 25th Int. Conf. Neural Inf. Process. Syst.*, 2012, pp. 1097–1105.
119. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. 2014. *arXiv preprint arXiv: 1409.1556*.

УДК 004.932

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-10-36

**Обнаружение значимости в видеоконтенте в эпоху глубокого обучения: тенденции развития**М. Н. Фаворская<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-2181-0454](https://orcid.org/0000-0002-2181-0454), [favorskaya@sibsau.ru](mailto:favorskaya@sibsau.ru)Л. Ч. Джайн<sup>б, в, г</sup>, PhD, профессор, [orcid.org/0000-0001-6176-3739](https://orcid.org/0000-0001-6176-3739)<sup>а</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярский рабочий пр., 31, Красноярск, 660037, РФ<sup>б</sup>Университет Канберры, ул. Киринари, 11, Брюс АСТ 2617, Канберра, Австралия<sup>в</sup>Ливерпульский университет Надежды, Парк надежды, L16 9JD, Ливерпуль, Великобритания<sup>г</sup>Технологический университет Сиднея, PO Box 123, Бродвей NSW 2007, Сидней, Австралия

**Постановка проблемы:** обнаружение значимости в видеоконтенте является фундаментальной задачей компьютерного зрения. Конечной целью обнаружения значимости является локализация объектов интереса, которые привлекают внимание человека относительно остальной части изображения. Большое разнообразие моделей значимости, основанных на различных подходах, разработано с 1990-х годов. В последние годы обнаружение значимости стало одной из активно изучаемых разделов в теории сверточных нейронных сетей. Много оригинальных решений на основе сверточных нейронных сетей было предложено для обнаружения значимых объектов и даже событий. **Цель:** подробный обзор методов обнаружения значимости в эпоху глубокого обучения, который позволит понять возможности сверточных нейронных сетей для визуального анализа, проводимого с помощью слежения за глазами человека и цифровой обработки изображений. **Результаты:** обзор отражает последние достижения при решении задачи обнаружения значимости с использованием сверточных нейронных сетей. Различные модели, доступные в литературе, такие как статические и динамические 2D сверточные нейронные сети для обнаружения объектов значимости и 3D сверточные нейронные сети для обнаружения значимых событий, обсуждаются в хронологическом порядке. Стоит отметить, что автоматическое обнаружение значимых событий в продолжительных видеопоследовательностях стало возможным с использованием недавно появившихся 3D сверточных нейронных сетей в сочетании с 2D сверточными нейронными сетями для обнаружения значимых звуковых сигналов. В статье дано краткое описание общедоступных наборов изображений и видеопоследовательностей с аннотированными значимыми объектами или событиями, а также представлены часто используемые метрики для оценки результатов. **Практическая значимость:** данный обзор рассматривается как вклад в изучение быстро развивающихся методов глубокого обучения для задачи обнаружения значимости на изображениях и видеопоследовательностях.

**Ключевые слова** — обнаружение регионов значимости, обнаружение значимых объектов, обнаружение значимых событий, глубокое обучение, сверточная нейронная сеть, извлечение признаков.

**Для цитирования:** Favorskaya M. N., Jain L. C. Saliency detection in deep learning era: trends of development. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 10–36. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-10-36

**For citation:** Favorskaya M. N., Jain L. C. Saliency detection in deep learning era: trends of development. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 10–36. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-10-36



## Адаптивное управление нестационарными нелинейными объектами на основе алгоритмов скоростного градиента

О. П. Томчина<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-6109-2143](https://orcid.org/0000-0002-6109-2143)

Д. Н. Поляхов<sup>б</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-4134-0189](https://orcid.org/0000-0002-4134-0189)

О. И. Токарева<sup>в</sup>, доцент, [orcid.org/0000-0003-4656-3151](https://orcid.org/0000-0003-4656-3151)

А. Л. Фрадков<sup>г, д</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-5633-0944](https://orcid.org/0000-0002-5633-0944), [fradkov@mail.ru](mailto:fradkov@mail.ru)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, РФ

<sup>в</sup>Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, Двинская ул., 5/7, Санкт-Петербург, 198035, РФ

<sup>г</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034, РФ

<sup>д</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Большой пр. В. О., 61, Санкт-Петербург, 199178, РФ

**Постановка проблемы:** движение многих реальных объектов описывается существенно нелинейными и нестационарными моделями. Ряд подходов к управлению такими объектами основан на построении внутренней модели нестационарности. Однако параметры модели нестационарности могут меняться в широких пределах, что может привести к дополнительным погрешностям. В данной работе предполагается лишь, что скорость изменения параметров объекта ограничена, при этом начальная неопределенность может быть достаточно велика. **Цель:** анализ алгоритмов адаптивного управления нелинейными нестационарными объектами для систем с явной эталонной моделью, синтезированных методом скоростного градиента. **Результаты:** получена оценка предельного отклонения решения замкнутой системы от решения эталонной модели. Показано, что при достаточно медленных изменениях параметров и малой начальной неопределенности предельная ошибка в системе может быть сделана сколь угодно малой. Рассмотрены системы, построенные на основе как прямого, так и идентификационного подхода. Процедура синтеза адаптивного регулятора и анализа синтезированной системы проиллюстрирована примером. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют строить и анализировать широкий класс адаптивных систем с эталонной моделью в нестационарных условиях.

**Ключевые слова** – адаптивная система, нелинейность, нестационарность, эталонная модель, метод скоростного градиента, прямой подход, идентификационный подход.

**Для цитирования:** Томчина О. П., Поляхов Д. Н., Токарева О. И., Фрадков А. Л. Адаптивное управление нестационарными нелинейными объектами на основе алгоритмов скоростного градиента. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 37–44. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-37-44

**For citation:** Tomchina O. P., Polyakhov D. N., Tokareva O. I., Fradkov A. L. Adaptive control of time-varying non-linear plants by speed-gradient algorithms. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 37–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-37-44

### Введение

Начиная с 1970-х годов Ленинград постепенно становился одной из мировых столиц теории адаптивных систем. Происходило это благодаря активной деятельности признанного лидера в этой области, члена-корреспондента РАН, профессора ЛГУ Владимира Андреевича Якубовича. Проведение Ленинградских симпозиумов по теории адаптивных систем в 1972, 1974, 1976, 1979 гг. и Всесоюзной конференции по теории адаптивных систем и ее применениям в 1982 г. активизировало исследования в этой области в вузах города и привлекло внимание ведущих ученых СССР к дости-

жениям научной школы В. А. Якубовича и взаимодействующих с ней научных школ города. Эти результаты были отражены в ряде монографий [1–7]. В трудные 1990-е годы научная и публикационная активность снизились, но зато окрепли новые международные связи. К началу XXI столетия в науку об адаптивном управлении пришло поколение современных ученых, что укрепило традиции и авторитет Санкт-Петербургской научной школы [8–12]. В последние годы новых книг по адаптивному управлению появлялось мало, что может навести на мысль, что эта область исчерпана. Действительно, в отличие от конца прошлого века, в веке нынешнем доминировать в те-

матике автоматического управления стали сетевые и многоагентные системы [13].

Недавно, однако, стала намечаться тенденция к возрождению интереса к адаптивному управлению на основе понимания глубоких связей между адаптацией и машинным обучением. Без сомнения, машинное обучение является основой систем искусственного интеллекта. Поэтому значительная часть багажа, накопленного за несколько десятилетий, может пригодиться на новом этапе развития науки и технологий, помогая оснащать автоматические системы искусственным интеллектом.

Ничто не исключает необходимость проводить время от времени анализ и обобщение накопленных результатов, систематизировать и давать новые оценки достижениям и методам прошлых лет. Шаг в этом направлении делается и в данной статье, а именно рассматривается общая задача адаптивного управления с эталонной моделью для нестационарных нелинейных объектов. Отметим, что, хотя задачи адаптивного управления нелинейными объектами уже давно и подробно исследованы [1, 7, 8, 10, 14], задачам адаптивного управления нестационарными системами посвящено сравнительно мало работ. Например, адаптивному управлению нелинейными нестационарными системами по состоянию посвящена работа [15], а адаптивному управлению с обратной связью по выходу — работы [16–20]. Однако в работах [15–20] накладываются достаточно жесткие предположения на структуру объекта управления (ОУ) и возмущений и, кроме того, предполагается, что неизвестные параметры входят в уравнение ОУ линейно. В сложных задачах зачастую бывает, что модель ОУ параметризована нелинейно. Адаптивному управлению нелинейными системами с нелинейной параметризацией посвящены работы [21–25], однако в них неизвестные параметры предполагаются постоянными, т. е. ОУ является стационарным.

В данной статье описывается общая постановка и основанный на методе скоростного градиента [1, 7, 8] общий подход к решению задач адаптивного управления нелинейными нестационарными системами без структурных ограничений на входные параметры. Для определенности в работе рассматриваются адаптивные системы с явной эталонной моделью, построенные на основе прямого и идентификационного подхода в достаточно простой ситуации отсутствия возмущений и доступных для измерения состояний объекта и эталонной модели.

Важно отметить, что даже в этой ситуации нестационарность играет роль возмущения и осложняет решение задачи, препятствуя достижению асимптотической устойчивости процессов.

## Адаптивное управление

### с эталонной моделью — прямой подход

Рассмотрим ОУ, описываемый уравнениями в пространстве состояний

$$\dot{x}(t) = F(x(t), u(t), \xi(t)) + f(t); y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

и вспомогательную динамическую систему, называемую эталонной моделью (ЭМ) и описываемую уравнениями

$$\dot{x}_M(t) = F_M(x_M(t), r(t)); y_M(t) = C_M x_M(t), \quad (2)$$

где векторы  $x, x_M \in R^n$  — состояния ОУ и ЭМ соответственно;  $u, r \in R^m$  — векторы управления и задающего воздействия;  $f \in R^n$  — вектор возмущающих воздействий;  $\xi(t) \in \Xi \subset R^l$  — вектор неизвестных и меняющихся во времени параметров ОУ;  $y, y_M \in R^l$  — выходы ОУ и ЭМ. Множество  $\Xi$  возможных значений  $\xi$  считается известным и ограниченным, и скорость изменения неизвестных параметров тоже считается ограниченной. Предполагается также, что решения уравнений (1), (2) существуют, при этом решения уравнений (2) — ограниченные функции времени.

Требуется определить закон адаптивного управления

$$u(t) = U(y(t), r(t), \theta(t)); \quad (3)$$

$$\dot{\theta}(t) = \Phi(y(t), r(t), \theta(t)), \quad (4)$$

не зависящий от  $\xi(t) \in \Xi$  и использующий только величины, доступные измерению, так, чтобы движение объекта приближалось с течением времени к движению ЭМ, т. е. достигалась цель управления

$$\|x(t) - x_M(t)\| \leq \varepsilon, \quad t \geq t_a \quad (5)$$

для  $\forall \xi(t) \in \Xi$ , где  $\varepsilon > 0$  — заданная точность;  $t_a$  — время достижения цели. Таким образом, задача построения адаптивной системы состоит в определении функций  $U, \Phi$  таких, что решения дифференциальных уравнений (1), (3), (4) существуют при всех  $t > 0$  и удовлетворяют цели управления (5).

Эталонная модель выбирается таким образом, чтобы она обладала устойчивостью и заданным качеством переходных процессов. При этом ЭМ может либо быть явно реализованной в системе управления в виде отдельного динамического звена (2) (системы с явной ЭМ), либо присутствовать в системе неявно, в виде набора параметров алгоритма управления (системы с неявной ЭМ) [1, 7]. В последнем случае цель управления (5) заменяется другой, в формулировке которой не используется вектор  $x_M(t)$ , например:

$$\|\dot{x}(t) - F_M(x(t), r(t))\| < \varepsilon_1, \quad t \geq t_a, \quad (6)$$

где  $t_a$  — время переходного процесса относительно цели (6). Цель управления может задаваться также при помощи вспомогательной целевой функции  $Q(x) \geq 0$ :

$$Q(x(t) - x_M(t)) < \varepsilon, \quad t \geq t_a \quad (7)$$

или

$$Q(\dot{x}(t) - F_M(x(t), r(t))) \leq \varepsilon_1, \quad t \geq t_a. \quad (8)$$

Часто  $Q(x)$  — квадратичная функция;  $Q(x) = x^T P x$ , где  $P = P^T > 0$  — некоторая положительно определенная матрица.

Переходя к синтезу адаптивного регулятора, наложим упрощающие предположения: будем считать, что измерению доступны все компоненты векторов состояния ОУ и ЭМ, а возмущениями можно пренебречь:  $f(t) \equiv 0$ . Кроме того, наложим традиционное предположение о структурной согласованности ОУ и ЭМ: структура основного контура системы [регулятора (3)] выбрана так, чтобы обеспечить совпадение динамики замкнутой системы и ЭМ при некоторых значениях параметров регулятора. Это значит, что для любого  $\xi \in \Xi$  должен существовать вектор «идеальных» значений параметров регулятора  $\theta_*(\xi)$  такой, что для любых  $x, r$  выполняется тождество

$$F(x, U(x, r, \theta_*(\xi)), \xi) = F_M(x, r). \quad (9)$$

Для синтеза воспользуемся методом скоростного градиента [1, 7, 8]. Для этого вычислим скорость изменения целевой функции  $Q(e) = Q(x - x_M(t))$  вдоль траектории замкнутой системы. Имеем

$$\dot{Q}(e) = \nabla Q^T [F(x, U(x, r, \theta), \xi(t)) - F_M(x_M(t), r(t))] = w(x, \theta, t).$$

Вычисляя градиент от  $w(x, \theta, t)$  по  $\theta$ , построим регуляризованный алгоритм скоростного градиента в дифференциальной форме

$$\dot{\theta} = -\gamma \nabla_{\theta} w(x, \theta, t) - \alpha(\theta - \bar{\theta}), \quad (10)$$

где  $\gamma > 0$  — коэффициент усиления алгоритма адаптации;  $\alpha > 0$  — коэффициент регуляризации;  $\bar{\theta} \in \Xi$  — априорная оценка неизвестного параметра  $\theta_*(\xi(t))$ .

Условия достижения цели в адаптивной системе (1)–(4), (10) формулируются в следующем утверждении.

**Теорема.** Пусть выполнены следующие условия.

1. Функции  $F(\cdot)$ ,  $F_M(\cdot)$ ,  $\nabla_{\theta} w(\cdot)$  непрерывно дифференцируемы.

2. Функция  $Q(e) \geq 0$  непрерывно дифференцируема, и ее значения стремятся к  $+\infty$  при  $e \rightarrow +\infty$ .

3. Функция  $w(x, \theta, t)$  выпукла по  $\theta$ .

4. Существует функция  $\theta_*(\xi(t))$  такая, что для некоторого  $\rho > 0$  справедливо неравенство (условие достижимости)  $w(x, \theta_*(\xi), t) \leq -\rho Q(e)$ .

5. Выполнено условие согласованности (9), причем вектор-функция  $\theta_*(\xi(t))$  ограничена во времени вместе со своей производной:

$$\|\theta_*(\xi(t))\| \leq \beta_0 \quad \text{и} \quad \|\dot{\theta}_*(\xi(t))\| \leq \beta_1.$$

Тогда все решения адаптивной системы (1)–(4), (10) ограничены и достигается цель управления (7) при  $\varepsilon = \mu^{-1} \gamma^{-2} (\alpha^2 \beta_0 + \beta_1^2) / \rho_0$ , где  $\rho_0 = \min\{\rho, 2\alpha - \mu\gamma\}$ ,  $\mu > 0$  — настроенный параметр. При выборе параметра  $\alpha > 0$ , удовлетворяющего неравенству  $\alpha < \rho/2$ , оптимальный выбор  $\mu = \alpha/\gamma$  дает оценку

$$\varepsilon = \beta_0 / \gamma + \beta_1^2 / (\gamma \alpha^2). \quad (11)$$

Для доказательства теоремы выберем функцию Ляпунова в виде

$$V(x, \theta, t) = Q(x - x_M(t)) + (2\gamma)^{-1} \|\theta - \theta_*(\xi(t))\|^2 \quad (12)$$

и вычислим скорость изменения  $V(x(t), \theta(t), t)$  вдоль траектории системы (1)–(3), (10). Имеем

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, \theta, t) &= w(x, \theta, t) + \gamma^{-1} (\theta - \theta_*(\xi(t)))^T [\dot{\theta} - \dot{\theta}_*(\xi(t))] = \\ &= w(x, \theta, t) + (\theta - \theta_*(\xi(t)))^T \times \\ &\times [-\nabla w(x, \theta, t) - \alpha / \gamma (\theta - \bar{\theta}) - \gamma^{-1} \dot{\theta}_*(\xi(t)) / dt]. \end{aligned}$$

Пользуясь последовательно условиями согласованности (9), выпуклости и достижимости, получим

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, \theta, t) &\leq -\rho Q(e) - \alpha / \gamma \|\theta - \theta_*(\xi(t))\|^2 - \\ &- \alpha / \gamma [\theta - \theta_*(\xi(t))] [\theta_*(\xi(t)) - \bar{\theta}] - \\ &- \gamma^{-1} (\theta - \theta_*(\xi(t)))^T \dot{\theta}_*(\xi(t)) / dt. \end{aligned}$$

Далее, воспользовавшись квадратичным неравенством  $|x^T y| \leq \mu/2 \|x\|^2 + (2\mu)^{-1} \|y\|^2$ , справедливым для любого  $\mu > 0$ , получим

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, \theta, t) &\leq -\rho Q(e) - (\alpha / \gamma - \mu / 2) \|\theta - \theta_*(\xi(t))\|^2 - \\ &- \mu^{-1} \gamma^{-2} [\alpha^2 \|\bar{\theta} - \theta_*(\xi(t))\|^2 + \beta_1^2]. \end{aligned}$$

Наконец, выбрав  $\mu < 2\alpha/\gamma$  и обозначив  $\rho_0 = \min\{\rho, 2\alpha - \mu\gamma\}$ , получим

$$\dot{V}(x, \theta, t) \leq -\rho_0 V + \beta, \quad (13)$$

где  $\beta = \mu^{-1} \gamma^{-2} (\alpha^2 \sup \|\theta_*(\xi(t))\| + \beta_1^2)$ .



Таким образом, при  $V(x, \theta, t) > \beta/\rho_0$  функция  $V$  убывает, т. е. она остается ограниченной на траекториях замкнутой системы. Отсюда и из ограниченности решений уравнений ЭМ, а также ограниченности дрейфа параметров следует, что траектории замкнутой системы ограничены. Наконец, из (13) и из соотношения  $Q(e) \leq V(x, \theta, t)$  заключаем, что цель управления (7) достигается при  $\varepsilon = \beta/\rho_0$ .

*Замечание 1.* Зафиксировав выбор параметра регуляризации алгоритма  $\alpha < \rho/2$ , можно выбирать коэффициент усиления алгоритма  $\gamma$  сколь угодно большим. В соответствии с (11) предельная ошибка при этом будет уменьшаться, и при достаточно большом  $\gamma$  может быть сделана сколь угодно малой.

*Замечание 2.* Теорема остается справедливой, если целевая функция  $Q(e)$  задана не на всем пространстве, а на некоторой открытой области  $\Omega$  такой, что  $Q(e) \rightarrow +\infty$  при стремлении  $e$  к границе области  $\Omega$ . Это следует из того, что на поверхностях уровня  $Q(e) = c$  при достаточно больших  $c$  функция  $V$  убывает, и, значит, целевая функция  $Q(e)$  остается ограниченной, т. е. траектории замкнутой системы остаются внутри области  $\Omega$ .

### Адаптивное управление с эталонной моделью — идентификационный подход

При идентификационном подходе структура и параметры основного контура также выбираются исходя из структуры объекта в предположении, что параметры известны, и таким образом, чтобы обеспечить достижение исходной или вспомогательной цели управления. Однако при работе системы вместо параметров объекта  $\xi$  (которые на самом деле неизвестны) подставляются их оценки  $\hat{\xi}(t)$ , получаемые алгоритмом адаптации. Таким образом, регулятор описывается вместо уравнения (3) уравнением

$$u(t) = U(y(t), r(t), \theta_*(\hat{\xi}(t))). \quad (14)$$

Для осуществления адаптации вводится вспомогательная система, структура которой совпадает со структурой объекта, — так называемая *настраиваемая модель объекта управления*:

$$\dot{\hat{x}}(t) = F(\hat{x}, u(t), 0, \hat{\xi}(t)). \quad (15)$$

Параметры настраиваемой модели  $\hat{\xi}(t)$  и есть оценки вектора  $\xi$ , получаемые при помощи алгоритма адаптации:

$$\dot{\hat{\xi}}(t) = \Psi(y(t), \hat{x}(t), u(t), \hat{\xi}(t)). \quad (16)$$

Цель адаптации, исходя из которой строится алгоритм адаптации (16), состоит в приближе-

нии вектора состояния  $\hat{x}(t)$  настраиваемой модели (15) к состоянию объекта  $x(t)$ :

$$\|x(t) - \hat{x}(t)\| \leq \varepsilon, \quad t \geq t_a. \quad (17)$$

Настраиваемая модель так же, как и эталонная модель, может присутствовать в системе неявно. Тогда цель адаптации аналогично (6) задается соотношениями

$$\|\dot{\hat{x}}(t) - F(x(t), u(t), \hat{\xi}(t))\| \leq \varepsilon, \quad t \geq t_a, \quad (18)$$

а в алгоритм адаптации (16) вектор  $\hat{x}(t)$  не входит. Для исследования системы (1), (2), (14)–(16) применима теорема, в которой в качестве настраиваемых параметров выступает вектор оценок неизвестных параметров объекта  $\hat{\xi}(t)$ , а в качестве цели управления — цель адаптации, заданная при помощи некоторой целевой функции аналогично (7).

Если для реализации алгоритмов регулирования или адаптации требуется знание фазовых координат, недоступных измерению (или их измерение дорогостоящее), в систему может быть введен наблюдатель. Параметры наблюдателя удобно выбирать, исходя из имеющихся текущих оценок параметров объекта. Однако более универсальный подход состоит в оценивании параметров объекта одновременно с оцениванием состояния, т. е. наблюдатель оказывается адаптивным [26–30]. Важно, что в этом случае исследование работоспособности системы должно проводиться по отношению к трем подцелям: сходимости оценки состояния ОУ, сходимости оценки параметров ОУ и достижению цели управления (сходимости состояния ОУ к состоянию ЭМ).

При описанном подходе цель адаптации не совпадает с целью управления и состоит в приближении движения настраиваемой модели к движению объекта (идентификации). Поэтому этот подход называют *непрямым*, или *идентификационным*. Идентификационный подход позволяет применять более сложные законы регулирования, чем прямой подход. В частности, в этом случае широко используется принцип модального управления [3, 4, 7, 8]. Разделение целей адаптации и управления дает возможность независимо синтезировать основной контур и контур адаптации, что облегчает построение адаптивного регулятора. С другой стороны, затрудняется обоснование работоспособности системы, так как из достижения цели адаптации не следует непосредственно достижение исходной цели управления.

### Пример

Пусть ОУ описывается управляемым логистическим уравнением

$$\dot{x} = ax(d - x) + u, \quad (19)$$

где  $a, d$  — неизвестные параметры ОУ, а ЭМ — линейное аperiodическое звено:

$$\dot{x}_M = -a_M x_M + r(t). \quad (20)$$

Зададим целевую функцию в виде кватрики

$$Q(e) = (x - x_M)^4 \quad (21)$$

и выберем сначала компенсирующий закон управления

$$u(t) = -a_M x_M + r(t) - ax(d - x) - ke, \quad (22)$$

где  $k > 0$  — заданное число. Очевидно, уравнение ошибки в замкнутой системе (19), (20), (22) имеет вид  $de/dt = -ke$ , т. е. ошибка затухает экспоненциально быстро. Однако закон управления (22) нельзя реализовать, поскольку он зависит от неизвестных параметров. Поэтому неизвестные параметры заменяются настраиваемыми и вводится адаптивный регулятор

$$u(t) = -a_M x_M + r(t) + \theta_1 x + \theta_2 x^2 - ke, \quad (23)$$

где  $\theta_1, \theta_2$  — настраиваемые параметры. Для синтеза алгоритма настройки параметров (алгоритма адаптации) воспользуемся методом скоростного градиента и вычислим скорость изменения целевой функции (21) в силу системы (19), (20), (22):

$$\dot{Q} = 4e^3 [(\theta_1 + ad)x + (\theta_2 - a)x^2 - ke]. \quad (24)$$

Дифференцируя (24) по настраиваемым параметрам, получим алгоритм адаптации

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= -\gamma e^3 x - \alpha(\theta_1 - \bar{\theta}_1); \\ \dot{\theta}_2 &= -\gamma e^3 x^2 - \alpha(\theta_2 - \bar{\theta}_2), \end{aligned} \quad (25)$$

где  $\gamma > 0; \alpha > 0; \bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2$  — параметры алгоритма. Для исследования работоспособности синтезированного адаптивного регулятора проверим условия теоремы. Условия 1, 2 выполнены в силу гладкости правых частей системы. Условие вы-

пуклости 3 выполнено вследствие линейности правой части (23) по настраиваемым параметрам. Выполнение условия 4 вытекает из (24) при  $\theta_1 = -ad, \theta_2 = a$ , при этом  $\rho = 4k > 0$ . Наконец, при проверке условия 5 условие согласованности (9) проверяется тривиально, и для справедливости утверждения теоремы остается потребовать ограниченности значений переменных параметров  $a(t), d(t)$  и скоростей их изменения.

## Заключение

Движение многих реальных объектов описывается существенно нелинейными и нестационарными моделями. Ряд подходов к управлению такими объектами основан на построении внутренней модели нестационарности [11, 12, 18]. Однако параметры модели нестационарности могут меняться в широких пределах, что может привести к дополнительным погрешностям. В данной работе предполагается лишь, что скорость изменения параметров объекта ограничена, при этом начальная неопределенность может быть достаточно велика. Исследованы алгоритмы адаптивного управления для систем с явной эталонной моделью, синтезированные методом скоростного градиента, и показано, что при достаточно медленных изменениях параметров и малой начальной неопределенности предельная ошибка в системе может быть сделана сколь угодно малой. Синтез адаптивного регулятора проиллюстрирован примером.

Полученные результаты естественным образом могут быть распространены на задачи распределенного управления многоагентными системами. В зависимости от выбора целевой функции при синтезе алгоритма управления разработанные алгоритмы управления могут учитывать или не учитывать взаимодействие между агентами.

## Финансовая поддержка

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 17-08-01728.

## Литература

1. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. *Адаптивное управление динамическими объектами*. М., Наука, 1981. 448 с.
2. Тимофеев А. В. *Построение адаптивных систем управления программным движением*. Л., Энергия, 1980. 88 с.

3. Деревицкий Д. П., Фрадков А. Л. *Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления*. М., Наука, 1981. 216 с.
4. Борцов Ю. А., Поляхов Н. Д., Путов В. В. *Электро-механические системы с адаптивным и модальным управлением*. Л., Энергоатомиздат, 1984. 216 с.
5. Цыкунов А. М. *Адаптивное управление объектами с последействием*. М., Наука, 1984. 239 с.

6. **Фомин В. Н.** *Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация*. М., Наука, 1984. 288 с.
7. **Фрадков А. Л.** *Адаптивное управление в сложных системах*. М., Наука, 1990. 292 с.
8. **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** *Нелинейное и адаптивное управление в сложных динамических системах*. СПб., Наука, 2000. 562 с.
9. **Никифоров В. О.** *Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений*. СПб., Наука, 2003. 282 с.
10. **Тюкин И. Ю., Терехов В. А.** *Адаптация в нелинейных динамических системах*. М., УРСС, 2008. 384 с.
11. **Цыкунов А. М.** *Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу*. М., Физматлит, 2009. 268 с.
12. **Бобцов А. А.** *Адаптивное и робастное управление неопределенными системами по выходу*. СПб., Наука, 2011. 174 с.
13. **Амелина Н. О., Ананьевский М. С., Андриевский Б. Р., Граничин О. Н., Джунусов И. А., Матвеев А. С., Проксурников А. В., Пчёлкина И. В., Селиванов А. А., Фрадков А. Л., Фридман Э. М., Фуртат И. Б.** *Проблемы сетевого управления/* под ред. А. Л. Фрадкова. М.-Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2015. 392 с.
14. **Astrom K. J., Wittenmark B.** *Adaptive control*. Courier Corporation, 2013. 574 p.
15. **Marino R., Tomei P.** Robust adaptive state-feedback tracking for nonlinear systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1998, vol. 43, pp. 84–89. doi:10.1109/9.654892
16. **Marino R., Tomei P.** An adaptive output feedback control for a class of nonlinear systems with time-varying parameters. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1999, vol. 44, iss. 11, pp. 2190–2194. doi:10.1109/9.802943
17. **Ge S. S., Wang J.** Robust adaptive tracking for time-varying uncertain nonlinear systems with unknown control coefficients. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2003, vol. 48, iss. 8, pp. 1463–1469. doi:10.1109/TAC.2003.815049
18. **Wang C., Lin Y.** Decentralized adaptive tracking control for a class of interconnected nonlinear time-varying systems. *Automatica*, 2015, vol. 54, pp. 16–24. doi:10.1016/j.automatica.2017.03.010
19. **Huang J., Wang W., Wen C., Zhou J.** Adaptive control of a class of strict-feedback time-varying nonlinear systems with unknown control coefficients. *Automatica*, 2018, vol. 93, pp. 98–105. doi:10.1016/j.automatica.2018.03.061
20. **Meza-Aguilar M., Loukianov A. G., Rivera J.** Sliding mode adaptive control for a class of nonlinear time-varying systems. *Intern. J. Robust and Nonlinear Control*, 2019, vol. 29, iss. 3, pp. 766–778. doi:10.1002/rnc.4319
21. **Marino R., Tomei P.** Global adaptive output-feedback control of nonlinear-systems. Part II: Nonlinear Parameterization. *IEEE Trans. Automat. Control.*, 1993, vol. 38, iss.1, pp. 33–48. doi:10.1109/9.186309
22. **Karsenti L., Lamnabhi-Lagarrigue F., Bastin G.** Adaptive control of nonlinear systems with nonlinear parameterization. *Systems & Control Letters*, 1996, vol. 27, iss. 2, pp. 87–97. doi:10.1016/S1474-6670(17)57975-6
23. **Chen W., Anderson B. D. O.** A combined multiple model adaptive control scheme and its application to nonlinear systems with nonlinear parameterization. *IEEE Trans. Automat. Control*, 2012, vol. 57, iss. 7, pp. 1778–1782. doi:10.1109/TAC.2011.2176162
24. **Asadi M., Shandiz H. T.** Adaptive control of pure-feedback systems with nonlinear parameterization via time-scale separation. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2017, vol. 15, iss. 1, pp. 196–204. doi:10.1007/s12555-015-0274-x
25. **Wang H., Zhu Q.** Adaptive output feedback control of stochastic nonholonomic systems with nonlinear parameterization. *Automatica*, 2018, vol. 98 (12), pp. 247–255. doi:10.1016/j.automatica.2018.09.026
26. **Farza M., M'Saad M., Maatoug T., Kamoun M.** Adaptive observers for nonlinearly parameterized class of nonlinear systems. *Automatica*, 2009, vol. 45, iss. 10, pp. 2292–2299. doi:10.1016/j.automatica.2009.06.008
27. **Khalil H. K., Praly L.** High-gain observers in nonlinear feedback control. *Internat. J. Robust and Nonlinear Control*, 2014, vol. 24, iss.6, pp. 993–1015. doi:10.1002/rnc.3051
28. **Ekramian M., Sheikholeslam F., Hosseinnia S., Yazdanpanah M. J.** Adaptive state observer for Lipschitz nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 2013, vol. 62, iss. 4, pp. 319–323. doi:10.1016/j.sysconle.2013.01.002
29. **Rios H., Efimov D., Perruquetti W.** An adaptive sliding-mode observer for a class of uncertain nonlinear systems. *Internat. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 2018, vol. 32, iss. 3, pp. 511–527. doi:10.1002/acs.2857
30. **Томчина О. П., Горлатов Д. В., Томчин Д. А., Свендицкая Т. А.** Алгоритм адаптивного управления механическими системами с неявной эталонной моделью и фильтрацией. *Информатика и системы управления*, 2018, № 3 (57), с. 124–130.



UDC 681.5

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-37-44

**Adaptive control of time-varying non-linear plants by speed-gradient algorithms**O. P. Tomchina<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-6109-2143D. N. Polyakhov<sup>b</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-4134-0189O. I. Tokareva<sup>c</sup>, Associate Professor, orcid.org/0000-0003-4656-3151A. L. Fradkov<sup>d,e</sup> Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-5633-0944, fradkov@mail.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, Vtoraya Krasnoarmeiskaya St., 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politechnicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>c</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya St., 198035, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>d</sup>Saint-Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Emb., 199034, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>e</sup>Institute for Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bol'shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The motion of many real world systems is described by essentially non-linear and non-stationary models. A number of approaches to the control of such plants are based on constructing an internal model of non-stationarity. However, the non-stationarity model parameters can vary widely, leading to more errors. It is only assumed in this paper that the change rate of the object parameters is limited, while the initial uncertainty can be quite large. **Purpose:** Analysis of adaptive control algorithms for non-linear and time-varying systems with an explicit reference model, synthesized by the speed gradient method. **Results:** An estimate was obtained for the maximum deviation of a closed-loop system solution from the reference model solution. It is shown that with sufficiently slow changes in the parameters and a small initial uncertainty, the limit error in the system can be made arbitrarily small. Systems designed by the direct approach and systems based on the identification approach are both considered. The procedures for the synthesis of an adaptive regulator and analysis of the synthesized system are illustrated by an example. **Practical relevance:** The obtained results allow us to build and analyze a broad class of adaptive systems with reference models under non-stationary conditions.

**Keywords** — adaptive system, reference model, non-linear and time-varying systems, speed gradient method, direct approach, identification approach.

**For citation:** Tomchina O. P., Polyakhov D. N., Tokareva O. I., Fradkov A. L. Adaptive control of time-varying non-linear plants by speed-gradient algorithms. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 37–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-37-44

**References**

1. Fomin V. N., Fradkov A. L., Yakubovich V. A. *Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi ob'ektami* [Adaptive control of dynamic objects]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 448 p. (In Russian).
2. Timofeev A. V. *Postroenie adaptivnykh sistem upravleniya programmnykh dvizheniy* [Construction of adaptive software motion control systems]. Leningrad, Energia Publ., 1980. 88 p. (In Russian).
3. Derevitsky D. P., Fradkov A. L. *Prikladnaya teoriya diskretnykh adaptivnykh sistem upravleniya* [Applied theory of discrete adaptive control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 216 p. (In Russian).
4. Bortsov Yu. A., Polyakhov N. D., Putov V. V. *Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nykh upravleniyem* [Electromechanical systems with adaptive and modal control]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984. 216 p. (In Russian).
5. Tsykunov A. M. *Adaptivnoe upravlenie ob'ektami s posledejstviiem* [Adaptive control of retarded plants]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 230 p. (In Russian).
6. Fomin V. N. *Rekurrentnoe ocenivanie i adaptivnaya fil'traciya* [Recurrent estimation and adaptive filtering]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 288 p. (In Russian).
7. Fradkov A. L. *Adaptivnoe upravlenie v slozhnykh sistemakh* [Adaptive control in complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 292 p. (In Russian).
8. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie v slozhnykh dinamicheskikh sistemakh* [Nonlinear and adaptive control in complex dynamic systems]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2000. 562 p. (In Russian).
9. Nikiforov V. O. *Adaptivnoe i robustnoe upravlenie s kompensatsiej vozmushchenij* [Adaptive and robust control with compensation of disturbances]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2003. 282 p. (In Russian).
10. Tyukin I. Yu., Terekhov V. A. *Adaptatsiya v nelinejnykh dinamicheskikh sistemakh* [Adaptation in nonlinear dynamic systems]. Moscow, URSS Publ., 2008. 384 p. (In Russian).
11. Tsykunov A. M. *Adaptivnoe i robustnoe upravlenie dinamicheskimi ob'ektami po vyhodu* [Adaptive and robust output feedback control of dynamic plants]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 268 p. (In Russian).
12. Bobtsov A. A. *Adaptivnoe i robustnoe upravlenie neodrelennymi sistemami po vyhodu* [Adaptive and robust output feedback control of uncertain systems]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2011. 174 p. (In Russian).
13. Amelina N. O., Ananyevskiy M. S., Andrievskiy B. R., Granichin O. N., Dzhunusov I. A., Matveev A. S., Proskurnikov A. V., Pcholkina I. V., Selivanov A. A., Fradkov A. L., Fridman E. M., Furtat I. B. *Problemy setevogo upravleniya* [Network control problems]. Ed. A. L. Fradkov. Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2015. 392 p. (In Russian).
14. Astrom K. J., Wittenmark B. *Adaptive control*. Courier Corporation Publ., 2013. 574 p.
15. Marino R., Tomei P. Robust adaptive state-feedback tracking for nonlinear systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1998, vol. 43, pp. 84–89. doi:10.1109/9.654892
16. Marino R., Tomei P. An adaptive output feedback control for a class of nonlinear systems with time-varying parameters. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1999, vol. 44, iss. 11, pp. 2190–2194. doi:10.1109/9.802943
17. Ge S. S., Wang J. Robust adaptive tracking for time-varying uncertain nonlinear systems with unknown control coefficients. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2003, vol. 48, iss. 8, pp. 1463–1469. doi:10.1109/TAC.2003.815049
18. Wang C., Lin Y. Decentralized adaptive tracking control for a class of interconnected nonlinear time-varying systems. *Automatica*, 2015, vol. 54, pp. 16–24. doi:10.1016/j.automatica.2017.03.010
19. Huang J., Wang W., Wen C., Zhou J. Adaptive control of a class of strict-feedback time-varying nonlinear systems with unknown control coefficients. *Automatica*, 2018, vol. 93, pp. 98–105. doi:10.1016/j.automatica.2018.03.061

20. Meza-Aguilar M., Loukianov A. G., Rivera J. Sliding mode adaptive control for a class of nonlinear time-varying systems. *Intern. J. Robust and Nonlinear Control*, 2019, vol. 29, iss. 3, pp. 766–778. doi:10.1002/rnc.4319
21. Marino R., Tomei P. Global adaptive output-feedback control of nonlinear systems. Part II. Nonlinear Parameterization. *IEEE Trans. Automat. Control.*, 1993, vol. 38, iss. 1, pp. 33–48. doi:10.1109/9.186309
22. Karsenti L., Lamnabhi-Lagarrigue F., Bastin G. Adaptive control of nonlinear systems with nonlinear parameterization. *Systems & Control Letters*, 1996, vol. 27, iss. 2, pp. 87–97. doi:10.1016/S1474-6670(17)57975-6
23. Chen W., Anderson B. D. O. A combined multiple model adaptive control scheme and its application to nonlinear systems with nonlinear parameterization. *IEEE Trans. Automat. Control*, 2012, vol. 57, iss. 7, pp. 1778–1782. doi:10.1109/TAC.2011.2176162
24. Asadi M., Shandiz H. T. Adaptive control of pure-feedback systems with nonlinear parameterization via time-scale separation. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2017, vol. 15, iss. 1, pp. 196–204. doi:10.1007/s12555-015-0274-x
25. Wang H., Zhu Q. Adaptive output feedback control of stochastic nonholonomic systems with nonlinear parameterization. *Automatica*, 2018, vol. 98 (12), pp. 247–255. doi:10.1016/j.automatica.2018.09.026
26. Farza M., M'Saad M., Maatoug T., Kamoun M. Adaptive observers for nonlinearly parameterized class of nonlinear systems. *Automatica*, 2009, vol. 45, iss. 10, pp. 2292–2299. doi:10.1016/j.automatica.2009.06.008
27. Khalil H. K., Praly L. High-gain observers in nonlinear feedback control. *Internat. J. Robust and Nonlinear Control*, 2014, vol. 24, iss. 6, pp. 993–1015. doi:10.1002/rnc.3051
28. Ekramian M., Sheikholeslam F., Hosseinnia S., Yazdanpanah M. J. Adaptive state observer for Lipschitz nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 2013, vol. 62, iss. 4, pp. 319–323. doi:10.1016/j.sysconle.2013.01.002
29. Rios H., Efimov D., Perruquetti W. An adaptive sliding-mode observer for a class of uncertain nonlinear systems. *Internat. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 2018, vol. 32, iss. 3, pp. 511–527. doi:10.1002/acs.2857
30. Tomchina O. P., Gorlatov D. V., Tomchin D. A., Svetsitskaya T. A. Adaptive control algorithm for mechanical systems with implicit reference model and filtration. *Information Science and Control Systems*, 2018, no. 3 (57), pp. 124–130 (In Russian).

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле вверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>

## О моделях организации хранения и использования научных данных: основные принципы, процессы и механизмы

Ю. И. Шокин<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, академик РАН, [orcid.org/0000-0002-5178-8294](https://orcid.org/0000-0002-5178-8294), [dir@ict.nsc.ru](mailto:dir@ict.nsc.ru)  
А. В. Юрченко<sup>а</sup>, канд. физ.-мат. наук, первый заместитель директора, [orcid.org/0000-0001-6435-1975](https://orcid.org/0000-0001-6435-1975), [yurchenko@ict.nsc.ru](mailto:yurchenko@ict.nsc.ru)

<sup>а</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Академика Лаврентьева пр., 6, Новосибирск, 630090, РФ

**Введение:** проблемы организации хранения и использования научных данных усложняются с ростом их количества и разнообразия, при этом научные данные обладают рядом особенностей, не позволяющих полностью переносить на них подходы и инструменты, используемые в коммерческих и государственных структурах, работающих с данными. Обеспечение исследователей специализированными средствами для оперирования с данными — актуальная задача организации научных исследований. **Цель:** выявление и описание основных принципов работы с научными данными, процессов и этапов этой работы, механизмов реализации принципов и решений задач организации хранения и использования научных данных. **Результаты:** рассмотрены и описаны принципы, на которых может основываться хранение и использование научных данных, в том числе FAIR Data Principles. Основная цель организации работы с научными данными и центральный фокус принципов — эффективное использование и переиспользование научных данных. Представлена иерархия механизмов, которые могут применяться при работе с научными данными для решения научных и организационных задач. Перечислены основные процессы / этапы жизненных циклов научных данных и процессов исследований, основанных на них. Рассмотрен ряд принятых моделей таких жизненных циклов. Предлагается вместо попытки построить универсальную модель использовать или создавать модели на основе представленного списка этапов под конкретные случаи или классы задач исследований, основанных на данных. **Практическая значимость:** сформированная в работе иерархия классов понятий для области «организация хранения и использования научных данных» будет использована как ядро соответствующей онтологии и при разработке нормативных документов, рекомендаций и информационных систем поддержки научных исследований, основанных на данных.

**Ключевые слова** — научные данные, основанные на данных научные исследования, FAIR Data Principles, управление данными, жизненный цикл научных данных, научная информационная система.

**Для цитирования:** Шокин Ю. И., Юрченко А. В. О моделях организации хранения и использования научных данных: основные принципы, процессы и механизмы. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 45–54. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-45-54

**For citation:** Shokin Yu. I., Yurchenko A. V. Models of organizing research data storage and usage: basic principles, processes and implementation mechanisms. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 45–54 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-45-54

### Введение

Начнем с того, что под *научными данными* будем понимать любые данные в цифровом виде, генерируемые в ходе научных исследований и (или) используемые в них. Настоящая работа является продолжением исследований авторов в области организации и обеспечения технологиями и средствами научных исследований, основанных на использовании данных и цифровизации науки в целом.

Научные данные стали одним из важнейших источников получения новых знаний. Объемы этих данных постоянно растут. Возникают и растут также потребности в организации их хранения и использования. Эта проблема активно обсуждается на разных уровнях международного научного сообщества уже более 10 лет [1], но каких-то единых решений не найдено и, вероятно, не будет найдено. В России это направление разрабатывается не так активно, отчасти ввиду

того, что российские исследователи долгое время пользовались устаревшей материально-технической базой, состоявшей в основном из аналогового оборудования. Но примерно с 2006 года материальную базу российских исследований начали активно обновлять, и в настоящее время она состоит уже преимущественно из цифровых приборов, т. е. приборов, выдающих результаты в виде цифровых данных. Соответственно, активизировалась и деятельность по организации работы с этими данными. Эту тему поднимает обзор [2], в котором ставится проблема управления научными данными и участия в ней научно-технических библиотек, проводится ее анализ и рассмотрены организационные подходы к ее решению, используемые в международном сообществе.

Активное развитие междисциплинарных исследований, методов работы с большими данными, примеры решения при этом совершенно новых либо представлявшихся ранее практически нерешаемыми задач с помощью анализа больших



данных (например, компьютерной диагностики рака [3]) или интеграции данных, происходящих из разных областей наук (например, географических, метеорологических, экологических и медицинских в задачах анализа заболеваемости [4]) заставляют искать пути и создавать инструменты для интеграции разнородных научных данных из различных источников. Актуальность проблемы повышают и не до конца раскрытые и использованные перспективы извлечения именно из разнородных научных данных новых неявных закономерностей либо выявления артефактов, которые могут дать новые представления об окружающем нас мире и нашем месте в нем. Задачи интеграции, которые выводят проблему организации работы с научными данными на новый уровень, решить одновременно не представляется возможным. Необходимо применить итерационный подход к обеспечению исследователей инструментами для такой интеграции данных.

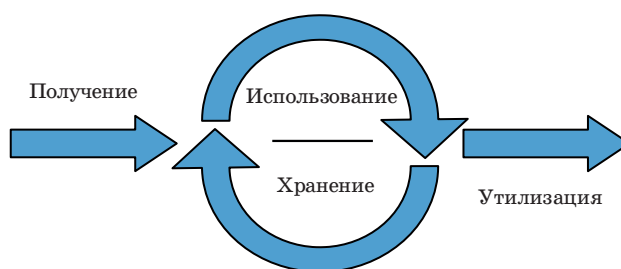
В работе [5] авторами предложена концепция построения информационной системы для поддержки исследований, основанных на данных, в работе [6] идеи развивались в направлении разработки архитектуры и проработки конкретных программных решений для такой системы.

Здесь будет уточнен и расширен понятийный аппарат и исследованы модели организации хранения и использования научных данных, в том числе на основе анализа опыта зарубежных коллег.

### Особенности научных данных и задача моделирования их жизненного цикла

Рассматривая в качестве миссии своих исследований и разработок обеспечение исследователей средствами для работы с научными данными, мы двигаемся к достижению возникающих в рамках этой миссии целей с двух сторон: с одной стороны, практически реализуя и предоставляя исследователям конкретные инструменты [6, 7], с другой стороны, обобщая имеющийся опыт и накопленные знания в предметной области для того, чтобы создавать теоретический базис этой деятельности [5, 8, 9]. Цель настоящей работы состоит в построении концептов верхнего уровня деятельности по организации работы с научными данными.

На работу с научными данными распространяются основные подходы, используемые при работе с любыми другими данными, и, так или иначе, она вращается вокруг циклов «получение — хранение — использование — утилизация» (рис. 1). Однако научные данные и работа с ними обладают рядом особенностей, совокупность которых и заставляет формулировать подходы и строить системы для организации их хранения и использо-



■ **Рис. 1.** Максимально упрощенная концептуальная схема работы с данными

■ **Fig. 1.** Simple conceptual scheme of common data lifecycle

вания, несколько отличные от принятых в других отраслях.

Основные особенности данных.

1. *Множественность источников данных.* Каждая современная исследовательская единица в любой стране: единичный ученый, группа, лаборатория, институт и т. д. — генерируют научные данные.

2. *Неоднородность данных и их форматов.* Эта особенность является, в том числе, следствием предыдущей. Разнообразие источников данных, наличие множества областей знаний, при проведении исследований в которых генерируются и используются научные данные, индивидуальные особенности исследователей и используемого ими оборудования порождают многообразие видов научных данных и их форматов.

3. *Разное качество данных* с не всегда измеримыми и формализуемыми критериями и признаками — также одно из следствий множественности источников. Причиной может являться как неполное следование принятым методикам и стандартам измерений, так и их отсутствие, особенно в новых областях, где ведется активный научный поиск, и часто не фиксированы даже сами измеряемые характеристики. Конечно, немаловажен и человеческий фактор.

4. *Большие объемы данных* и при этом сложность или даже невозможность оценить перспективы их использования в дальнейшем и, тем более, получения с их помощью новых значимых научных результатов, особенно с учетом проблемы, обозначенной в предыдущем пункте.

Особенности работы с научными данными и происхождение этих особенностей.

1. *Необходимость обмениваться и делиться данными* — один из ключевых факторов, связанный с особенностями деятельности научного сообщества, его открытостью, необходимостью верификации результатов исследований как важнейшего процесса в рамках научного метода.

2. *Разнообразие и постоянное развитие методов и средств для анализа данных.* Методы ана-

лиза данных постоянно эволюционируют, исследователи обладают различными компетенциями, методами и средствами анализа данных, что означает, что из одних и тех же данных могут быть извлечены разные знания.

**3. Потребность в интеграции разнородных данных.** Нарастающая тенденция к объединению в единый объект исследования разнородных данных из разнородных источников, нетривиальные формы связанности данных (через предмет, объект, субъект исследований, через близость в пространстве / времени, по другим критериям), как следствие — необходимость одновременного анализа комплексов данных разных типов и происхождения.

**4. Необходимость использовать высокопроизводительные ресурсы.** Во многом — это следствие остальных перечисленных особенностей. Именно в науке с большими объемами и высокой интенсивностью генерации новых данных, со множеством неопределенностей, неясностей в отношении методов и средств решения задач (которые также выбираются в процессе научного поиска), в отношении источников данных (их нужно создавать, интегрировать, совершенствовать методики измерений / получения данных и т. д.) и, конечно, с потребностью совмещать сложные задачи анализа данных с не менее сложными и ресурсоемкими задачами компьютерного моделирования изучаемых процессов высокопроизводительные компьютерные ресурсы — важнейший инструмент научных исследований, основанных на данных.

В различных сочетаниях все перечисленные особенности могут быть характерны и для бизнес-данных, и для государственных данных, но полный комплекс свойственен именно научным данным.

Разработка модели организации хранения и использования (включая обмен и публикацию) научных данных, учитывающей перечисленные и другие особенности этих данных и работы с ними — цель настоящей работы и исследования в целом. Здесь определим ключевые сущности процесса работы с научными данными и виды их взаимодействия, рассмотрим различные модели жизненного цикла научных данных и основанных на них исследований, опишем основные процессы в рамках этих моделей, базовые принципы организации и управления научными данными, механизмы их реализации.

### Базовые классы понятий

Основной сущностью в рамках модели является понятие «научные данные», определение которого сформулировано в начале статьи. Но прежде

чем перечислять связанные с ними сущности и устанавливать их отношения, определим ряд фундаментальных, базовых классов сущностей / понятий.

В первую очередь нужно указать сопредельный класс / понятие, определяющее связь рассматриваемых данных с наукой, — это *научное исследование* (или просто *исследование*), под которым будем понимать процесс получения новых научных знаний с помощью научных методов. Упрощенная и детализированная схемы этого процесса в интересующем нас контексте приведены в работе [5]. Не вдаваясь глубоко в детализацию этого сложного класса понятий, установим три ключевых, связанных с научными исследованиями, понятия, которые будут являться основными точками соприкосновения (взаимодействия) этого класса с понятием «научные данные»:

— *объект исследований* — явление, процесс, объект или комплекс объектов, которые изучаются в ходе исследований;

— *субъект исследований* — лицо, группа лиц или другая, более сложная организационная структура, осуществляющая исследования; отдельных представителей класса обобщенно будем также называть *исследовательская единица*, или *исследователь*;

— *метод исследования* — определенная последовательность действий, приемов, операций, применяемая при научном исследовании.

Отметим, что практически все современные виды научных исследований так или иначе оперируют с научными данными либо используя их, либо генерируя их, либо и то и другое. Также необходимо добавить, что и научные знания в их объективизированной форме, т. е. записанные в виде текстов или иным способом, являются одним из особых видов научных данных.

Дальнейшее построение иерархии классов понятий будем осуществлять в рамках двух базовых троек классов (рис. 2):

1) *объект* — *субъект* — *действие*, в рамках которой, в частности:

— субъект совершает действие (над объектом);  
— объект подвергается воздействию, т. е. действию со стороны субъекта;

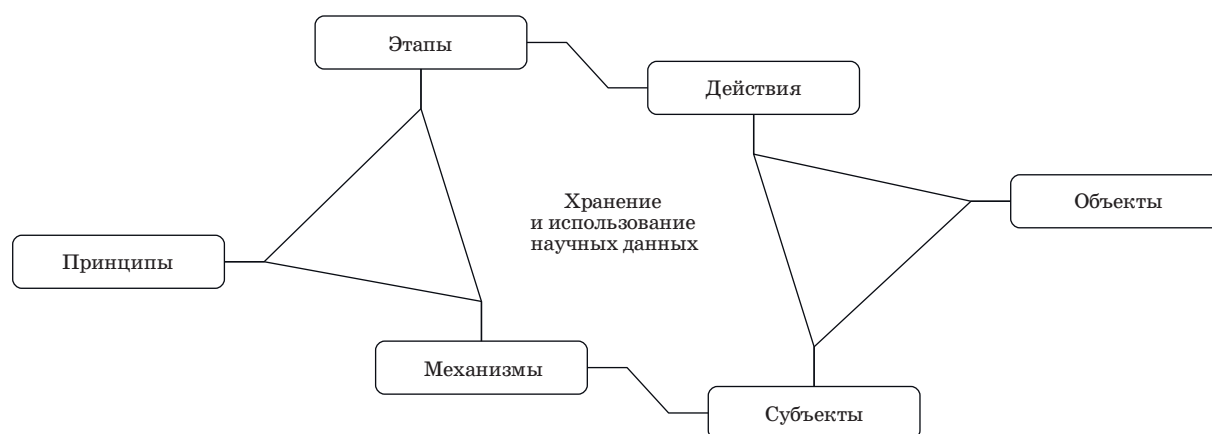
2) *принцип* — *механизм* — *этап* (процесс), в рамках которой, в частности:

— принцип реализуется через механизм;  
— механизм применяется на этапе.

Также установим важные связи между этими тройками:

— субъект применяет механизм;  
— действие совершается на этапе.

Хотя эти тройки классов являются достаточно общими, мы будем рассматривать их конкретизацию в контексте организации хранения и исполь-



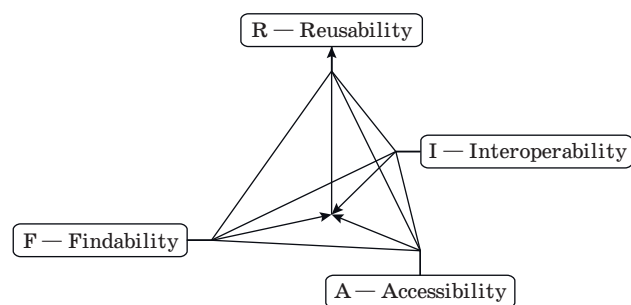
■ **Рис. 2.** Базовые концепты-классы организации хранения и использования научных данных  
 ■ **Fig. 2.** Basic concepts-classes of research data storage and usage organizing

зования научных данных и связанных с этим процессов. В настоящей работе остановимся на тройке «принцип — механизм — этап».

### Принципы

Начать детализацию базовых классов предлагается с принципов, так как их выбор во многом определяет структуру других классов.

Ключевые принципы организации хранения научных данных сформулированы международным научным сообществом под аббревиатурой FAIR: данные должны быть обнаружимы (findable), доступны (accessible), совместимы с множеством использующих их информационных систем и другого программного обеспечения (interoperable), «переиспользуемы» (reusable) [10]. В настоящее время актуальные документы и состояние вопроса (state-of-art) можно найти на сайте GO FAIR Initiative [11]. Разберем принципы FAIR.



■ **Рис. 3.** Целеустремленная система принципов организации работы с научными данными FAIR Data Principles  
 ■ **Fig. 3.** FAIR Data Principles as a goal-driven system of research data organizing principles

*F — Findable.* Для того чтобы использовать существующие данные, их нужно найти. Чтобы это было легко сделать, GO FAIR Initiative предлагает:

- ассоциировать с данными глобально уникальный и устойчивый идентификатор (такой как DOI [12]);
- снабжать данные богатыми метаданными / описанием;
- устанавливать четкую связь между метаданными и данными, включая в метаданные идентификатор данных;
- размещать метаданные на индексируемых ресурсах с возможностью поиска.

*A — Accessible.* И данные, и метаданные должны быть достижимы и доступны для получения по стандартизованным (открытым, свободным и универсальным, поддерживающим аутентификацию и авторизацию) протоколам, а метаданные должны быть доступны, даже если сами данные уже недоступны.

*I — Interoperable.* Данные объединяются (интегрируются), анализируются, хранятся и обрабатываются различными приложениями, сервисами, системами. Чтобы это было возможно, нужно:

- использовать достаточно формализованный, общедоступный и общеизвестный, широко используемый язык для описания и представления данных и метаданных;
- использовать словари, соответствующие принципам FAIR (отметим, подобные вложенности / рекурсии могут вызывать коллизии при формальном, в том числе машинном, анализе);
- включать в данные и метаданные «квалифицированные» ссылки на другие данные и метаданные, т. е. такие ссылки, которые будут формализовать вид связи, а не просто указывать на ее наличие (это должно позволить строить во-



круг данных своеобразные семантические сети, по аналогии с SemanticWeb [13]).

*R — Reusable.* Основная цель FAIR — оптимизация переиспользования данных. Именно ей и принципу «переиспользуемости» подчиняются остальные принципы FAIR (поэтому на рис. 3 они изображены в виде пирамиды). В дополнение к ним, для максимизации эффективности использования научных данных, предлагается сконцентрироваться на качественном описании и атрибутировании данных, в частности:

- выпускать данные в сопровождении понятной и доступной лицензии на использование;

- подробно описывать (или указывать) происхождение данных;

- соответствовать стандартам и рекомендациям сообщества в соответствующей области знаний.

Здесь необходимо отметить, что возникает очень тонкая грань между элементами иерархии принципов и механизмами (их реализации). Так, принципы F, A и I детализируют принцип R, раскрывая часть механизмов для его реализации. Этой же цели соответствуют ключевые установки для информационно-аналитической системы поддержки научных исследований, основанных на интенсивном использовании цифровых данных, сформулированные в работе [5]. Упомянем те из них, которые дополняют принципы FAIR или механизмы их реализации (описанные в детализации этих принципов).

*Usability@Top* — удобство использования превыше всего. Установка ориентирует на обеспечение исследователей как тех, кто планирует использование чужих данных, так и тех, кто делится своими данными, необходимыми для этого инструментами, отдавая приоритет простоте и удобству использования.

*StoreEverything, IntegrateData, CombineResources* — хранение всех видов данных, интеграция данных и комбинирование ресурсов для снабжения исследователей инструментами для построения различных сложных коллекций данных и их совместного анализа с использованием всех доступных вычислительных ресурсов.

*UseEverythingKnown* — использовать при работе с данными (например, при формировании коллекций и подборе аналитических инструментов для работы с ними) всю возможную (доступную) информацию. Кроме прочего, эта установка расширяет виды хранимой информации дополнительными метаданными, предназначенными для выбора инструментов (программ, сервисов) для работы (анализа и обработки) с различными типами данных.

*FromPrivate2Public* — с одной стороны, это форма принципа A (accessibility), включающая вопросы аутентификации и авторизации, обеспе-

чения конфиденциальности хранимых данных, с другой стороны — это установка на реализацию принципа открытости, который естественно дополняет другие принципы, направленные на реализацию принципа переиспользуемости: чтобы научные данные можно было эффективно переиспользовать, они должны быть открытыми [14, 15].

*EnlightFromAnywhere* и *OntologizeAll* — собирать всю информацию из всех доступных источников для построения и постоянного расширения и уточнения семантической сети вокруг данных: как их отдельных экземпляров, так и коллекций данных и даже всей доступной совокупности научных данных. Эта установка указывает, что нужно не только создавать возможности для построения семантических сетей вокруг научных данных, но и строить их, чтобы можно было использовать их при формировании коллекций данных, подборе инструментов для работы с ними [5].

## Этапы и процессы

Детализацию класса этапы организации хранения и использования научных данных начнем с описания (выбора) жизненного цикла научных данных. В настоящее время нет какой-то общепринятой модели жизненного цикла научных данных или исследовательских проектов, основанных на использовании данных. Свои модели сформировали различные научные организации и сообщества. Чаще всего — это библиотеки университетов и научных организаций, что накладывает свой отпечаток на модели: они ориентированы больше на привычные для библиотек задачи сбора, сохранения и предоставления доступа к данным, организацию их каталогизации и цитирования. Одной из таких моделей является модель управления жизненным циклом информации [16], где основной упор сделан именно на проработку документальных источников, подготовку и публикацию документов, сопровождающих данные. Также это модели Библиотеки Наньянского технологического университета *NTU Library* (<https://blogs.ntu.edu.sg/lib-datamanagement/data-lifecycle/>), американской Национальной сети библиотек в области медицины *NNLM* (<https://nnlm.gov/data/data-life-cycles>), Библиотеки Университета Карнеги — Меллона *CMU Library* (<https://library.cmu.edu/datapub/dms/data/101>), Библиотеки Университета штата Вирджиния *UVA Library* (<https://data.library.virginia.edu/data-management/lifecycle/>). Большинство из них оперируют пятью базовыми стадиями-этапами жизненного цикла научных данных в различных вариациях: планирование — получение данных — обработка / ана-

лиз — сохранение — переиспользование, — по-разному раскрывая некоторые из них и формируя в них циклы. Схожая с названными выше модель предложена DDI Alliance (<http://www.ddialliance.org/training/why-use-ddi>). Американское географическое общество USGS представило нециклическую шестиэтапную модель, заканчивающую жизненный цикл работы с научными данными публикацией (см. [17], <https://www.usgs.gov/products/data-and-tools/data-management/>), имеющую, однако, отдельные уровни / слои для задач описания данных, управления их качеством и обеспечения информационной безопасности. В модели, представленной и используемой Data Observation Network for Earth's (DataONE, <https://www.dataone.org/data-life-cycle>), в отдельные этапы выделены задачи проверки данных (assure), их описания (describe) и интеграции (integrate). Выделение задачи проверки качества данных — важный шаг в направлении создания хранилищ и управления научными данными из разных источников, в том числе недоверенных, а задача интеграции данных необходима для обеспечения исследователей новыми возможностями, возникающими при анализе сложных комплексов разнородных данных из различных источников [5]. Более сложная и многослойная модель предложена Digital Curation Centre DCC (<http://www.dcc.ac.uk/resources/curation-lifecycle-model>), которая концентрируется вокруг задачи управления (курирования) данными, в этом смысле являющаяся наиболее полной из рассматриваемых, однако использованию данных в этой модели выделен только один блок (доступ / использование / переиспользование) из более чем 10; в их модели появляется важный этап — dispose, т. е. удаление / избавление от данных, который тесно связан с задачами оценки качества и отбора данных.

Число моделей жизненного цикла научных данных давно превысило 50. Комитет по спутниковым системам для наблюдения за Землей (Committee on Earth Observation Satellites — CEOS) делал несколько версий обзоров различных моделей, с версией 1.2 можно ознакомиться в отчете [18]. Обзоры с классификацией и критическим анализом ряда моделей жизненных циклов исследований и управления научными данными можно найти в работах [19 и 1].

Большинство упомянутых моделей жизненного цикла научных данных и основанных на них исследований так или иначе состоят из схожих этапов / процессов, по-разному выстраивая их в цепочки, организуя общий и внутренние циклы, а также параллельные процессы. Отметим, что существующее многообразие моделей заставляет осознать, что какой-либо общей модели нет и вряд ли целесообразно пытаться ее строить, что особенности исследовательских процессов

таковы, что в каждом отдельном случае, в каждом проекте или научной задаче возникают собственные последовательности действий с данными. Однако все они так или иначе содержат и укладываются в четыре основные стадии: получение — сохранение и использование — избавление (удаление), — что соответствует максимально обобщенному жизненному циклу любого продукта.

Для дальнейшей детализации класса перечислим по возможности все этапы и процессы в ходе работы с научными данными.

1. Получение — процесс «возникновения» данных на стороне их источника. «Возникновение» здесь в кавычках, так как данные уже могли существовать в источнике (например, в системе хранения) и в рамках этого процесса могли быть предъявлены их соискателю, но в то же время они могли быть сгенерированы с помощью сенсоров / детекторов / компьютерного моделирования и др.

2. Сбор — процесс сбора или агрегации данных из разных источников для последующей работы с ними.

3. Размещение, соответственно, в системах хранения данных.

4. Проверка качества — процесс, в ходе которого выполняется своеобразное исследование данных на предмет соответствия требованиям или ожиданиям. Во время проверки качества могут быть проведены:

— оценка качества — т. е. присвоение некоторой исчислимой характеристики (в том числе вектора характеристик) качеству данных;

— ранжирование — т. е. определение «места» среди аналогов на основе полученной оценки.

5. Описание — снабжение данных метаданными, в том числе произвольным текстовым описанием.

6. Типизация — отнесение данных к какому-либо известному типу данных и привязка к соответствующим инструментам обработки и анализа.

7. Связывание — построение связей данных с другими данными, в том числе с документами, статьями, отчетами и пр., а также с иными объектами и субъектами, например, с получившими их исследователями или с оборудованием, на котором они были получены, методами обработки и анализа и др.<sup>1</sup>

8. Организация — встраивание в существующий комплекс всех данных на основе построенных связей.

<sup>1</sup>Связывание с методами может происходить, например, путем отнесения к определенному классу данных, для которых уже установлены связи с методами обработки и анализа, т. е. в рамках типизации.

9. Сохранение — процесс, в рамках которого обеспечивается сохранность данных (включая их целостность).

10. Поиск — процесс получения точного указателя на конкретные данные или наборы данных, соответствующих критериям поиска.

11. Комбинирование — процесс построения коллекций (наборов, комбинаций, комплексов) данных по заданным критериям. Критериями могут быть как прямое указание на объекты данных, так и различные фильтры, а сами коллекции могут быть как неупорядоченными, так и упорядоченными или смешанными.

12. Выбор методов обработки — процесс, результатом которого является метод (комплекс методов) для обработки данных.

13. Обработка — процесс, в рамках которого данные преобразуются в другие данные, которые, например, удобнее использовать для последующего анализа.

14. Выбор методов анализа — аналогично п. 12 для анализа данных.

15. Анализ — процесс, результатом которого является некоторое новое знание об объекте или субъекте исследования, к которым относятся данные, или о самих данных.

16. Интеграция — комплексный процесс выбора или составления коллекции данных и методов (технологии) их совместной обработки / анализа, результаты которых невозможно получить без такой совместной обработки / анализа (т. е. при раздельном анализе элементов коллекции).

17. Обеспечение доступа — комплекс мер, позволяющий соискателю данных получить их непосредственно либо указать используемому для их обработки или анализа сервису, где и как их взять.

18. Изучение ограничений на передачу данных третьим лицам, ограничения могут быть связаны с действием юридических и этических законов и норм, а также с учетом прав первенства и коммерческой тайны.

19. Организация обмена — обеспечение доступа к данным избранному (указанному непосредственно или в форме критерия) кругу «третьих лиц» (например, из другой по отношению к владельцу данных научной организации / лаборатории).

20. Публикация — обеспечение доступа к данным произвольному кругу «третьих лиц».

21. Цитирование — процесс указания на использование данных при подготовке отчета, публикации или иной научной работы.

22. Утилизация — процесс уничтожения данных, например, по заданному критерию, такому, как оценка востребованности, качества или соответствующий рейтинг.

Здесь опущены этапы планирования, так как они относятся не непосредственно к работе с дан-

ными, а, в большей степени, к организации исследований и экспериментов в целом.

Комбинирование перечисленных этапов в циклы деятельности в соответствии с целями и задачами исследования — это один из механизмов организации хранения и использования научных данных, которым посвящен следующий раздел.

## Механизмы

Очень важно, чтобы для каждого принципа существовали механизмы его реализации и каждому этапу / процессу также соответствовал хотя бы один механизм, реализуемый в рамках этого этапа / процесса.

Механизмы разнесем на три уровня: два инструментальных — аппаратный и программный (который далее может быть разделен на уровень платформы и уровень приложений), а также организационно-методический. Инструментальный уровень доступен пользователям (участникам процесса работы с научными данными) в виде информационных систем и сервисов, их детализация подробнее представлена в работах [5, 6].

Рассмотрим механизмы *организационно-методического уровня*. В первую очередь — это документы, регулирующие деятельность по организации хранения и использования научных данных: политики, регламенты, инструкции, рекомендации, лучшие практики, — которые образуют *регуляторный класс*.

Политики — комплексы принципов, описанные в форме установок для участников процесса работы с научными данными. Политики могут быть направлены на разные частные цели, поэтому их может быть много. Примерами могут быть «Политика открытия данных», описывающая, при каких условиях и когда научные данные могут или должны быть открыты (опубликованы), или «Политика сохранения данных», аналогично определяющая условия сохранения и удаления (утилизации) данных. Политики базируются на принципах и направлены на их соблюдение и применение. Характерные связи для политики — «субъект придерживается политики», «действие соответствует политике», «принцип охватывается политикой».

Регламенты — своды правил, определяющих условия взаимодействия при использовании ресурсов (например, информационных систем, объектов данных и классов объектов данных). Пример — «Регламент использования информационной системы». Характерные связи для регламента — это «субъект соблюдает регламент», «субъект совершает действие по регламенту», «регламент разрабатывается в соответствии с политикой».



Инструкции — содержат описания последовательностей действий в тех или иных ситуациях, предусмотренных регламентами, направленными на решение конкретных классов задач. Пример — «Инструкция по размещению данных в системе». Характерные связи для инструкций — «субъект действует по инструкции».

Рекомендации — наборы советов о действиях, которые можно предпринять при возникновении тех или иных проблем, для решения конкретных задач. Пример — «Рекомендации по аннотированию данных и снабжению их метаданными». Характерная связь — «субъект выполняет рекомендацию».

Лучшие практики — формы инструкций, которые по итогам использования приводили к лучшим результатам в решении конкретной задачи, когда решение этой задачи не является однозначным. Пример — «Лучшая практика при комплексном анализе данных конкретного типа». Характерная связь — «субъект следует лучшей практике».

Другой подкласс, который включаем в организационно-методический уровень механизмов — *методический*, он состоит из технологий, методик, методов и алгоритмов. Экземпляры этого класса могут быть описаны в виде инструкций или лучших практик, реализованы в виде компьютерных программ, доступны в информационных системах или в форме информационно-вычислительных сервисов.

*Структурно-организационный* подкласс организационно-методического уровня класса механизмов включает схемы организации деятельности и процессов хранения и использования научных данных. Это, собственно, модели жизненных циклов данных, организационные структуры, схемы взаимодействия субъектов и объектов при работе с научными данными.

## Заключение

В работе описаны особенности научных данных и работы с ними, которые заставляют строить специальные модели, описывающие и определяющие способы и средства для эффективного использования таких данных, т. е. для получения на их основе максимального количества новых научных знаний.

Рассмотрены и описаны принципы, на которых может основываться организация хранения и использования научных данных. За основу приняты принципы FAIR [10], дополненные установками [5]. Принципы могут комбинироваться в различные политики. Придерживаясь тех или иных политик, исследователи, работающие с данными, особенно те, кто их генерирует, способствуют достижению целей политик, центральная из которых — эффективное использование и переиспользование научных данных. Представлена иерархия механизмов, которые могут применяться при работе с научными данными для решения научных и организационных задач. Перечислены основные процессы / этапы жизненных циклов научных данных и процессов исследований, основанных на них. Рассмотрен ряд принятых моделей таких жизненных циклов. Предлагается вместо попытки построить универсальную модель использовать или создавать модели на основе представленного списка этапов под конкретные случаи или классы задач исследований, основанных на данных.

Таким образом, построено ядро иерархии понятий для области знаний «организация хранения и использования научных данных», детализированное в части классов принципы, механизмы и этапы. Дальнейшие исследования будут направлены на детализацию классов понятий субъекты, объекты, действия и построение системы связей между элементами всей иерархии понятий.

## Литература

1. Сох А. М., Там W. A critical analysis of lifecycle models of the research process and research data management. *Aslib Journal of Information Management*, 2018, vol. 70, iss. 2, pp. 142–157. doi:10.1108/AJIM-11-2017-0251
2. Земсков А. И. Data Curation — хранение научных данных и обслуживание ими — новое направление деятельности библиотек. *Научные и технические библиотеки*, 2013, № 2, с. 85–101. [http://www.gpntb.ru/ntb/ntb/2013/2/ntb\\_2\\_10\\_2013.pdf](http://www.gpntb.ru/ntb/ntb/2013/2/ntb_2_10_2013.pdf) (дата обращения: 30.04.2019).
3. Мелдо А. А., Уткин Л. В., Моисеенко В. М. Алгоритмы диагностики XXI века. Искусственный интеллект в распознавании рака легкого. *Практическая онкология*, 2018, т. 19, № 3, с. 292–298. doi:10.31917/1903292
4. Лушнов М. С., Лушнов А. М., Липовицкая И. Н., Головина Е. Г., Ступишина О. М. Медицинская статистика и идентификация факторов риска для здоровья человека в пространстве биосферы. *Биосфера*, 2010, т. 2, № 1. <https://cyberleninka.ru/article/n/meditsinskaya-statistika-i-identifikatsiya-faktorov-riska-dlya-zdorovya-cheloveka-v-prostranstve-biosfery> (дата обращения: 30.04.2019).
5. Юрченко А. В. К концепции информационно-аналитической системы поддержки научных исследований, основанных на интенсивном использовании цифровых данных. *Вычислительные технологии*, 2017, т. 22, № 4, с. 105–120.
6. Городничев М. А., Комиссаров А. В., Можина А. В., Прочкин П. В., Рудыч П. Д., Юрченко А. В. Модели и проектные решения системы хранения и обработки исследовательских данных Ecclesia. *Вестник*

- ИГУ. Серия: Информационные технологии, 2018, т. 16, № 3, с. 87–104. doi:10.25205/1818-7900-2018-16-3-87-104
7. Юрченко А. В. О сервисном подходе к формированию и оценке востребованности киберинфраструктуры науки. *Информационные технологии*, 2018, т. 24, № 4, с. 219–232. doi:10.17587/it.24.219-232
  8. Шокин Ю. И., Федотов А. М., Барахнин В. Б. *Проблемы поиска информации*. М., Наука, 2010. 197 с.
  9. Федотов А. М., Леонова Ю. В. Требования к прототипу системы управления информационными ресурсами в распределенных информационных системах поддержки научных исследований. *Вычислительные технологии*, 2018, т. 23, № 5, с. 82–109. doi:10.25743/ICT.2018.23.5.008
  10. Wilkinson M. D., et al. The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 2016, vol. 3, article number: 160018. doi:10.1038/sdata.2016.18
  11. GO FAIR Initiative. <https://www.go-fair.org/fair-principles/> (дата обращения: 30.04.2019).
  12. Paskin N. *Digital Object Identifier (DOI®) System*. Encyclopedia of Library and Information Sciences. Third Edition. 2010. Available at: <http://www.doi.org/overview/080625DOI-ELIS-Paskin.pdf> (accessed 30 April 2019).
  13. *Towards the Semantic Web: Ontology-driven Knowledge Management*/ Ed. John Davies, Dieter Fensel and Frank van Harmelen. John Wiley & Sons, 2003. 312 p.
  14. Yozwiak N. L., Schaffner S. F., Sabeti P. C. Data sharing: Make outbreak research open access. *Nature*, 2015, vol. 518, iss. 7540, pp. 477–479. doi:10.1038/518477a
  15. Cutcher-Gershenfeld J., et al. Five ways consortia can catalyse open science. *Nature*, 2017, vol. 543, iss. 7647, pp. 615–617. doi:10.1038/543615a
  16. Allan R. *Virtual research environments. From portals to science gateways*. Chandos Publishing, Oxford, UK, 2009. 284 p.
  17. Faundeen J. L., Burley T. E., Carlino J. A., Govoni D. L., Henkel H. S., Holl S. L., Hutchison V. B., Martín E., Montgomery E. T., Ladino C. C., Tessler S., Zolly L. S. 2013. The United States Geological Survey Science Data Lifecycle Model. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 2013, 1265, 4 p. doi:10.3133/ofr20131265
  18. *Data Life Cycle Models and Concepts. CEOS Version 1.2*. 2012. Available at: <http://wgiss.ceos.org/dsig/whitepapers/Data%20Lifecycle%20Models%20and%20Concepts%20v12.docx> (accessed 30 April 2019).
  19. Wissik T., Durco M. Research data workflows: from research data lifecycle models to institutional solutions. *CLARIN 2015 Selected Papers, Linköping Electronic Conference Proceedings*, Annual Conference 2015, Wrocław, Poland, October 14–16, 2015, Linköping University Electronic Press, Linköpings universitet, 2015, pp. 94–107. Available at: <http://www.ep.liu.se/ecp/123/008/ecp15123008.pdf> (accessed 30 April 2019).

UDC 005, 004.62

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-45-54

**Models of organizing research data storage and usage: basic principles, processes and implementation mechanisms**Yu. I. Shokin<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., RAS Academician, orcid.org/0000-0002-5178-8294, dir@ict.nsc.ruA. V. Yurchenko<sup>a</sup>, PhD, Phys.-Math., Vice-director, orcid.org/0000-0001-6435-1975, yurchenko@ict.nsc.ru<sup>a</sup>Institute of Computational Technologies of SB RAS, 6, Academician M. A. Lavrentiev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation

**Introduction:** Storage and usage of research data become more sophisticated as their quantity and diversity grow. Research data have a number of features which do not allow you to copy the approaches and tools used in commercial or governmental data-processing facilities. Providing researchers with specialized tools for working with data is an urgent task in research management. **Purpose:** Identifying and describing the basic principles for working with research data, the processes and stages of this work, the mechanisms for implementing the principles and solving the problems of organizing the storage and usage of research data. **Results:** We review and discuss the principles on which the storage and usage of research data can be based, including the FAIR Data Principles. The main goal of organizing the work with research data and the central focus of its principles is the effective use and reuse of this data. We present a hierarchy of mechanisms which can be applied when working with research data for solving scientific and organizational problems. The main processes and lifecycle stages of scientific data and research processes based on them are listed in the article. A number of well-known models of such lifecycles are considered. It is proposed, instead of trying to build a universal model, to use or create models based on the presented list of stages for specific cases or classes of data-driven research. **Practical relevance:** The hierarchy of concept classes developed in the work for the field “Organizing the storage and usage of scientific data” will be used as an ontology core, and for the development of regulatory documents, recommendations and information systems supporting data-driven research.

**Keywords** — research data, data-driven research, FAIR Data Principles, data management, research data lifecycle, scientific information system.

**For citation:** Shokin Yu. I., Yurchenko A. V. Models of organizing research data storage and usage: basic principles, processes and implementation mechanisms. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 45–54 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-45-54

## References

1. Cox A. M., Tam W. A critical analysis of lifecycle models of the research process and research data management. *Aslib Journal of Information Management*, 2018, vol. 70, iss. 2, pp. 142–157. doi:10.1108/AJIM-11-2017-0251
2. Zemskov A. I. Data Curation — storage and maintenance of scientific data — a new direction of libraries activities. *Nauchnye i tehicheskie biblioteki*, 2013, no. 2, pp. 85–101 (In Russian). Available at: [http://www.gpntb.ru/ntb/ntb/2013/2/ntb\\_2\\_10\\_2013.pdf](http://www.gpntb.ru/ntb/ntb/2013/2/ntb_2_10_2013.pdf) (accessed 30 April 2019).
3. Meldo A. A., Utkin L. V., Moiseyenko V. M. XXI century diagnostic algorithms. Artificial intelligence in lung cancer detection. *Practical oncology*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 292–298 (In Russian). doi:10.31917/1903292
4. Lushnov M. S., Lushnov A. M., Lipovitskaya I. N., Golovina E. G., Stupishina O. M. Medical statistics and identification of risk factors for human health in the biosphere. *Biosfera*, vol. 2, no. 1, pp. 157–165 (In Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/meditsinskaya-statistika-i-identifikatsiya-faktorov-riska-dlya-zdorovya-cheloveka-v-prostranstve-biosfery> (accessed 30 April 2019).
5. Yurchenko A. V. On the concept of information-analytical system for supporting data intensive science. *Computational technologies*, 2017, vol. 22, no. 4, pp. 105–120 (In Russian).
6. Gorodnichev M. A., Komissarov A. V., Mozhina A. V., Prochkin P. V., Rudych P. D., Yurchenko A. V. Information models and project solutions for the ecclesia research data storing and processing system. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2018, vol. 16, no. 3, p. 87–104 (In Russian). doi:10.25205/1818-7900-2018-16-3-87-104
7. Yurchenko A. V. On the approach considering scientific IT-service as a base unit for cyberinfrastructure of science. *Information Technologie*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 219–232 (In Russian). doi:10.17587/it.24.219-232
8. Shokin Yu. I., Fedotov A. M., Barakhnin V. B. *Problemy poiska informatsii* [Problems of information retrieval]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2010. 198 p. (In Russian).
9. Fedotov A. M., Leonova Y. V. Requirements for the prototype of the information resources management system in distributed information systems for the support of scientific research. *Computational technologies*, 2018, vol. 23, no. 5, pp. 82–109 (In Russian). doi:10.25743/ICT.2018.23.5.008
10. Wilkinson M. D., et al. The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 2016, vol. 3, article number 160018. doi:10.1038/sdata.2016.18
11. *GO FAIR Initiative*. Available at: <https://www.go-fair.org/fair-principles/>. (accessed 30 April 2019).
12. Paskin N. *Digital Object Identifier (DOI®) System*. Encyclopedia of Library and Information Sciences. Third Edition. 2010. Available at: <http://www.doi.org/overview/080625DOI-ELIS-Paskin.pdf> (accessed 30 April 2019).
13. *Towards the Semantic Web: Ontology-driven Knowledge Management*. Ed. John Davies, Dieter Fensel and Frank van Harmelen. John Wiley & Sons, 2003. 312 p.
14. Yozwiak N. L., Schaffner S. F., Sabeti P. C. Data sharing: Make outbreak research open access. *Nature*, 2015, vol. 518, iss. 7540, pp. 477–479. doi:10.1038/518477a
15. Cutchner-Gershenfeld J., et al. Five ways consortia can catalyze open science. *Nature*, 2017, vol. 543, iss. 7647, pp. 615–617. doi:10.1038/543615a
16. Allan R. *Virtual research environments. From portals to science gateways*. Chandos Publishing, Oxford, UK, 2009. 284 p.
17. Faundeen J. L., Burley T. E., Carlino J. A., Govoni D. L., Henkel H. S., Holl S. L., Hutchison V. B., Martin E., Montgomery E. T., Ladino C. C., Tessler S., Zolly L. S. 2013. The United States Geological Survey Science Data Lifecycle Model. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 2013, 1265, 4 p. doi: 10.3133/ofr20131265
18. *Data Life Cycle Models and Concepts. CEOS Version 1.2*. 2012. Available at: <http://wgiss.ceos.org/dsig/whitepapers/Data%20Lifecycle%20Models%20and%20Concepts%20v12.docx> (accessed 30 April 2019).
19. Wissik T., Durco M. Research data workflows: from research data lifecycle models to institutional solutions. *CLARIN 2015 Selected Papers, Linköping Electronic Conference Proceedings*, Annual Conference 2015, Wroclaw, Poland, October 14–16, 2015, Linköping University Electronic Press, Linköpings universitet, 2015, pp. 94–107. Available at: <http://www.ep.liu.se/ecp/123/008/ecp15123008.pdf> (accessed 30 April 2019).

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.



## Модели поддержки принятия решений в социокиберфизических системах

А. В. Смирнов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-8364-073X](https://orcid.org/0000-0001-8364-073X), [smir@iias.spb.su](mailto:smir@iias.spb.su)

Т. В. Левашова<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-1962-7044](https://orcid.org/0000-0002-1962-7044), [tatiana.levashova@iias.spb.su](mailto:tatiana.levashova@iias.spb.su)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

**Введение:** социокиберфизические системы являются сложными нелинейными системами. Такие системы обладают непредсказуемым поведением. Вовлечение человека, который является частью этих систем, в процесс принятия решений способствует преодолению последствий непредсказуемого поведения систем, поскольку он может использовать свой опыт и интуицию, а не только предварительно запрограммированные правила и процедуры. **Цель:** разработка моделей поддержки принятия решений в социокиберфизических системах, концептуальная модель и поэтапные модели поддержки принятия решений в таких системах. **Общая схема принятия решений** заключается в том, что вначале решение принимают кибернетические компоненты, а если они не могут этого сделать, то обращаются за помощью к человеку. Поэтапные модели поддерживают решения, принимаемые компонентами социокиберфизических систем на типовых этапах процесса принятия решений: осознания ситуации, идентификации проблемы, выдвижения (генерации) альтернатив, выбора предпочтительной альтернативы, реализации решения. Применение разработанных моделей иллюстрируется на примере сценария планирования процесса выполнения роботами общей задачи. **Практическая значимость:** разработанные модели позволяют формировать и реализовывать планы работ компонентов систем по решению общей задачи и достижению цели. Модели способствуют преодолению последствий непредсказуемого поведения социокиберфизических систем и вносят вклад в исследования по направлениям машинное обучение и управление мобильными роботами.

**Ключевые слова** — социокиберфизическая система, поддержка принятия решений, онтология, планирование процесса выполнения задачи.

**Для цитирования:** Смирнов А. В., Левашова Т. В. Модели поддержки принятия решений в социокиберфизических системах. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 55–70. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-55-70

**For citation:** Smirnov A. V., Levashova T. V. Models of decision support in socio-cyber-physical systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 55–70 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-55-70

### Введение

Социокиберфизические системы (СКФС) появились как результат интенсивного взаимодействия киберфизических систем (КФС) с социальной сферой и средой функционирования КФС. Среда функционирования КФС — это система или структура, в которой данная КФС используется (например, организация, производственная система, автомобиль и т. п.).

Решения в КФС принимаются компонентами этих систем. Компоненты КФС делятся на физические и кибернетические. Физические компоненты являются «носителями» кибернетических, так как кибернетическим компонентам требуется физическая (аппаратная) платформа для запуска программ и для обмена информацией с другими кибернетическими компонентами и со средой функционирования КФС [1]. Примерами физических компонентов являются бортовой компьютер в автомобиле, беспилотное воздушное транспортное средство, различные интеллектуальные сенсоры и т. п. Примером кибернетических компонентов является программное

обеспечение, цифровые копии реальных объектов среды функционирования КФС, виртуальные копии физических компонентов КФС и т. п. КФС ориентированы на обслуживание человека, при этом человек не является компонентом системы.

Компоненты КФС могут принимать решения в целях удовлетворения текущих потребностей человека, или КФС может выполнять роль системы поддержки принятия решений. Например, в производственном сценарии [2] автоматическое принятие решений внедрено в производственный процесс, где роботы самостоятельно принимают решения о том, какие действия они должны выполнять в текущей ситуации. Этот сценарий целиком направлен на удовлетворение потребностей человека, и человеку отводится роль потребителя произведенного продукта. Другим примером являются архитектуры КФС, которые предназначены для помощи человеку в принятии решений [3, 4]. Архитектура, основанная на имитационном мета-моделировании [3], оказывает поддержку в принятии решений по планированию и оперативному управлению. Поддержка осуществляется посредством 1) предоставления дополнительных

знаний о производительности рассматриваемого объекта в текущих условиях, 2) предоставления информации о производстве для оценки различных сценариев ради их возможного расширения или уточнения целей, 3) быстрого выбора оптимального множества переменных решения из большого диапазона возможных решений. КФС, построенная на архитектуре для обоснованного принятия решений в конструировании [4], собирает информацию от кибернетических моделей и физических активов, относящуюся к конструкторскому проекту, интегрирует ее и синтезирует контекстную информацию. Контекстная информация является основой для принятия решений человеком.

Решения в КФС принимаются на локальном и системном уровнях. На локальном уровне компоненты КФС могут принимать ситуационные решения и стремиться к автоматическому решению задач посредством сбора дескриптивной информации и применения контекстно-зависимого казуального и процедурного логического вывода. На системном уровне принятие решений в КФС распределено между большим числом компонентов и основано на рефлексивном взаимодействии между компонентами и многокритериальном анализе (оптимизации) [5]. При рефлексивном взаимодействии одна сторона передает второй стороне основания, из которых вторая сторона может логически вывести свое, но предопределенное первой стороной, решение.

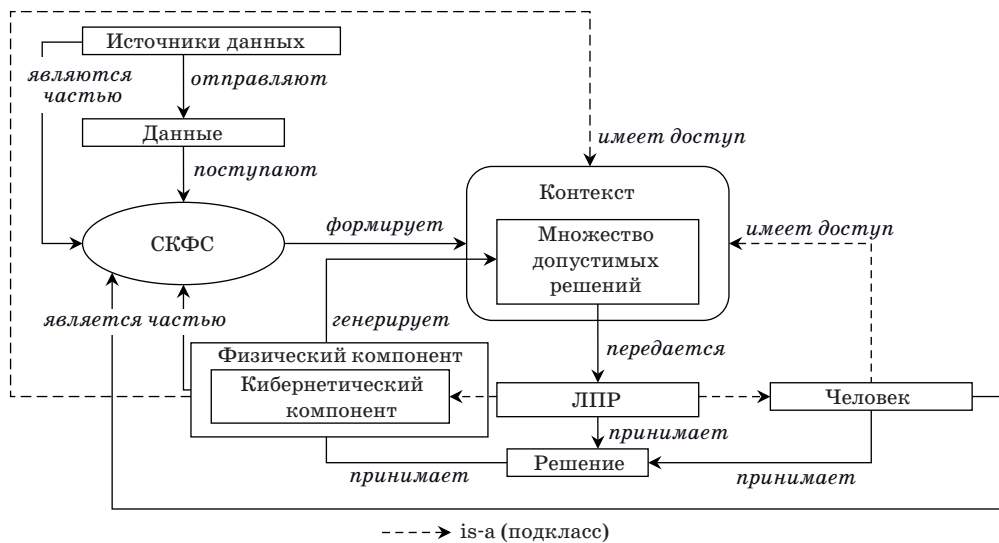
Киберфизические системы относятся к классу нелинейных систем, обладающих следующими свойствами: а) системы содержат большое число компонентов, б) атрибуты компонентов не предопределены, в) число взаимодействий между компонентами может быть чрезвычайно велико, г) функциональные взаимодействия между компонентами слабо организованы и могут быть запутаны, д) компоненты могут работать автономно и устанавливать свои собственные цели, е) поведение всей системы имеет вероятностный характер и может быть сильно нелинейным, ж) система, с одной стороны, активно взаимодействует со средой функционирования в упреждающем режиме (система запрашивает данные от среды функционирования) и, с другой стороны, может поддерживать взаимодействия с обратной связью (система постоянно получает информацию от среды функционирования по мере выполнения задачи), з) система понимает контекст и обеспечивает контекстно-управляемое функционирование. Нетривиальные отношения между компонентами приводят к тому, что КФС проявляют свойства эмерджентности и непредсказуемости [6].

Социокиберфизические системы наследуют характеристики КФС как сложной нелинейной системы и включают человека в свой состав [7].

СКФС могут рассматриваться как сложные социотехнические системы с непредсказуемым поведением, в которых социальные и технические аспекты сильно переплетены [5]. Так как в СКФС человек становится частью системы, он может стать участником процесса принятия решений. Более того, так как возможности кибернетических компонентов в части принятия решений ограничены имеющейся у них вычислительной мощностью и встроенными интеллектуальными возможностями [8], человек пока является единственным, кто способен преодолеть последствия непредсказуемого поведения СКФС, поскольку он может использовать свой опыт и интуицию, а не только предварительно запрограммированные правила и процедуры.

Анализ ряда работ, в которых имеет место принятие решений в КФС и СКФС (например, [3, 4, 9, 10]), позволяет выявить общую схему поддержки принятия решений в таких системах (рис. 1). КФС собирает данные, поставляемые сенсорами, актуаторами, RFID-метками и другими электронными устройствами. Кибернетические компоненты обрабатывают эти данные и формируют контекст. Контекст доступен всем компонентам системы, для чего в архитектурах систем предусматривают специальный элемент, обеспечивающий общедоступность контекста (например, центральный сервер, облачное хранилище информации и др.). Контекст представляет информацию, позволяющую сформировать взгляд на текущее положение дел в среде функционирования системы. Например, для КФС, внедренной в производственную среду, контекст представляет информацию о производственном процессе, состоянии объектов этого процесса, неисправностях, операциях, выполняемых в данный момент, и т. п. Контекст является основой для генерации возможных решений. В КФС стараются сделать так, чтобы эти решения генерировались автоматически кибернетическими компонентами на основе заложенных в них методов и моделей. Если кибернетические компоненты не могут предложить решение, то на помощь приходит человек.

Принятие решений поддерживается процессами обмена информацией и взаимодействиями между компонентами системы. В рамках общей схемы поддержки принятия решений обмен информацией осуществляется от кибернетического компонента к кибернетическому, от кибернетического компонента к человеку, от человека к кибернетическому компоненту, от кибернетических компонентов и человека к центральному хранилищу информации и от центрального хранилища информации к кибернетическим компонентам и к человеку [11]. В рассмотренной выше схеме роль центрального хранилища информации играет контекст. СКФС формирует контекст



■ **Рис. 1.** Общая схема поддержки принятия решений в СКФС  
 ■ **Fig. 1.** Scheme of decision support in socio-cyber-physical system

посредством преобразования данных в информацию и выбора релевантной информации. Для формирования контекста в различных системах используются различные подходы. Широко распространен подход, основанный на использовании онтологических моделей знаний [12–14]. При таком подходе в СКФС, как правило, присутствует онтология, которая, так же как и контекст, является доступной всем компонентам системы и обеспечивает их интероперабельность. Несмотря на то, что на представленной схеме (см. рис. 1) явно онтология не показана, она считается входящей в структуру СКФС.

**Концептуальная модель поддержки принятия решений в СКФС**

В концептуальной модели поддержки принятия решений в качестве участников процесса принятия решений рассматриваются кибернетические компоненты СКФС и человек. Элементами концептуальной модели являются участники процесса принятия решений, профили участников, онтология проблемной области, контекст, модель поддержки принятия решений, задача, шаблоны сообщений, преобразователь сообщений (рис. 2).

В профилях участников представлена совокупность характеристик участника для моделирования этого участника, например, характеристики для описания персональной информации об участнике, информации о знаниях, интересах, предпочтениях участника, идентифицирующей информации и др. С точки зрения поддержки принятия решений наиболее важными

представляются характеристики, позволяющие определить роль участника в текущем контексте, идентификатор участника, область знаний или компетентность участника.

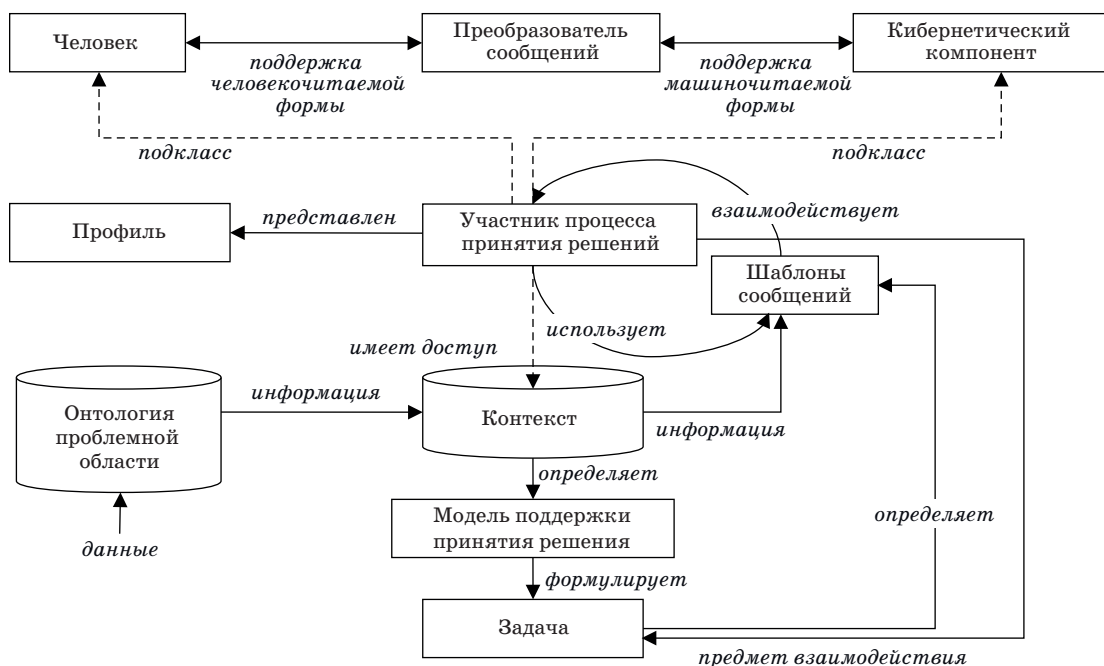
Онтология проблемной области — это модель знаний среды функционирования СКФС, включающая в себя спецификацию задач, предполагающихся для решения или выполнения компонентами СКФС. Задачи, представленные в онтологии, могут быть вычислительными и поведенческими (задачи, нацеленные на выполнение некоторых действий). Вычислительные задачи декомпозируются на подзадачи. Поведенческие задачи специфицированы в виде планов действий.

Контекст представляет информацию, которая может быть использована, чтобы охарактеризовать ситуацию, сложившуюся вокруг некоторого объекта [15]. В рассматриваемом здесь подходе контекст является онтологической моделью, которая представляет информацию о текущей ситуации (текущем положении дел) и о задачах, требующих решения в этой ситуации.

Модель поддержки принятия решений определяет принятие решений на конкретном этапе процесса принятия решений. В теории принятия решений выделяют пять типовых этапов [16]: осознание ситуации, идентификацию проблемы, выдвижение (генерацию) альтернатив, выбор предпочтительной альтернативы, реализацию решения (выбранной альтернативы).

Под задачей понимается цель принятия решений в текущей ситуации (контексте) и на данном этапе процесса принятия решений. На этапе осознания ситуации задачей является выявление необходимости выполнения вычислений или дей-





■ **Рис. 2.** Концептуальная модель поддержки принятия решений в СКФС  
 ■ **Fig. 2.** Conceptual framework of decision making in socio-cyber-physical system

ствий в текущей ситуации. На этапе идентификации проблемы задачей является определение, какие именно вычисления или действия должны быть выполнены. На этапе выдвижения альтернатив задачей является разработка возможных планов выполнения вычислений или действий. На этапе выбора предпочтительной альтернативы задачей является принятие решения, которое заключается в выборе одного (предпочтительного) плана из множества возможных. На этапе реализации решения задачей является воплощение принятого решения (плана) в жизнь.

Шаблоны сообщений используются для обмена информацией между участниками процесса принятия решений посредством текстовых сообщений. В общем случае для обмена информацией может быть использована любая модальность и любые медийные технологии. В данной работе предлагается использовать текстовые сообщения по двум причинам. Во-первых, информация, имеющая онтологическое представление, легко переводится в текстовые сообщения с сохранением семантики проблемной области. Во-вторых, информация в текстовых сообщениях является явно специфицированной, не требующей обращения к дополнительным средствам обработки различных модальностей обмена информацией. Шаблоны сообщений могут быть использованы для формирования сообщений в виде запросов, ответов и оповещений.

Сообщения, представленные при помощи шаблонов, легко понимаются кибернетическими

компонентами, но для человека такое представление не вполне удобно. Особенно, если этот человек не является специалистом в области форматов представления информации. Поэтому для преобразования текстовых сообщений в человеко-читаемую форму используются преобразователи сообщений.

Элементы вышеприведенной концептуальной модели находятся в следующих отношениях. СКФС преобразовывает данные, поступающие от сенсоров или других устройств, осуществляющих мониторинг среды, в информацию на основе онтологии проблемной области. В этой онтологии, помимо прочих знаний, специфицированы виды событий, которые могут иметь место в рассматриваемой проблемной области. Онтология позволяет на основании получаемых данных сделать вывод о наступлении некоторого события.

С каждым событием в онтологии связаны знания, относящиеся к этому виду события. На основании этих связей формируется контекст в форме онтологической модели текущей ситуации [17].

Контекст является основой для принятия решений участниками этого процесса. Такими участниками являются кибернетические компоненты и люди. Принятие решений в контексте осуществляется в соответствии с типовым процессом принятия решений, предполагающим последовательное прохождение упомянутых выше пяти этапов. Для каждого этапа процесса принятия решений определена своя модель поддержки принятия решений. Эта модель ставит свою за-

дачу, в рамках которой и осуществляется поддержка.

Задача является предметом информационного взаимодействия участников процесса принятия решений. Она определяет, какие компоненты могут участвовать в процессе принятия решений и какой информацией будут обмениваться участники. В процессе принятия решений могут принимать участие компоненты, информация в профилях которых соответствует требованиям со стороны среды функционирования СКФС к участникам. Например, участники должны обладать определенной компетенцией, выполнять определенные роли, иметь определенный уровень доступа и т. п. Участники обмениваются информацией о том, как выполнять задачу. Эта информация считывается из контекста и подставляется в соответствующий шаблон текстового сообщения.

Преобразователи сообщений трансформируют формализованные сообщения в человекочитаемую форму. Преобразованию подлежат сообщения от кибернетических компонентов к человеку и обратно.

Общая схема принятия решений заключается в том, что вначале решение принимают кибернетические компоненты, а если они не могут этого сделать, то обращаются за помощью к человеку.

Модели поддержки принятия решений компонентами СКФС на различных этапах этого процесса описаны в разделе «Модели поддержки принятия решений». Использование моделей иллюстрируется на примере сценария поддержки принятия решений при выполнении роботами поведенческих задач.

### Пример сценария поддержки принятия решений

В сценарии поддержки принятия решений, используемом в качестве примера, робот Alfa выполняет задание, заключающееся в том, что он должен двигаться по прямой из точки Start в точку End. На своем пути робот встречает препятствие, наличие которого определяет имеющийся у робота сенсор. В онтологии робота не представлены знания о том, как преодолеть препятствие. На основании информации от сенсора и онтологии проблемной области СКФС определяет тип события как «препятствие» и устанавливает, что, для того чтобы робот мог преодолеть препятствие, должны быть определены размеры этого препятствия и выяснена последовательность действий, которую требуется выполнить для преодоления этого препятствия. Измерением объектов (в рассматриваемом сценарии — препятствия) занимается еще один робот — Beta. Оба робота фор-

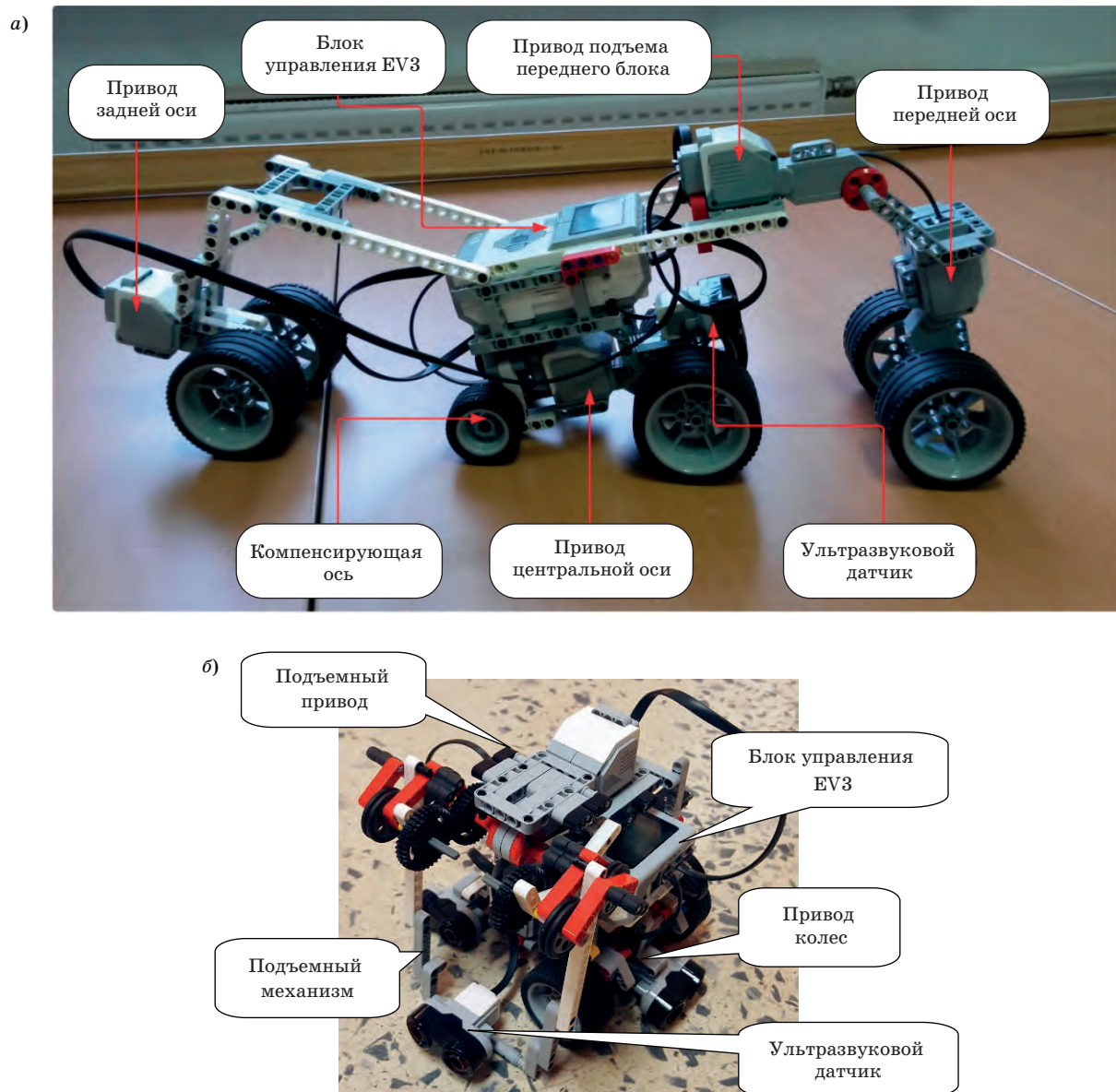
мируют совместный план действий. Реализация плана заключается в том, что робот Beta измеряет препятствие, а робот Alfa преодолевает препятствие и завершает движение в точке End.

Для реализации описанного сценария были разработаны прототипы двух мобильных роботов, построенные на базе робототехнического набора Lego Mindstorm EV3. Данный набор позволяет легко сконструировать робота необходимой функциональности для целей обучения. При этом есть возможность использовать электронные блоки, моторы и датчики и программировать их на языке Java [18].

Первый робот (рис. 3, а), Alfa, способен двигаться вперед, обнаруживать препятствия на пути и преодолевать их. Для того чтобы робот был способен преодолевать препятствия, он сконструирован из нескольких блоков. Благодаря этому робот может взбираться на препятствие постепенно, сначала поднимая и фиксируя на препятствии передний блок, затем, опираясь на передний и задний блоки, поднимать средний. Все блоки оснащены приводной парой колес; помимо этого, центральный блок имеет бесприводную пару колес для поддержания равновесия. Также на центральном блоке установлен ультразвуковой датчик для измерения расстояния до объектов. Этот датчик используется для обнаружения препятствия на пути робота, при котором происходит автоматическая остановка. Второй робот (3, б), Beta, способен подъезжать к объектам и измерять их.

На рис. 4 приведена онтология проблемной области, которая для наглядности сильно упрощена. Она представляет только те концепты, которые важны для понимания рассматриваемого сценария. Для описания онтологии проблемной области и онтологий роботов использовался язык веб-онтологий OWL [19]. Онтология проблемной области создана при помощи редактора онтологий Protégé, в котором типовые онтологические отношения и классы представлены при помощи латиницы [20]. Для устранения двуязычного представления при именовании классов, отношений и индивидов в разрабатываемых онтологиях также использовалась латиница.

В онтологии робот (*Robot*) определен как кибернетический (*Cyber*) компонент (*Component*). Робот может быть мобильным (*Mobile\_robot*) или стационарным (не представлен на рисунке). Оба робота, фигурирующих в сценарии (*Alfa* и *Beta*), относятся к категории мобильных роботов. Роботы могут (*isCapable*) выполнять определенные задачи, которые представлены в классе *Task*. Для спецификации выполняемых роботами задач в текущей ситуации (контексте) используется отношение *isPerforming*, позволяющее выразить, какую именно задачу (какое действие) робот выполняет в данное время. В рамках сценария опре-

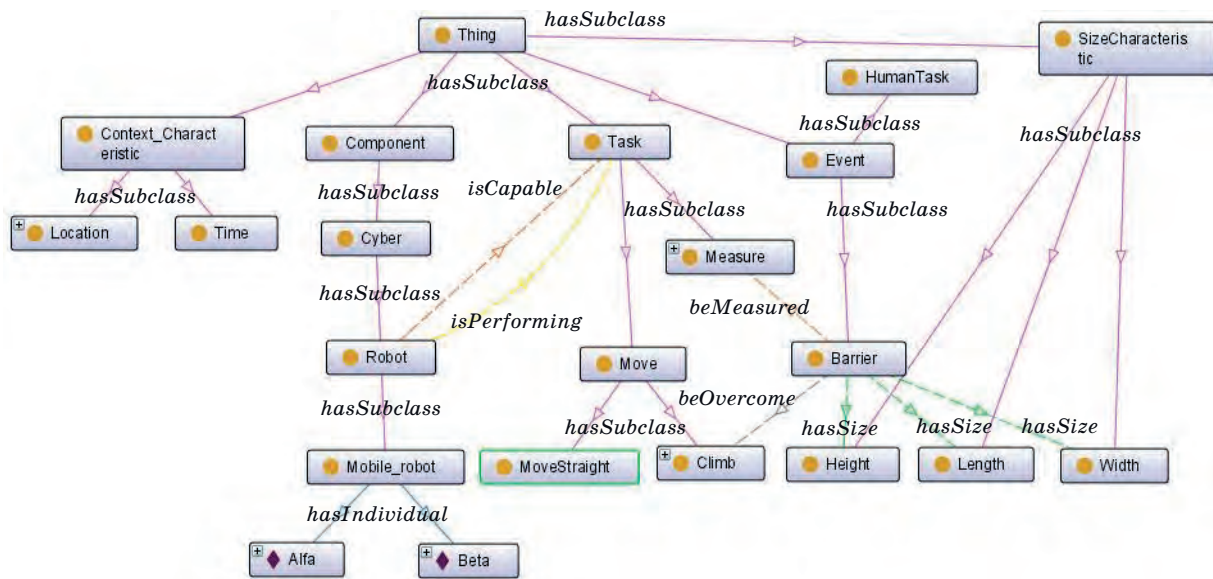


■ Рuc. 3. Мобильный робот Alfa (a) и Beta (б)  
 ■ Fig. 3. Mobile robot Alfa (a) and Beta (б)

делены три базовые задачи: двигаться прямолинейно (*MoveStraight*), двигаться под углом (*Climb*) и измерять (*Measure*). Причем задачи, целью которых является перемещение (*MoveStraight* и *Climb*), являются подклассами класса *Move*, который соответствует задаче перемещения. В рассматриваемой части онтологии определены два класса для представления событий: *HumanTask* и *Barrier*. Класс *HumanTask* предназначен для спецификации событий, связанных с назначением человеком заданий для роботов; класс *Barrier* — для спецификации событий, связанных с препятствиями. Препятствия имеют размеры, что в онтологии представлено при помо-

щи отношения *hasSize* между классом *Barrier* и классами *Length* (длина), *Height* (высота) и *Width* (ширина). Длина, высота и ширина специфицированы в классе *SizeCharacteristic* как три измерения габаритных размеров. Размеры препятствия могут быть измерены (*beMeasured*) посредством выполнения действий, определенных в задаче *Measure*. Препятствие может быть преодолено (*beOvercome*), если двигаться под углом (*Climb*). Для описания пространственных характеристик компонентов СКФС и пространственных параметров задач (действий) используются отношения и концепты, специфицированные в классах *Location* (местоположение) и *Time* (вре-





hasSubclass — иметь подкласс  
 hasIndividual — иметь индивида (представителя класса)

■ Рис. 4. Онтология проблемной области  
 ■ Fig. 4. Domain ontology

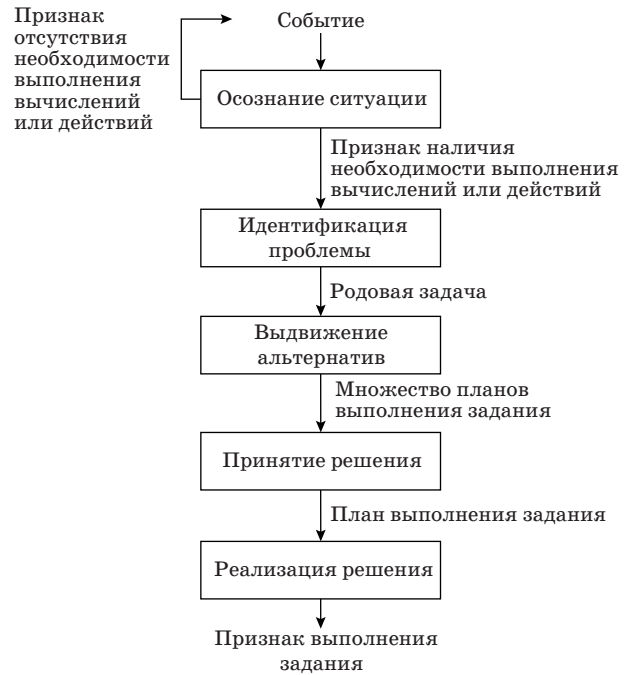
мя). Оба эти класса являются подклассами класса, представляющего контекстно-зависимые категории — *Context\_Characteristic*.

**Модели поддержки принятия решений**

Этапы принятия решений образуют последовательность, которая, в свою очередь, обуславливает последовательность выполнения моделей поддержки принятия решений. На рис. 5 показаны информационные зависимости между моделями поддержки принятия решений.

**Модель поддержки принятия решений на этапе осознания ситуации**

Социокиберфизическая система постоянно посылает кибернетическим компонентам сообщения о наступлении различных событий. Задачей кибернетических компонентов на этапе осознания ситуации является выявление на основе этих сообщений информации о необходимости вычислений (действий). Для этого кибернетические компоненты используют свои онтологии и (или) онтологию проблемной области. Онтологии кибернетических компонентов представляют знания этих компонентов о том, как выполнять известные им вычислительные и поведенческие задачи. Эти знания могут дублироваться в онтологии проблемной области, но это дублирование не является обязательным. При получении сообщения о наступлении события кибернетические



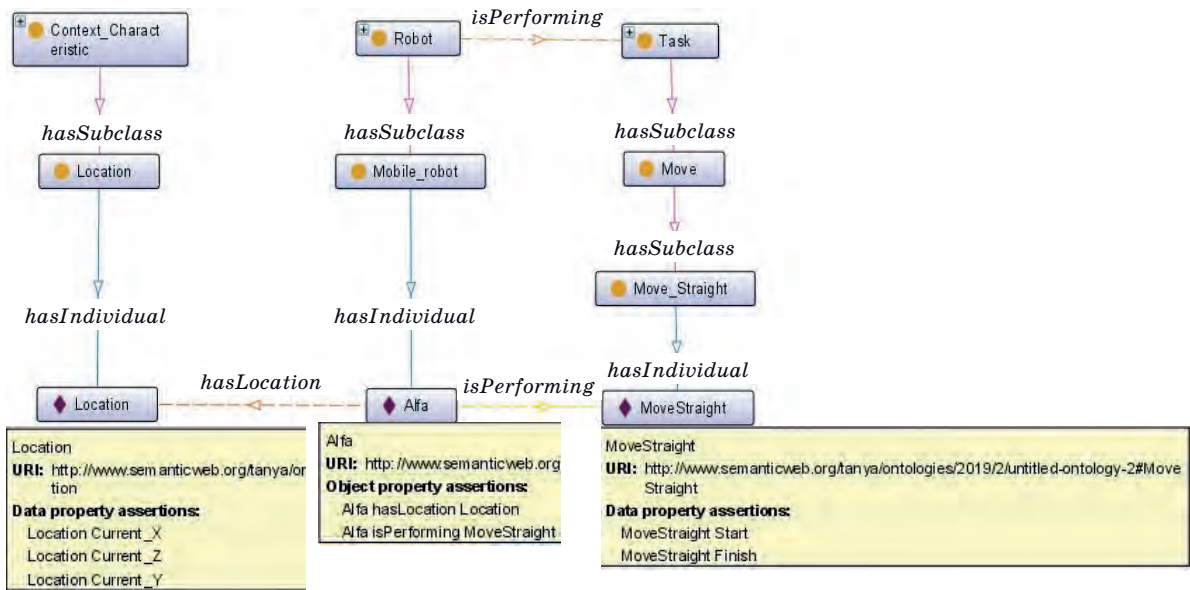
■ Рис. 5. Информационные потоки между моделями поддержки принятия решений  
 ■ Fig. 5. Information flows between decision support models

компоненты отправляют запросы в свои онтологии и в модель контекста на предмет получения знаний, связанных с этим событием. Здесь модель контекста используется вместо онтологии

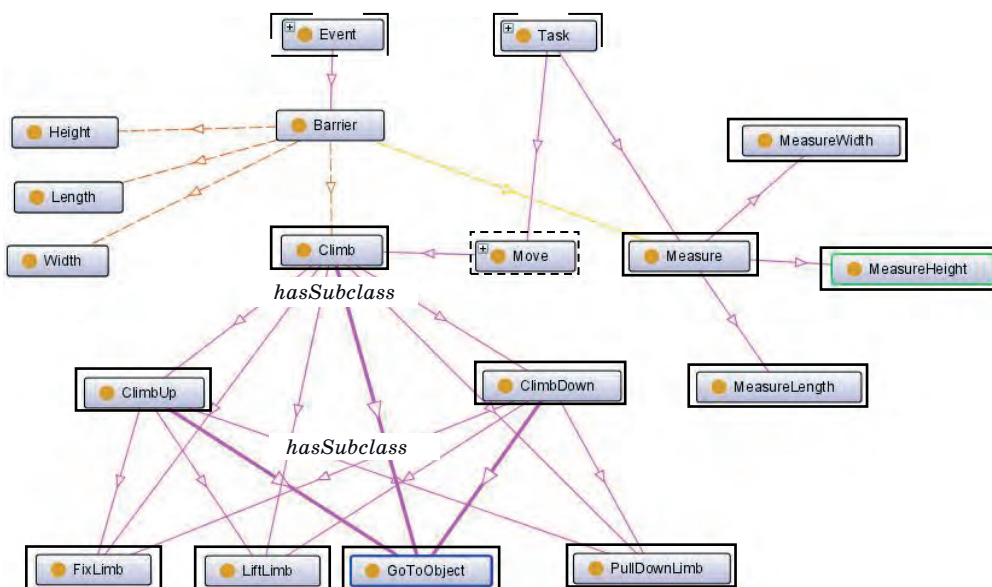
проблемной области, так как эта модель содержит в себе знания из этой онтологии, релевантные текущей ситуации (и текущему событию). Решения о необходимости вычислений (действий) принимаются на основании ответов на запросы. Ответ (A) на запрос содержит неструктурированную информацию обо всех вычислениях и действиях, которые ожидаются от СКФС при наступлении рассматриваемого события.

В модели принятия решений на этапе осознания ситуации не предполагается, что кибернети-

ческие компоненты привлекают человека к принятию решений. В этой модели человек обладает правом самостоятельно принимать решения о необходимости выполнения вычислений (действий) после понимания им сложившейся ситуации. Решение о необходимости выполнения вычислений (действий) в текущей ситуации является решением, принимаемым на рассматриваемом этапе. Поддержка принятия решений в модели принятия решений на этапе осознания ситуации осуществляется посредством предоставления



■ **Рис. 6.** Контекст при выполнении роботом Alfa задания двигаться по прямой (MoveStraight)  
 ■ **Fig. 6.** Context when robot Alfa is performing the task to move in a straight line (MoveStraight)



■ **Рис. 7.** Фрагмент контекста, соответствующий расширению контекста (рис. 6) при появлении препятствия  
 ■ **Fig. 7.** Context fragment corresponding to the enhancement of the context (Fig. 6) for the event Barrier

компонентам СКФС информации о сложившейся ситуации.

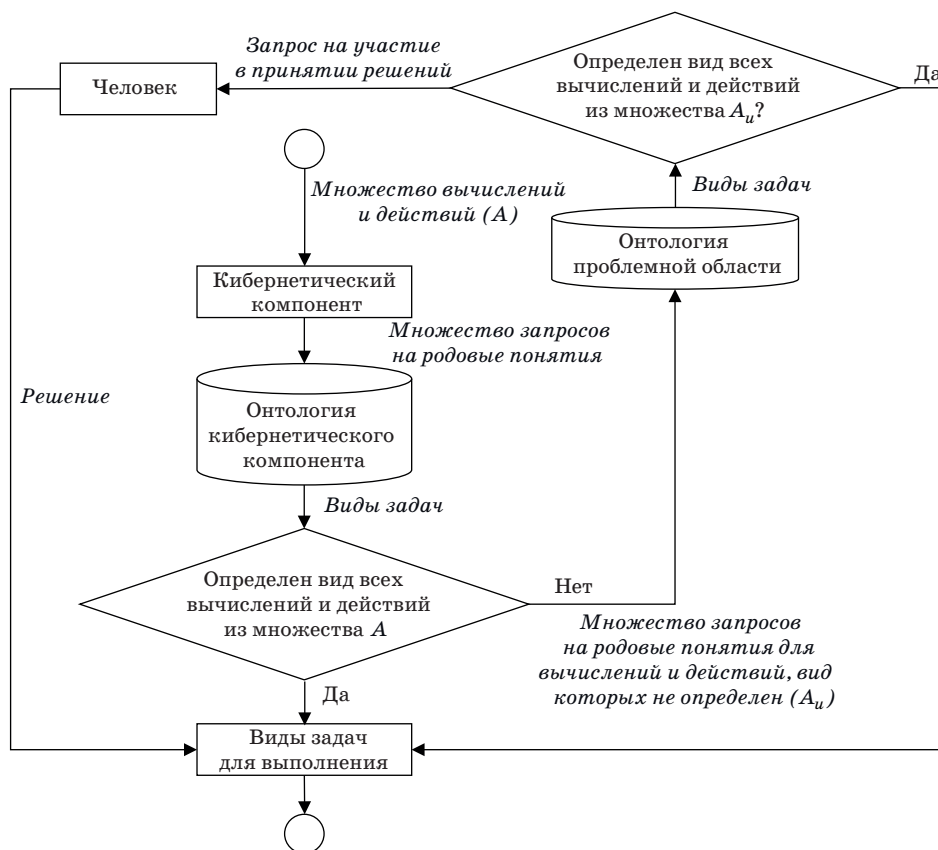
Применительно к используемому в качестве примера сценарию поддержки принятия решений рассматривается момент, когда на пути робота Alfa появляется препятствие. После того как СКФС распознала информацию от сенсора робота как «препятствие», контекст, ранее созданный при выполнении роботом Alfa задания двигаться по прямой (рис. 6), расширяется (рис. 7). В расширенном контексте появляются класс *Barrier* и все задачи и действия, которые связаны с этим классом. На рис. 7 классы, присутствующие в ранее созданном контексте (см. рис. 6), обведены пунктиром; остальные классы соответствуют классам, появившимся при наступлении события «препятствие» (*Barrier*).

Как только событие появилось в контексте, роботы отправляют запросы в онтологии и контекст на предмет наличия связанных с событием задач. В онтологии робота Alfa задачи, связанные с этим событием, не представлены. Запросы от роботов в контекст возвращают список всех задач и действий, связанных с классом *Barrier*, т. е. ответ *A* содержит следующие задачи:  $A = \{Climb, ClimbUp, ClimbDown, FixLimb, LiftLimb, GoToObject,$

*PullDownLimb, Measure, MeasureLength, MeasureHeight, MeasureWidth\}. На рис. 7 классы, представляющие перечисленные задачи, обведены жирной линией. На этапе осознания ситуации такой список сигнализирует о наличии в текущей ситуации проблем, требующих решения.*

### Модель поддержки принятия решений на этапе идентификации проблемы

Принятие решений по идентификации проблемы заключается в определении, какие именно вычисления или действия требуются провести в текущей ситуации. С этой целью осуществляется анализ ответа, который был получен по запросу от кибернетических компонентов на предыдущем этапе. Целью анализа является выявление родового вида деятельности или родовой задачи, т. е. класса, из объема которого выделяются логически подчиненные виды деятельности или подзадачи. Для этого, как и в предыдущей модели, используются онтологии. В онтологиях обязательными отношениями, используемыми для представления знаний, являются родовидовые. Используется следующая схема идентификации проблемы (рис. 8). Вначале идентифицировать проблему пытаются кибернетические компонен-



■ Рис. 8. Поддержка принятия решений на этапе идентификации проблемы

■ Fig. 8. Decision support when problem identification



ты. Они ищут в своих онтологиях или (и) в онтологии проблемной области класс, к которому относятся вычисления и действия, перечисленные в ответе  $A$ . На практике таким классом является вид вычислительной или поведенческой задачи. В одном ответе могут содержаться вычисления или действия, относящиеся как к одному общему классу, так и к различным классам. В первом случае речь идет о необходимости выполнения одной задачи, во втором — нескольких задач.

Если кибернетические компоненты не смогли определить, какую задачу надо выполнять в текущей ситуации, то такая ситуация свидетельствует о неполной спецификации знаний в онтологиях. Кибернетические компоненты отправляют запрос человеку. Дальнейший сценарий зависит от решения, принятого человеком.

Решением, принимаемым на этапе идентификации проблемы, является решение о вычислительных или поведенческих задачах, которые компоненты должны выполнять в текущей ситуации (контексте). Поддержка принятия решений в этой модели осуществляется посредством предоставления компонентам СКФС онтологически представленных знаний, что позволяет на основании типа произошедшего события и связанных с ним задач и действий идентифицировать общую цель, которая должна быть достигнута компонентами СКФС в текущей ситуации.

В рассматриваемом сценарии для определения родовой задачи используется последовательность простейших SPARQL-запросов [21], формируемых по результатам ответа  $A$ , который может рассматриваться как множество классов. Для каждого класса, входящего в множество  $A$ , определяется его надкласс (рис. 9). Результатом выполнения каждого запроса будет ближайший надкласс (*SuperTask*) для класса  $A_i$ , где  $A_i$  —  $i$ -й элемент множества  $A$ . Если *SuperTask* совпадает с хотя бы одним из классов, представленным в множестве  $A$ , класс  $A_i$  не является родовым. Как только для *SuperTask* нет соответствия в множестве  $A$ , класс  $A_i$  считается классом, представляющим родовую задачу. Например, ответом на запрос, в котором  $A_i = \text{ClimbUp}$ , будет *Climb*

(*SuperTask = Climb*). *Climb* присутствует во множестве  $A$ , поэтому *ClimbUp* не является родовой задачей. Ответом на запрос, в котором  $A_i = \text{Climb}$ , будет *Move*. *Move* не присутствует во множестве  $A$ , значит класс *Climb* представляет родовую задачу. В результате выполнения описанной процедуры в рассматриваемом сценарии было выявлено две родовые задачи: двигаться под углом (*Climb*) и измерять (*Measure*).

### Модель поддержки принятия решений на этапе определения альтернатив

Решением, принимаемым на этапе выдвижения альтернатив, являются альтернативные планы выполнения задачи, идентифицированной на предыдущем этапе, компонентами СКФС. Фактически это задача о распределении подзадач (действий) между компонентами СКФС (задача о назначении). Вычислительные задачи в онтологиях кибернетических компонентов и в онтологии проблемной области представлены в виде иерархии или последовательности подзадач, поведенческие — в виде последовательности действий. Для каждой задачи в онтологиях может быть задано несколько таких последовательностей. Каждая последовательность является альтернативным планом выполнения задачи.

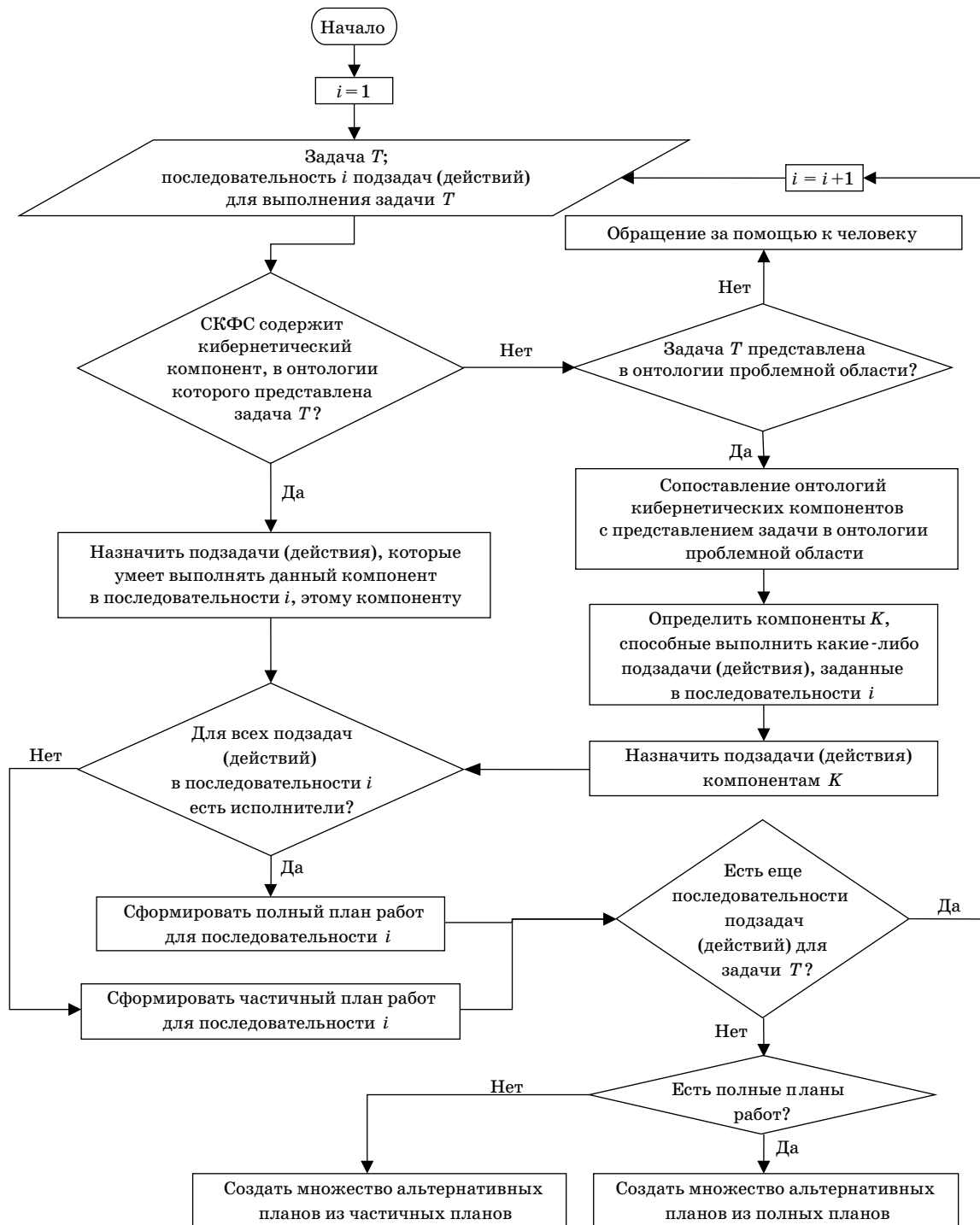
Вначале распределение подзадач и действий происходит между кибернетическими компонентами. Определение компонентов, которые могут участвовать в выполнении задачи, осуществляется на основании онтологий кибернетических компонентов, профилей этих компонентов и онтологии проблемной области. Если кибернетический компонент идентифицировал на предыдущем этапе задачу в своей онтологии, значит этот компонент может участвовать в ее выполнении и «знает», как решать данную задачу, т. е. он «знает», какие подзадачи он может решить или какие действия выполнить. Такой компонент может назначить себя исполнителем этих подзадач и действий.

Если ни один из компонентов не идентифицировал задачу в своей онтологии, но она была найдена в онтологии проблемной области, то кибернетические компоненты сопоставляют свои возможности со спецификацией задачи в онтологии. Цель сопоставления — выяснение, какие подзадачи или действия могут быть выполнены конкретными компонентами. Фактически сопоставляются элементы спецификаций задач, представленных в онтологиях компонентов, с элементами спецификации рассматриваемой задачи в онтологии проблемной области. Компоненты, которые оказываются способными выполнить требуемые подзадачи или действия, могут участвовать в выполнении задачи.

Если в рамках одной последовательности для всех подзадач и действий найдены кибернетиче-

```
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX inter: <http://www.semanticweb.org/tanya/ontologies/2019/2/Domain#>
SELECT DISTINCT ?SuperTask
WHERE {inter:A_i rdfs:subClassOf ?SuperTask.}
```

- **Рис. 9.** Запрос на определение родовой задачи
- **Fig. 9.** Request on generic task



■ **Рис. 10.** Процедура выдвижения альтернатив  
 ■ **Fig. 10.** Procedure of development of alternatives

ские компоненты, способные выполнить требуемые подзадачи или действия, то эти компоненты переходят к формированию общего плана работ.

Если ни для одной из последовательностей не сформирован набор компонентов, которые были бы способны выполнить все подзадачи или дей-

ствия (в частности, если на этапе идентификации проблемы задача была идентифицирована человеком как ранее не выполнявшаяся), то кибернетические компоненты, которые частично могут выполнить задачу, переходят к формированию частичного плана работ. В этом плане подзадачи

и действия, для которых не найдено исполнителей, остаются «открытыми» (исполнители для этих подзадач и действий не определены).

Результатом выполнения модели поддержки принятия решений на этапе выдвижения альтернатив является множество альтернативных планов работ. Причем, если есть полностью сформированные планы, то только эти планы рассматриваются как альтернативные. В противном случае множество альтернатив представлено множеством частичных планов (рис. 10).

Поддержка принятия решений на рассматриваемом этапе осуществляется посредством предоставления компонентам СКФС знаний о возможных альтернативах выполнения задачи.

В рассматриваемом сценарии поддержки принятия решений задача преодоления препятствия имеет два способа решения: преодолеть препятствие посредством подъема (движения под углом вверх (ClimbUp)) или спуска (движения под углом вниз (ClimbDown)) по этому препятствию. На этапе идентификации проблемы выявлено две задачи, требующие решения: Climb и Measure. Спецификация задачи измерения препятствий (Measure) содержится в онтологии робота Beta и в онтологии проблемной области. Так как робот Beta обнаружил эту задачу в своей онтологии, он предлагает себя в качестве исполнителя. Задача движения под углом (Climb) представлена только в онтологии проблемной области. Исполнителем этой задачи может быть компонент, в профиле которого содержится информация о том, что он обладает соответствующей компетенцией, или компонент, назначенный человеком.

В рассматриваемом примере считается, что в профиле робота Alfa содержится информация о том, что он умеет преодолевать препятствия. Таким образом, робот Alfa может предложить себя в качестве исполнителя задачи преодоления препятствия. В результате обмена информацией между роботами Alfa и Beta формируются следующие планы работ (в скобках указаны параметры задач):

- а) Beta: Measure(Obj, O\_Loc), Alfa: ClimbUp (Barrier\_H), Alfa: MoveStraight(Start1, End);
- б) Beta: Measure(Obj, O\_Loc), Alfa: ClimbDown (-Barrier\_H), Alfa: MoveStraight(Start1, End).

В приведенных планах робот Beta измеряет препятствие, робот Alfa преодолевает препятствие и продолжает движение по прямой с точки, в которой он находится после преодоления препятствия (Start1), к точке End. Данные планы сфокусированы на целях выполнения задач и не учитывают время, затрачиваемое роботами на выполнение действий. То есть планы представлены в виде последовательности действий, которые роботы должны выполнить, чтобы достичь поставленных целей.

### Модель поддержки принятия решений на этапе выбора предпочтительной альтернативы

Решением, принимаемым на этапе выбора предпочтительной альтернативы, является решение о предпочтительном плане работ.

Если множество альтернатив состоит из полностью сформированных планов, то предпочтительный план выбирается кибернетическими компонентами посредством переговоров на предмет соответствия предложенному критерию, который определяется проблемной областью и может быть представлен функцией от одной или нескольких характеристик компонента (стоимости, скорости выполнения задачи, уровня надежности и т. п.). Значения этих характеристик являются результатом профилирования и хранятся в профилях компонентов. После завершения переговоров [22] определяется интегральный показатель по каждому плану и выбирается окончательный вариант на основании соответствия этих показателей предложенному критерию.

Если множество альтернатив представлено множеством частичных планов, то в процесс принятия решений вовлекается человек. Если человек знает, что в СКФС есть кибернетический компонент, который способен выполнить подзадачу (действие), для которой не нашлось исполнителей, то человек корректирует план и вносит в него недостающий компонент с назначением ему соответствующей подзадачи (действия). На этапе реализации плана работ выполнение задания будет осуществляться под руководством человека, задачей которого будет отправка назначенному исполнителю последовательности команд управления в процессе реализации. Если требуемого кибернетического компонента нет, то человек принимает решение о дальнейшем функционировании СКФС.

В рассматриваемом сценарии критерием выбора предпочтительного плана является угол движения для преодоления препятствия, который в свою очередь определяется размерами препятствия. Это означает, что предпочтительный план может быть выбран только после того, как станут известны размеры препятствия, т. е. на этапе реализации плана. Поэтому этап выбора предпочтительной альтернативы в рассматриваемом сценарии опущен.

### Модель поддержки принятия решений на этапе реализации решения

Данная модель предназначена для принятия решений в ситуациях, когда кибернетический компонент сталкивается с трудностями (непредвиденными или предусмотренными) при выполнении своей подзадачи (действия). Под непредвиденными трудностями понимаются проблемы,



появившиеся в процессе выполнения полностью сформированного плана работ, когда компоненты знают, как выполнять задачу, но в процессе ее выполнения встретились с проблемами. К предусмотренным трудностям относится частично сформированный план работ или отсутствие такого плана, т. е. когда кибернетические компоненты не знают, как выполнять задачу. Если кибернетические компоненты из-за недостатка знаний встретились с трудностями в процессе осуществления полного плана, они могут восполнить недостающие знания посредством их приобретения от других кибернетических компонентов или из онтологии проблемной области [11]. Если требующиеся знания не могут быть предоставлены, то для разрешения трудностей прибегают к помощи человека. Если план работ не был сформирован полностью, то к помощи человека прибегают в любом случае.

Целью взаимодействия с человеком является получение кибернетическими компонентами спецификации их действий в текущей ситуации. Такая спецификация отправляется человеком (по запросу от компонентов) в текстовом сообщении. В процессе получения сообщений от человека кибернетические ресурсы выполняют рекомендуемые действия и заносят полученные спецификации в свои онтологии (приобретают знания).

Результатом выполнения модели поддержки принятия решений на этапе его реализации является рекомендация, какое действие или какую подзадачу следует выполнять в текущей ситуации.

В рассматриваемом сценарии роботы начинают выполнять сформированные планы, и робот Beta сталкивается с трудностями при вы-

полнении первой задачи — *Measure(Obj, O\_Loc)*. Именно в соответствии с планом он должен измерить препятствие, но в месте его текущего местоположения препятствия нет. Поэтому он обращается за помощью к человеку и отправляет сообщение, пользуясь шаблоном, который предназначен для отправки сообщений при возникновении трудностей в процессе выполнения задачи:

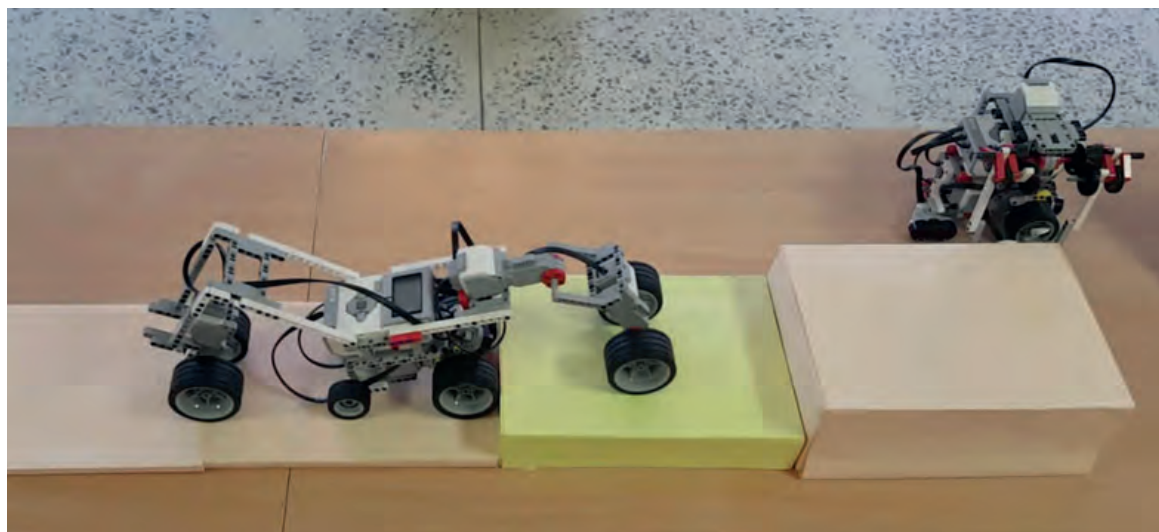
*<Type, Sender, Recipient, Activity, Event, Content, Status>*,

где *Type* — тип сообщения (возможны три значения: запрос (*Request*), ответ (*Reply*), уведомление (*Notification*)); *Sender* — идентификатор (имя) отправителя сообщения; *Recipient* — имя, идентификатор или роль получателя сообщения; *Activity* — выполняемая отправителем сообщения задача (задача, связанная отношением *isPerforming* с отправителем); *Content* — специфическая информация, представляющая появившиеся проблемы; *Status* — статус выполнения задачи (для статуса определено три значения: выполнено (*Completed*), не выполнено (*Failed*), приостановлено (*Suspended*)).

Отправляемое текстовое сообщение выглядит следующим образом:

*<Request, Beta, Consultant, Measure(Steps, StepsLocation), Barrier, ?, Suspended>*,

где *Request* — тип сообщения — запрос; отправитель сообщения — робот *Beta*; получатель сообщения — любой компонент СКФС, выполняющий роль консультанта (*Consultant*); робот выполняет задачу измерения размеров (*Measure*) объек-



■ *Рис. 11.* Пример реализации плана  
 ■ *Fig. 11.* An example of plan implementation

та *Steps*, расположенного в месте *StepsLocation*; имеет место событие — препятствие (*Barrier*); *Content* = ? означает, что робот не знает, что ему делать. *Content* может использоваться, чтобы представлять конкретные действия, которые робот не может выполнить, или аргументы задач (более подробно этот элемент рассмотрен в работе [11]).

В качестве ответа консультант отправляет роботу пошаговую инструкцию, что он должен делать. Например, сообщение вида

*<Reply, Consultant, Beta, GoTo(StepsLocation)>*

означает, что робот должен подойти к месту расположения объекта *Steps*. После того как робот выполнил это действие, он сообщает об удачном его завершении:

*<Notification, Beta, Consultant, GoTo(StepsLocation), , , Completed>*.

Это действие робот заносит в свою онтологию. В дальнейшем робот будет знать, что перед началом измерений он должен подойти к объекту.

Теперь роботы могут приступить к реализации сформированных планов. Робот Beta устанавливает размеры препятствия и сообщает их роботу Alfa. В зависимости от значения *Barrier\_H*, которое обозначает высоту препятствия, робот Alfa выбирает соответствующий план. В данном примере значение *Barrier\_H* определяет выбор плана преодоления препятствия посредством подъема (рис. 11). Преодоление препятствия реализуется в результате выполнения последовательности действий, заданной в онтологии: *GotoObject* → *LiftLimb* → *PullDownLimb* → *FixLimb*, — которая назначается при помощи шаблона проектирования онтологий (*Ontology Design Pattern*) для задания последовательностей — *sequence.owl* [23].

## Литература

1. Petnga L., Austin M. An ontological framework for knowledge modeling and decision support in cyber-physical systems. *Advanced Engineering Informatics*, 2016, vol. 30, pp. 77–94. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2015.12.003
2. Klöber-Koch J., Pielmeier J., Grimm S., Brandt M. M., Schneider M., Reinharta G. Knowledge-based decision making in a cyber-physical production scenario. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 9, pp. 167–174. doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.014
3. Salama S., Eltawil A. A decision support system architecture based on simulation optimization for cyber-physical systems. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 1147–1158. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.151

## Заключение

В работе описаны модели поддержки принятия решений в СКФС на типовых этапах процесса принятия решений: осознания ситуации, идентификации проблемы, выдвижения альтернатив, выбора предпочтительной альтернативы, реализации решения. Модели позволяют формировать и реализовывать планы работ компонентов систем по решению общей задачи и достижению цели. Общая схема принятия решений заключается в том, что вначале решение принимают кибернетические компоненты, а если они не могут этого сделать, то обращаются за помощью к человеку. В настоящее время такой подход является наиболее реализуемым вследствие того, что СКФС обладают свойством непредсказуемости. Человек пока является единственным, кто способен преодолеть последствия непредсказуемого поведения этих систем, поскольку он может использовать свой опыт и интуицию, а не только предварительно запрограммированные правила и процедуры. Также такой подход представляется целесообразным при помещении уже существующих кибернетических компонентов в новую среду. Благодаря возможности взаимодействия с человеком, эти компоненты могут быстро получить от него недостающие знания и приспособиться к выполнению новых для них задач. Рассмотренный в работе сценарий поддержки принятия решений при планировании роботами процесса выполнения общей задачи подтверждает применимость разработанных моделей.

## Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-07-00248 и 17-29-07073) и бюджетной темы № 0073-2019-0005.

4. Fang Y., Roofigari-Esfahan N., Anumba C. A Knowledge-based cyber-physical system (CPS) architecture for informed decision making in construction. *Construction Research Congress 2018*, ASCE, 2018, pp. 662–672.
5. Horvath I. *What the Design Theory of Social-Cyber-Physical Systems Must Describe, Explain and Predict?* In: *An Anthology of Theories and Models of Design* / eds. by A. Chakrabarti, L. T. M. Blessing. London, Springer-Verlag, 2014. Pp. 99–120. doi:10.1007/978-1-4471-6338-1\_2
6. Arthur W. B. Why do things become more complex? *Scientific American*, 1993, vol. 268, no. 5, p. 92.
7. Liu Z., Yang D.-S., Wen D., Zhang W.-M., Mao W. Cyber-physical-social systems for command and control. *IEEE Intelligent Systems*, 2011, July/August, pp. 92–96.

8. Naveed K., Khan Z. H., Hussain A. *Adaptive trajectory tracking of wheeled mobile robot with uncertain parameters*. In: *Computational Intelligence for Decision Support in Cyber-Physical Systems* / eds. by Z. H. Khan; Studies in Computational Intelligence, Springer, 2014, vol. 540. Pp. 237–262. doi:10.1007/978-981-4585-36-1\_8
9. Lee J., Ardakani H. D., Yang S., Bagheri B. Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 38, pp. 3–7. doi:10.1016/j.procir.2015.08.026
10. Badampudi D., Wnuk K., Wohlin C., Franke U., Smite D., Cicchetti A. A decision-making process-line for selection of software asset origins and components. *Journal of Systems and Software*, 2018, vol. 135, pp. 88–104. doi:10.1016/j.jss.2017.09.033
11. Смирнов А., Левашова Т. Приобретение знаний в социокриберфизических системах в процессе информационного взаимодействия ресурсов. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 6, с. 113–122. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.113
12. Sun Y., Yang G., Zhou X. A novel ontology-based service model for cyber physical system. *2016 5th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, IEEE, 2016, pp. 125–131. doi:10.1109/ICCSNT.2016.8070133
13. Hildebrandt C., Törsleff S., Caesar B., Fay A. Ontology building for cyber-physical systems: A domain expert-centric approach. *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, IEEE, 2018, pp. 1079–1086. doi:10.1109/COASE.2018.8560465
14. Smirnov A., Levashova T., Kashevnik A. Ontology-based resource interoperability in socio-cyber-physical systems. *Information Technology in Industry*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 19–25.
15. Dey A. K. Understanding and using context. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2001, vol. 5, no. 1, pp. 4–7.
16. Simon H. A. Making management decisions: the role of intuition and emotion. *The Academy of Management Executive*, 1987, vol. 1, no. 1, pp. 57–64.
17. Смирнов А. В., Левашова Т. В. Онтологии в системах поддержки принятия оперативных решений: практические аспекты. *Онтологическое моделирование: тр. второго симп., Казань, 11–12 октября 2010 г.* / под ред. Л. А. Калиниченко, М., ИПИ РАН, 2011, с. 215–232.
18. Smirnov A., Kashevnik A. Semantic interoperability for coalition creation by mobile robots and humans: an approach and case study. *IFAC-PapersOnLine* / eds. by M. Macchi, L. Monostori, R. Pinto, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1409–1414. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.319
19. *OWL Web Ontology Language Overview*. W3C Recommendation, 10 Feb 2004 / eds. by D. L. McGuinness, F. van Harmelen. <https://www.w3.org/TR/owl-features/> (дата обращения: 06.03.2019).
20. *Protégé*. <https://protege.stanford.edu/> (дата обращения: 06.03.2019).
21. Harris S., Seaborne A. *SPARQL 1.1 Query Language*. W3C Recommendation, 21 March 2013. <http://www.w3.org/TR/sparql11-query> (дата обращения: 07.07.2019).
22. Teslya N., Smirnov A., Levashova T., Shilov N. Ontology for resource self-organisation in cyber-physical-social systems. *Proceedings of the 5th International Conference of Knowledge Engineering and the Semantic Web (KESW 2014)* / eds. by P. Klinov, D. Mourmoumtsev, Communications in Computer and Information Science, Springer, 2014, vol. 468, pp. 184–195.
23. *Sequence Pattern / Ontology Design Patterns*. <http://www.ontologydesignpatterns.org/cp/owl/sequence.owl> (дата обращения: 12.03.2019).

UDC 004.822: 004.896:007.51

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-55-70

#### Models of decision support in socio-cyber-physical systems

A. V. Smirnov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0001-8364-073X](https://orcid.org/0000-0001-8364-073X), [smir@iias.spb.su](mailto:smir@iias.spb.su)

T. V. Levashova<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, [orcid.org/0000-0002-1962-7044](https://orcid.org/0000-0002-1962-7044), [tatiana.levashova@iias.spb.su](mailto:tatiana.levashova@iias.spb.su)

<sup>a</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Socio-cyber-physical systems are complex non-linear systems. Such systems display emergent properties. Involvement of humans, as a part of these systems, in the decision-making process contributes to overcoming the consequences of the emergent system behavior, since people can use their experience and intuition, not just the programmed rules and procedures. **Purpose:** Development of models for decision support in socio-cyber-physical systems. **Results:** A scheme of decision making in socio-cyber-physical systems, a conceptual framework of decision support in these systems, and stepwise decision support models have been developed. The decision-making scheme is that cybernetic components make their decisions first, and if they cannot do this, they ask humans for help. The stepwise models support the decisions made by components of socio-cyber-physical systems at the conventional stages of the decision-making process: situation awareness, problem identification, development of alternatives, choice of a preferred alternative, and decision implementation. The application of the developed models is illustrated through a scenario for planning the execution of a common task for robots. **Practical relevance:** The developed models enable you to design plans on solving tasks common for system components or on achievement of common goals, and to implement these plans. The models contribute to overcoming the consequences of the emergent behavior of socio-cyber-physical systems, and to the research on machine learning and mobile robot control.

**Keywords** — socio-cyber-physical system, decision support, ontology, task planning process.



**For citation:** Smirnov A. V., Levashova T. V. Models of decision support in socio-cyber-physical systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 55–70 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-55-70

## References

- Petnga L., Austin M. An ontological framework for knowledge modeling and decision support in cyber-physical systems. *Advanced Engineering Informatics*, 2016, vol. 30, pp. 77–94. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2015.12.003
- Klöber-Koch J., Pielmeier J., Grimm S., Brandt M. M., Schneider M., Reinharta G. Knowledge-based decision making in a cyber-physical production scenario. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 9, pp. 167–174. doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.014
- Salama S., Eltawil A. A decision support system architecture based on simulation optimization for cyber-physical systems. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 1147–1158. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.151
- Fang Y., Roofigari-Esfahan N., Anumba C. A Knowledge-based cyber-physical system (CPS) architecture for informed decision making in construction. *Construction Research Congress 2018*, ASCE, 2018, pp. 662–672.
- Horvath I. *What the Design Theory of Social-Cyber-Physical Systems Must Describe, Explain and Predict?* In: *An Anthology of Theories and Models of Design*; eds. by A. Chakrabarti, L. T. M. Blessing. London, Springer-Verlag, 2014. Pp. 99–120. doi:10.1007/978-1-4471-6338-1\_2
- Arthur W. B. Why do things become more complex? *Scientific American*, 1993, vol. 268, no. 5, p. 92.
- Liu Z., Yang D.-S., Wen D., Zhang W.-M., Mao W. Cyber-physical-social systems for command and control. *IEEE Intelligent Systems*, 2011, July/August, pp. 92–96.
- Naveed K., Khan Z. H., Hussain A. *Adaptive trajectory tracking of wheeled mobile robot with uncertain parameters*. In: *Computational Intelligence for Decision Support in Cyber-Physical Systems*; eds. by Z. H. Khan; Studies in Computational Intelligence, Springer, 2014, vol. 540. Pp. 237–262. doi:10.1007/978-981-4585-36-1\_8
- Lee J., Ardakani H. D., Yang S., Bagheri B. Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 38, pp. 3–7. doi:10.1016/j.procir.2015.08.026
- Badampudi D., Wnuk K., Wohlin C., Franke U., Smite D., Cicchetti A. A decision-making process-line for selection of software asset origins and components. *Journal of Systems and Software*, 2018, vol. 135, pp. 88–104. doi:10.1016/j.jss.2017.09.033
- Smirnov A., Levashova T. Knowledge acquisition in socio-cyber-physical systems through information exchange between resources. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 6, pp. 113–122 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.113
- Sun Y., Yang G., Zhou X. A novel ontology-based service model for cyber physical system. *2016 5th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, IEEE, 2016, pp. 125–131. doi:10.1109/ICCSNT.2016.8070133
- Hildebrandt C., Törsleff S., Caesar B., Fay A. Ontology building for cyber-physical systems: A domain expert-centric approach. *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, IEEE, 2018, pp. 1079–1086. doi:10.1109/COASE.2018.8560465
- Smirnov A., Levashova T., Kashevnik A. Ontology-based resource interoperability in socio-cyber-physical systems. *Information Technology in Industry*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 19–25.
- Dey A. K. Understanding and using context. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2001, vol. 5, no. 1, pp. 4–7.
- Simon H. A. Making management decisions: the role of intuition and emotion. *The Academy of Management Executive*, 1987, vol. 1, no. 1, pp. 57–64.
- Smirnov A., Levashova T. Ontologies in decision support systems for operation decisions: practical aspects. *Trudy 2 simpoziuma "Ontologicheskoe modelirovanie"* [Proc. of the 2nd Symp. "Ontological modeling"], Kazan, 11–12 October, 2010, ed. by L. A. Kalinichenko, Moscow, 2011, pp. 215–232 (In Russian).
- Smirnov A., Kashevnik A. Semantic interoperability for coalition creation by mobile robots and humans: an approach and case study. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1409–1414. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.319
- OWL Web Ontology Language Overview*. W3C Recommendation, 10 Feb 2004. Eds. by D. L. McGuinness, F. van Harmelen. Available at: https://www.w3.org/TR/owl-features/ (accessed 6 March 2019).
- Protégé*. Available at: https://protege.stanford.edu/ (accessed 6 March 2019).
- Harris S., Seaborne A. *SPARQL 1.1 Query Language*. W3C Recommendation, 21 March 2013. Available at: http://www.w3.org/TR/sparql11-query (accessed 6 March 2019).
- Teslya N., Smirnov A., Levashova T., Shilov N. Ontology for resource self-organisation in cyber-physical-social systems. *Proceedings of the 5th International Conference of Knowledge Engineering and the Semantic Web (KESW 2014)*, eds. by P. Klinov, D. Mourmoumtsev, Communications in Computer and Information Science, Springer, 2014, vol. 468, pp. 184–195.
- Sequence Pattern / Ontology Design Patterns*. Available at: http://www.ontologydesignpatterns.org/cp/owl/sequence.owl (accessed 6 March 2019).

## Вложенные кодовые конструкции Баркера — Мерсенна — Рагхаварао

М. Б. Сергеев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-3845-9277](https://orcid.org/0000-0002-3845-9277), [mbse@mail.ru](mailto:mbse@mail.ru)

В. А. Ненашев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0001-5285-2051](https://orcid.org/0000-0001-5285-2051)

А. М. Сергеев<sup>а</sup>, старший преподаватель, [orcid.org/0000-0002-4788-9869](https://orcid.org/0000-0002-4788-9869)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** помехоустойчивое кодирование информации в открытом радиоканале имеет большое значение при передаче данных. Изложенные в работе результаты ориентированы на стимулирование научного интереса к новым квазиортогональным базисам как основе пересмотра алгоритмов кодирования сигналов. **Цель:** поиск новых кодовых последовательностей как комбинаций кодов, сформированных из строк квазиортогональных матриц Мерсенна и Рагхаварао, а также сложных и более эффективных кодов Баркера — Мерсенна — Рагхаварао. **Результаты:** исследованы конструкции вложенных кодовых последовательностей, сформированных из строк квазиортогональных циклических матриц Мерсенна, Рагхаварао и Адамара. Приведены оценки характеристик автокорреляционной функции вложенных кодов Баркера, Мерсенна, Рагхаварао и их комбинаций, а именно отношения главного пика к максимальному положительному и отрицательному боковым лепесткам. Синтезированы и проанализированы новые коды, в том числе вложенные, обладающие лучшими характеристиками, чем известные коды Баркера и их вложенные конструкции. Значимость результатов обеспечивается перспективностью исследования, влияющего на становление и развитие методов выделения, обнаружения и обработки полезной информации. Результаты работы имеют длительное последствие, поскольку с появлением оригинальных методов синтеза новых кодов возникает потребность их исследования, модификации, обобщения и расширения области применения. **Практическая значимость:** применение результатов исследования на практике гарантирует повышение точности в системах определения координат, обнаружение полезного сигнала в условиях сложной помеховой обстановки, в частности, в радиолокационных системах с высокой разрешающей способностью по координате дальности при обнаружении физических объектов, в том числе скрытых.

**Ключевые слова** — моноциклические квазиортогональные матрицы, коды Мерсенна, коды Баркера, коды Рагхаварао, кодовая модуляция, кодирование сигналов, помехоустойчивость, автокорреляционная функция, вложенные кодовые последовательности, отношение главного пика к боковому лепестку, боковой лепесток.

**Для цитирования:** Сергеев М. Б., Ненашев В. А., Сергеев А. М. Вложенные кодовые конструкции Баркера — Мерсенна — Рагхаварао. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 71–81. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-71-81

**For citation:** Sergeev M. B., Nenashev V. A., Sergeev A. M. Nested code sequences of Barker — Mersenne — Raghavarao. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 71–81 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-71-81

### Введение

Модуляция сигналов — широко известный способ передачи данных. Важными задачами при приеме модулированных сигналов являются:

- их обнаружение в коммуникационном канале на фоне естественных и искусственных помех;

- необходимость разрешения в радиолокационных системах сигналов, отраженных от близко расположенных объектов или элементов подстилающей поверхности по координате дальности.

Для решения этих задач, как правило, применяется корреляционный прием модулированных сигналов. Эффективность такого приема зависит от способа и сложности кодирования сигналов и особенностей кодов.

Наиболее известными помехоустойчивыми кодами являются коды Баркера, у которых отношение пика автокорреляционной функции (АКФ) к максимальному боковому лепестку — наибольшее. Код Баркера длины 11 использу-

ется в протоколах семейства стандартов связи 802.11 [1], коды длины 11 и 13 используются в современных радиолокационных системах [2], последовательности вложенных кодов используют в космической связи [3] и при модуляции широкополосных сигналов для инфокоммуникационных сетей [4] и др.

В настоящей работе рассматриваются и анализируются кодовые последовательности Мерсенна и Рагхаварао [5] как альтернатива кодам Баркера. Отдельно рассматриваются характеристики вложенных кодов [6], являющихся комбинацией кодов Баркера, Мерсенна и Рагхаварао.

### Современное состояние в области поиска новых кодов

Сегодня известно множество кодов и синтезированных по ним сложных широкополосных сигналов, модулированных по амплитуде, частоте и фазе или одновременно по нескольким пара-

метрам сигнала. Основными применяемыми на практике сложными сигналами являются сигналы с частотной или фазовой модуляцией.

При фазовой модуляции используют  $m$ -последовательности, псевдослучайные последовательности, коды Франка, Баркера, коды Льюиса и Кречмера (P1, P2, P3, P4), полифазные коды  $P(n, k)$ , коды Вольтинской, комплементарные коды, коды Ипатова и т. д.

Однако не все сложные сигналы одинаково эффективны для решения конкретной задачи обнаружения или передачи данных. Наилучшими являются сигналы, модулированные кодовой последовательностью, у которых:

- отношение пика АКФ к максимальному по модулю боковому лепестку наибольшее;
- ширина главного лепестка АКФ по уровню  $-3$ дБ наименьшая;
- потери в отношении сигнал/шум минимальны.

Первые результаты исследований [5] показали, что двухфазным кодам Баркера, имеющим наибольшее отношение главного пика к максимальному боковому лепестку (ОПМБЛ), могут быть противопоставлены коды, полученные из квазиортогональных матриц Мерсенна, и коды Рагхаварао [7]. Они превосходят эту характеристику кодов Баркера в случаях  $n$ , равных 3 и 7, 5 и 13 соответственно. Кроме того, коды существуют на больших длинах и, возможно, превышают ОПМБЛ  $m$ -последовательностей и псевдослучайных последовательностей.

Развитие математического базиса и методов синтеза кодов для помехоустойчивого и скрытого использования в радиоканалах в условиях сложной помеховой обстановки сегодня предполагает отход от сложившихся правил. В частности, можно незначительно ослабить требования к АКФ и допустить существование значения вторичных пиков, превышающих 1. Это является приемлемым в том случае, если центральный пик значительно больше 1. При этом построение кодов на основе матриц Мерсенна и Рагхаварао позволит значительно дополнить и развить теорию кодирования при решении следующих научных задач:

- выявлении критериев и характеристик оценки для предлагаемых кодов, определении их особенностей и границ применимости;
- формировании базиса квазиортогональных матриц различных структур (как источника новых кодов) на основе математических описаний и компьютерных вычислений специальными методами;
- разработке новых специальных кодов, основанных на использовании теории квазиортогональных матриц и разнообразии их структурных особенностей;

— разработке новых вложенных кодовых последовательностей;

— синтезировании сигналов по найденным кодам, а также вложенным кодовым последовательностям.

### Альтернативные коды Мерсенна и Рагхаварао

В качестве основы для построения кодов используются строками квазиортогональных матриц Мерсенна [8] и Рагхаварао.

Матрицы Адамара и Мерсенна существуют на соседних порядках  $4t$  и  $4t - 1$  соответственно, где  $t$  — натуральное число. Особенностью матриц Мерсенна является тот факт, что они имеют два значения элементов: 1 и  $-b$ . Количество отрицательных элементов отличается от количества положительных на единицу. Указанные матрицы могут быть однозначно структурно связаны с матрицами Адамара по схеме [9]

матрица Мерсенна порядка  $4t - 1 \rightarrow$

матрица Адамара порядка  $4t$

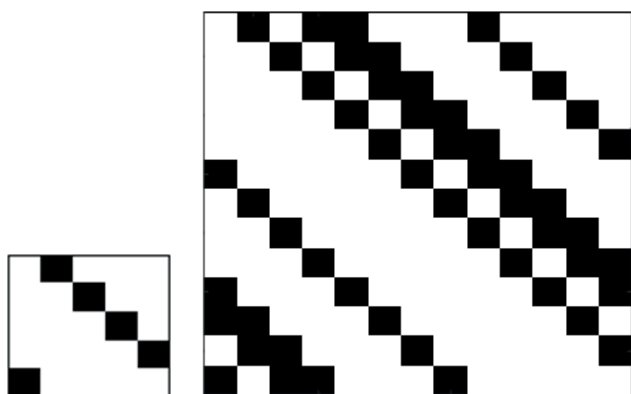
за счет простой операции окаймления и замены (элементы  $-b$  заменяются на  $-1$ ) или не иметь такой связи.

Кроме того, вариант структуры подобных матриц в виде «циркулянта» может быть получен, если в качестве первой строки использовать последовательность, сформированную на основе квадратичных вычетов [5].

Циклические квазиортогональные матрицы Рагхаварао отличаются от циклических матриц Мерсенна тем, что количество положительных и отрицательных элементов в них отличается на величину  $n(t) = t^2 + (t + 1)^2$ , где  $t$  — натуральное число. Например, для  $n = 5$  получаем  $1_{отр}^2 + 2_{полож}^2 = 5$  и для  $n = 13$   $2_{отр}^2 + 3_{полож}^2 = 13$ , что отражено в кодах, приведенных в табл. 1. Таким образом, последовательности длин 5 и 13 не являются последовательностями мерсеннова типа, а формируются из первых строк моноциклических квазиортогональных матриц типа Рагхаварао порядков 5 и 13, портреты которых приведены на рис. 1. Белое поле портрета матрицы соответствует элементу матрицы со значением 1 (в общем случае со значением  $a$ ), а черное поле — элементу со значением  $-b$ .

Таким образом, порядки выбранного базиса матриц позволяют создать на основе их строк коды, альтернативные кодам Баркера и, кроме того, отличающиеся от классических кодов с симметричными значениями в представлении  $\{1, -1\}$ . Для примера в табл. 1 приведены коды Баркера и альтернативные коды на их порядках.





■ **Рис. 1.** Портреты моноциклических квазиортогональных матриц Рагхаварао порядков 5 и 13  
 ■ **Fig. 1.** Portraits of monocyclic quasi-orthogonal Raghavarao matrices of orders 5 and 13

■ **Таблица 1.** Коды Баркера, Мерсенна, Рагхаварао  
 ■ **Table 1.** Barker, Mersenne and Raghavarao code sequences

Длина кода $n$	Коды Баркера	Коды Мерсенна и Рагхаварао
2	1 -1 1 1	-
3	1 1 -1	-b 1 1
4	1 -1 1 1 1 -1 -1 -1	-
5	1 1 1 -1 1	1 -b 1 1 1
7	1 1 1 -1 -1 1 -1	-b -b 1 -b 1 1 1
11	1 1 1 -1 -1 -1 1 -1 -1 1 -1	-b 1 -b -b -b 1 1 1 -b 1 1
13	1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1	1 -b 1 -b -b 1 1 1 -b 1 1 1 1

Результаты оценки характеристик АКФ кодовых последовательностей Баркера и Мерсенна показали, что ОПМБЛ АКФ для кодовой последовательности Мерсенна при  $n = 7$  составляет -18,68 дБ, что на 1,78 дБ ниже уровня боковых лепестков, чем у аналогичного кода Баркера. При  $n = 3$  ОПМБЛ АКФ кода Мерсенна превышает аналогичную оценку кода Баркера на 3,52 дБ. Для кода Мерсенна длины 11 оценка ОПМБЛ АКФ получилась хуже, чем у кода Баркера, на 1,72 дБ [5].

Для кода Рагхаварао аналогичные оценки показали, что при  $n = 5$  ОПМБЛ составляет -15,92 дБ и превышает аналогичную оценку кода Баркера на 1,94 дБ, а при  $n = 13$  превышение составляет 1,49 дБ [7].

Рассмотренные выше кодовые последовательности, сформированные на основе моноцикли-

ческих квазиортогональных матриц Мерсенна и Рагхаварао порядков 3, 5, 7, 11 и 13, очевидно, являются альтернативными кодам Баркера.

Коды, превосходящие коды Баркера по характеристикам, для длин 2 и 4 найдены не были. Указанные длины кодов в теории квазиортогональных матриц соответствуют их порядкам 2 и 4 и являются исключениями. Единственная известная моноциклическая матрица Адамара, согласно гипотезе Райзера [10], имеет порядок 4. Ее элементы всегда строго симметричны относительно главной и побочной диагоналей. Порядку  $n = 2$  соответствует моноциклическая матрица Белевича. Однако для этих матриц отход от существующего представления кодов в паре  $\{1, -1\}$  и использование для кодирования предлагаемых в работе несимметричных пар  $\{1, -b\}$  или  $\{a, -b\}$  невозможен.

Таким образом, из приведенных выше результатов следует, что наилучшей характеристикой обладает код Рагхаварао 13 с ОПМБЛ АКФ, равной -23,77 дБ.

Однако даже приведенные коды Мерсенна и Рагхаварао не всегда достаточны для эффективного решения задач обнаружения и обеспечения помехоустойчивости в открытых радиоканалах. Поэтому для получения улучшенных по ОПМБЛ АКФ кодов можно использовать комбинации из последовательно вложенных кодов Баркера, Мерсенна и Рагхаварао.

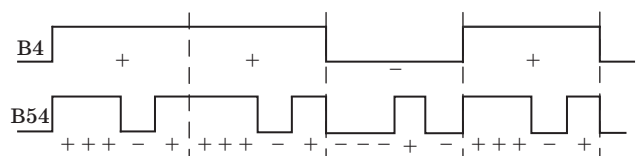
### Вложенные кодовые последовательности

Под комбинацией и вложенностью будем понимать либо комбинации разных по длине кодов Баркера, Мерсенна и Рагхаварао, либо их взаимные комбинации.

На рис. 2 представлена огибающая вложенного кода Баркера  $5 \times 4$  [3].

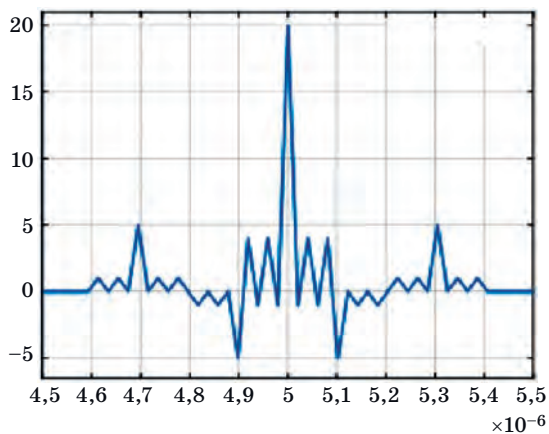
На рис. 3 представлены АКФ для вложенного кода Баркера комбинации  $5 \times 4$  для двух видов кода Баркера длины 4: 1 -1 1 1 и 1 -1 -1 -1.

Поскольку оценка ОПМБЛ АКФ новых найденных кодов превышает аналогичную оценку для кода Баркера, то они могут быть применены для формирования новых вложенных кодовых конструкций с улучшенными характеристиками.



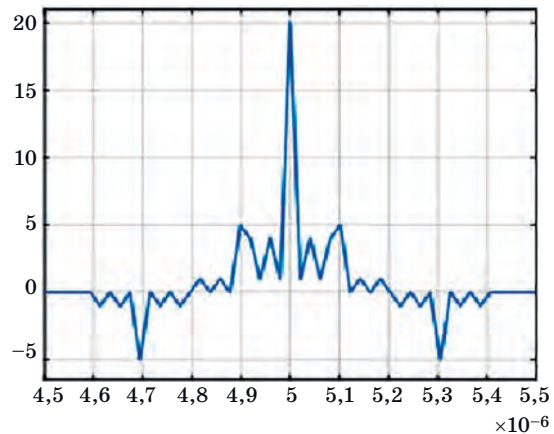
■ **Рис. 2.** Код Баркера  $5 \times 4$  (снизу) и огибающая сигнала кодом длины 4 (сверху)

■ **Fig. 2.** Barker code  $5 \times 4$  (bottom) and signal envelope code length 4 (top)



$$B_{54} = [B_5 \ -B_5 \ B_5 \ B_5]$$

$$B_5 = [1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1]$$



$$B_{54} = [B_5 \ -B_5 \ -B_5 \ -B_5]$$

$$B_5 = [1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1]$$

■ *Рис. 3.* АКФ вложенного кода Баркера длины  $5 \times 4$

■ *Fig. 3.* ACF nested code Barker length  $5 \times 4$

В табл. 2 приведены нумерации конструкций вложенных кодов Баркера, Мерсенна и Рагхаварао и соответствующие им отношения главного пика АКФ к максимальным положительному и отрицательному лепесткам, условно обозначенным в таблице как «+» и «-» соответственно.

Кодовые последовательности, сформированные из строк квазиортогональных циклических матриц Мерсенна и Рагхаварао, обозначены как новый матричный код (НМК).

Поскольку обнаружение сжатого сигнала часто производится во временной области, то на ха-

■ *Таблица 2.* Оценка АКФ вложенных кодовых конструкций типа Баркер — НМК

■ *Table 2.* ACF evaluation of nested Barker — NMK

$n \times m$	Оценка отношения главного пика АКФ к максимальному положительному («+») и отрицательному («-») боковому лепестку, дБ, вложенной кодовой конструкции типа							
	Баркер — Баркер		Баркер — НМК		НМК — Баркер		НМК — НМК	
	«+»	«-»	«+»	«-»	«+»	«-»	«+»	«-»
3×3	-19,084850	-9,5424252	-22,606676	-9,5424252	-13,064250	-9,5424252	-13,064250	-13,064250
3×5	-13,979400	-9,5424252	-15,917601	-9,5424252	-13,064250	-13,064250	-13,064250	-13,064250
3×7	-26,444386	-9,5424252	-21,685902	-9,5424252	-13,064250	-13,064250	-13,064250	-13,064250
3×11	-30,370279	-9,5424252	-26,127947	-9,5424252	-13,064250	-13,064250	-13,064250	-13,064250
3×13	-22,278868	-9,5424252	-23,767757	-9,5424252	-13,064250	-13,064250	-13,064250	-13,064250
5×3	-13,979400	-9,5424252	-13,979400	-13,064250	-15,917601	-9,5424252	-15,917601	-11,775090
5×5	-13,979400	-	-13,979400	-15,917601	-13,979400	-15,917601	-14,628441	-14,628441
5×7	-13,979400	-16,901960	-13,979400	-18,675602	-15,917601	-15,917601	-15,917601	-15,917601
5×11	-13,979400	-20,827854	-13,979400	-17,715715	-15,917601	-15,917601	-15,917601	-15,917601
5×13	-13,979400	-	-13,979400	-23,767757	-15,917601	-15,917601	-15,917601	-15,917601
7×3	-26,444386	-9,5424252	-29,966211	-13,064250	-18,675602	-9,5424252	-18,675602	-14,139840
7×5	-13,979400	-16,901960	-15,917601	-15,917601	-13,979400	-18,675602	-16,993189	-16,993189
7×7	-33,803921	-16,901960	-21,685902	-16,901960	-18,675602	-16,901960	-18,675602	-18,675602
7×11	-37,729813	-16,901960	-26,127947	-16,901960	-18,675602	-18,675602	-18,675602	-18,108547

- Окончание табл. 2
- Table 2 (completed)

n×m	Оценка отношения главного пика АКФ к максимальному положительному («+») и отрицательному («-») боковому лепестку, дБ, вложенной кодовой конструкции типа							
	Баркер — Баркер		Баркер — НМК		НМК — Баркер		НМК — НМК	
	«+»	«-»	«+»	«-»	«+»	«-»	«+»	«-»
7×13	-22,278868	-16,901960	-23,767757	-16,901960	-18,675602	-18,675602	-18,675602	-18,675602
11×3	-30,370279	-9,5424252	-33,892105	-13,064250	-26,127947	-9,5424252	-26,127947	-13,106423
11×5	-13,979400	-20,827854	-15,917601	-15,917601	-13,979400	-17,715715	-15,959773	-15,959773
11×7	-37,729813	-16,901960	-21,685902	-18,675602	-26,127947	-16,901960	-21,728075	-17,715715
11×11	-41,655708	-20,827854	-26,127947	-17,715715	-26,127947	-17,715715	-26,127947	-17,715715
11×13	-22,278868	-20,827854	-23,767757	-20,827854	-22,278868	-17,715715	-23,809931	-17,715715
13×3	-22,278868	-9,5424252	-22,278868	-13,064250	-23,767757	-9,5424252	-23,767757	-12,518845
13×5	-13,979400	-	-15,917601	-15,917601	-13,979400	-23,767757	-15,372194	-15,372194
13×7	-22,278868	-16,901960	-21,685902	-18,675602	-23,767757	-16,901960	-21,140495	-18,130196
13×11	-22,278868	-20,827854	-22,278868	-17,715715	-23,767757	-20,827854	-23,767757	-17,504599
13×13	-22,278868	-	-22,278868	-23,767757	-22,278868	-23,767757	-23,222351	-23,222351

рактические характеристики обнаружителей влияет в большей степени максимальный положительный боковой лепесток АКФ.

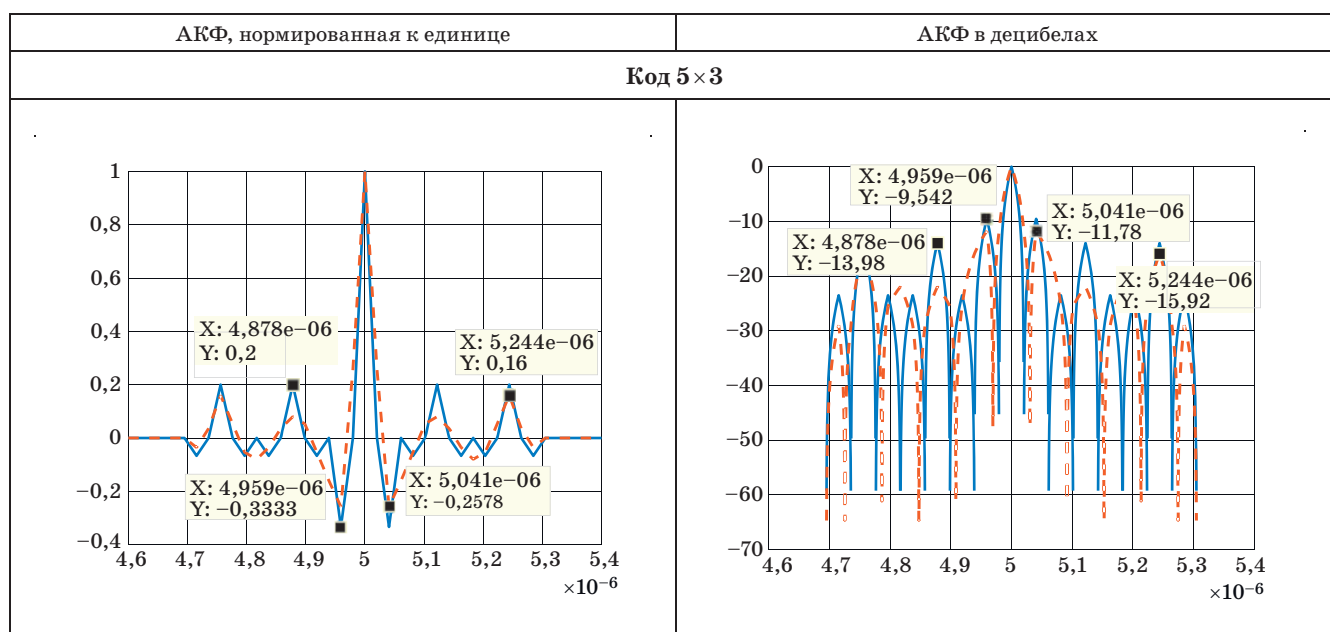
Приведем АКФ вложенных кодовых конструкций типа НМК — НМК, у которых и по-

ложительный, и отрицательный максимальный боковой лепесток превышают аналогичные для конструкции типа Баркер — Баркер (табл. 3).

Как следует из результатов, приведенных в табл. 2 и 3, вложенные кодовые конструкции

■ Таблица 3. АКФ двухуровневых вложенных кодов (Баркера — Баркера и НМК — НМК)

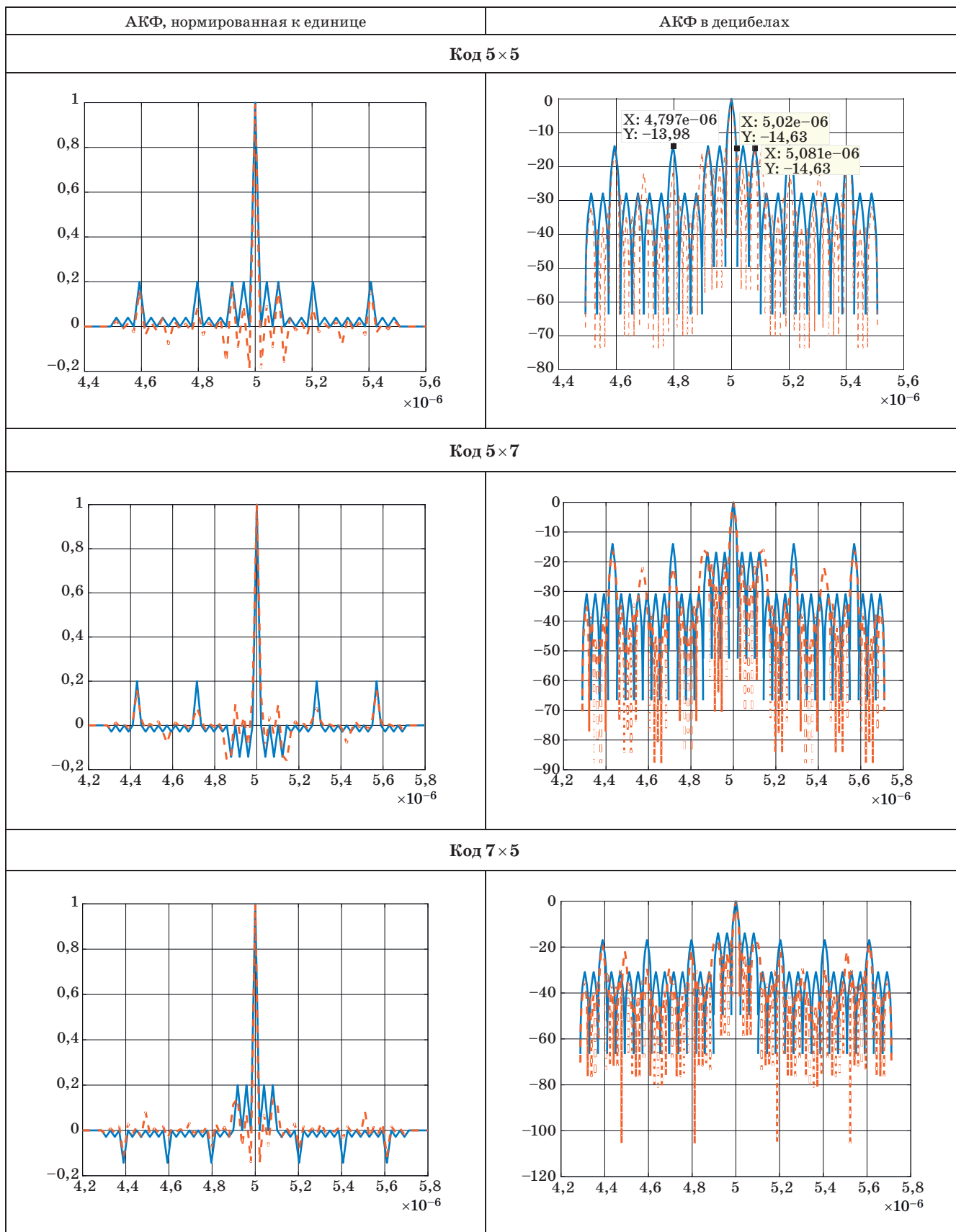
■ Table 3. ACF two-level nested codes (Barker — Barker and NMC — NMC)



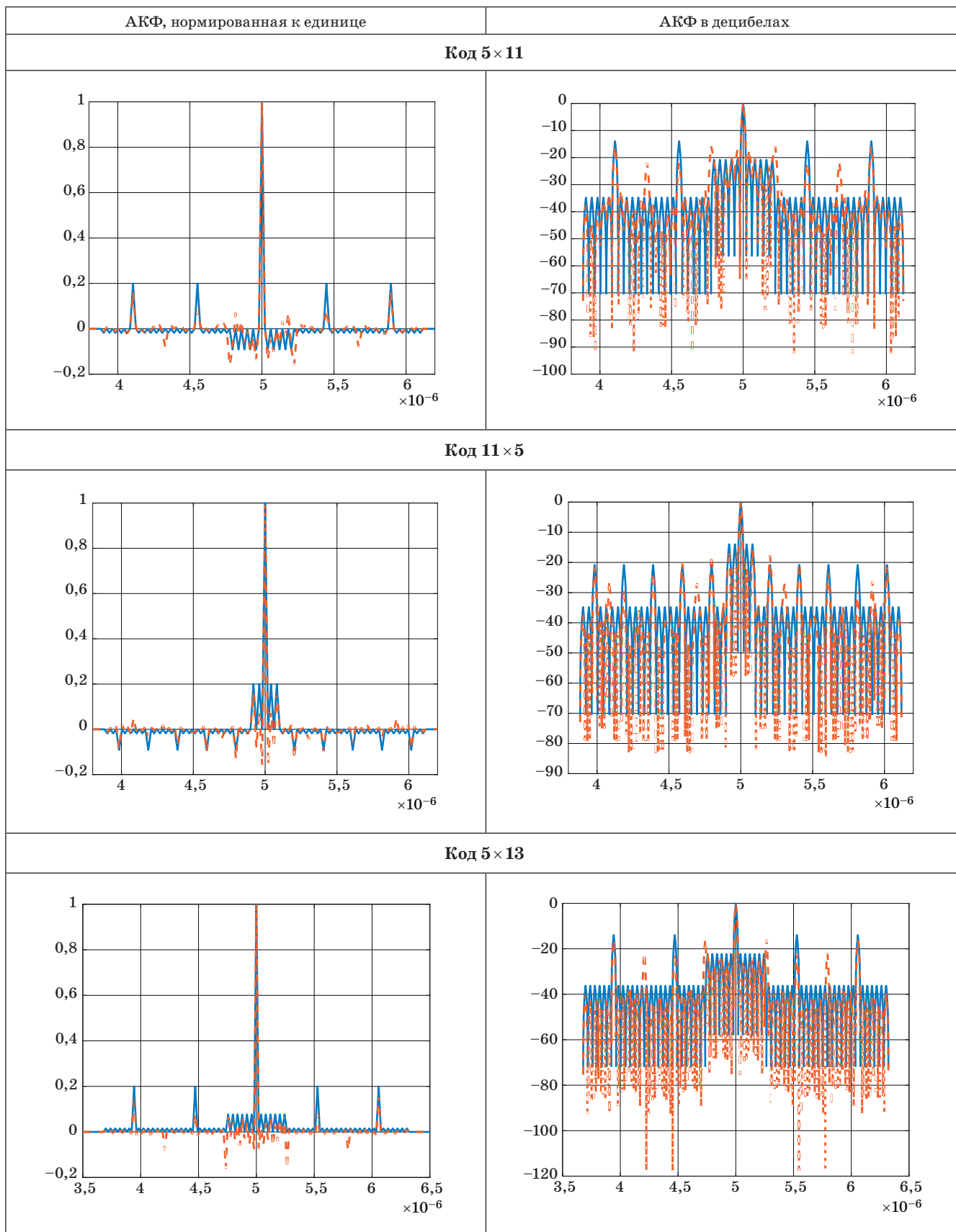
Примечание: — вложенный код Баркера - - - вложенный НМК



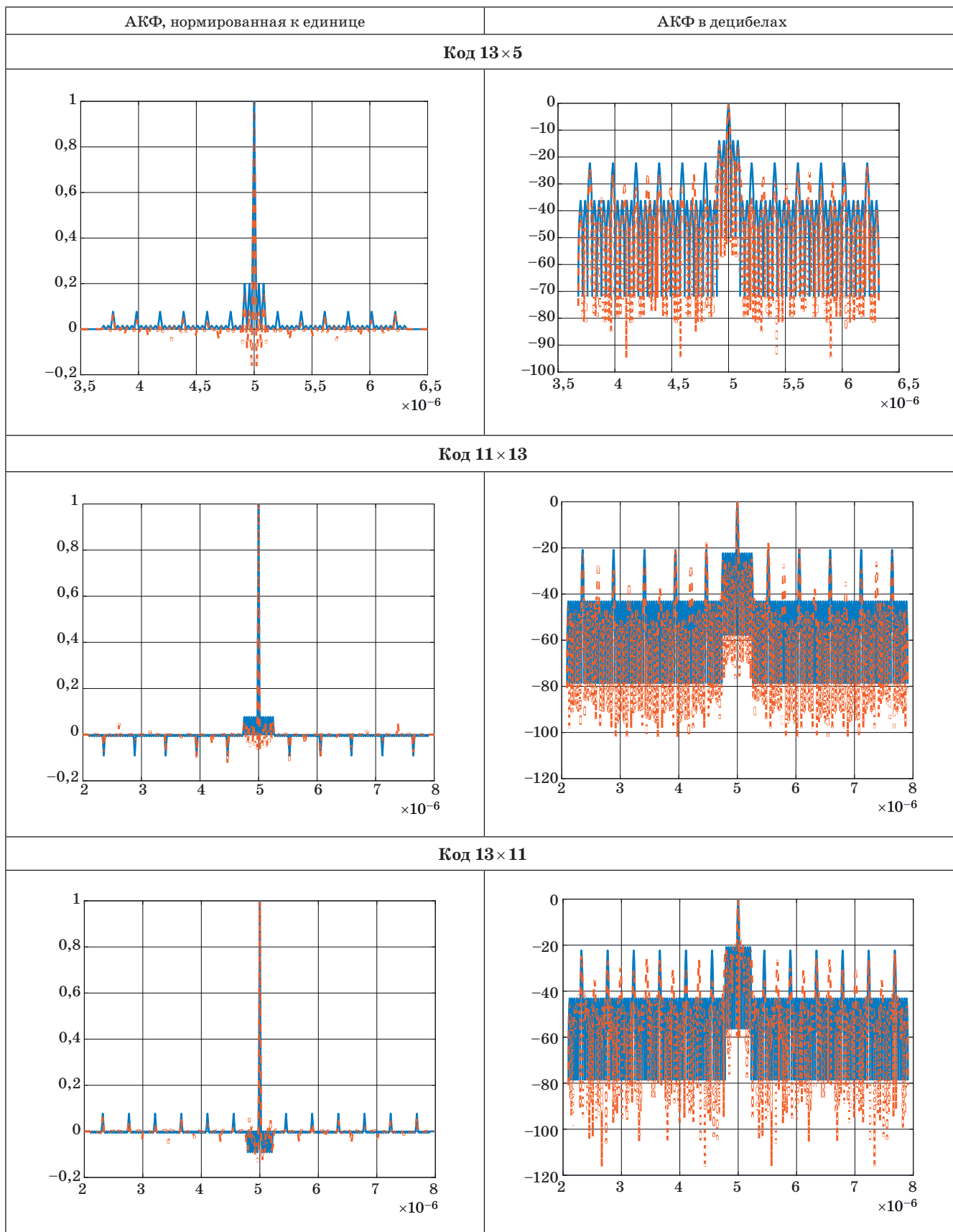
- Продолжение табл. 3
- Table 3 (continued)



- Продолжение табл. 3
- Table 3 (continued)

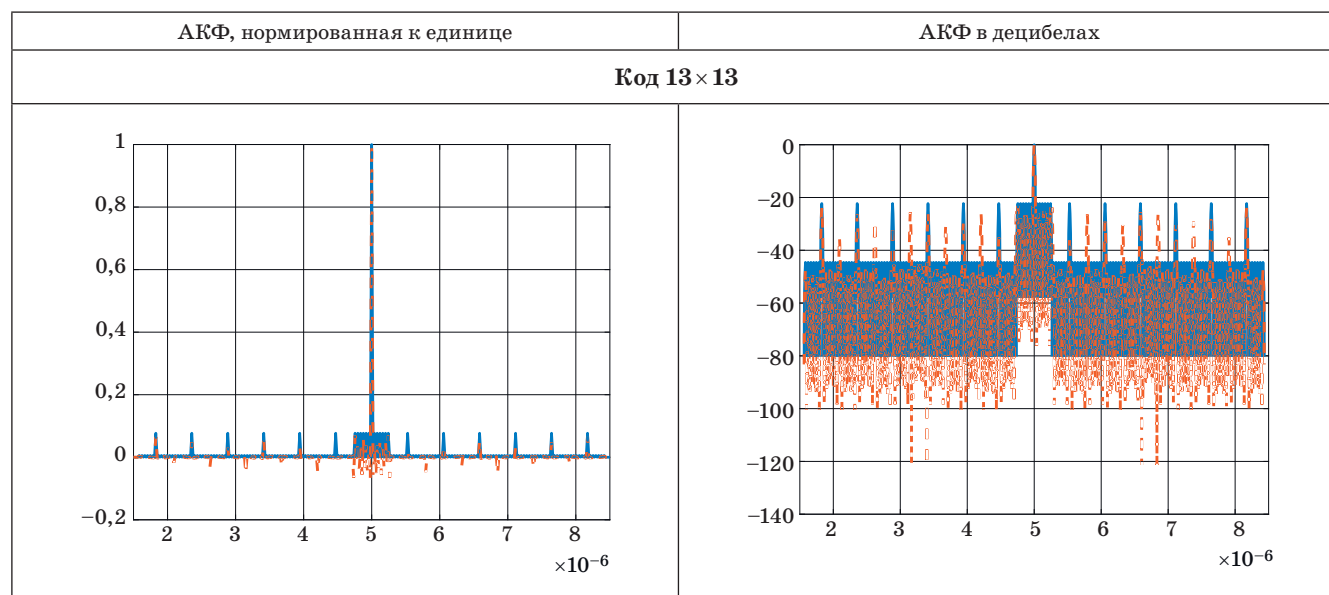


- Продолжение табл. 3
- Table 3 (continued)





- Окончание табл. 3
- Table 3 (completed)



типа НМК — НМК превышают по своим характеристикам аналогичные конструкции типа Баркер — Баркер для следующих комбинаций:  $5 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $5 \times 7$ ,  $5 \times 11$ ,  $5 \times 13$ ,  $7 \times 5$ ,  $11 \times 5$ ,  $13 \times 3$ ,  $13 \times 5$ ,  $13 \times 13$ , — что позволяет сделать вывод о целесообразности и перспективности их использования в современных системах обнаружения.

## Заключение

Основным результатом проведенного исследования, дающим мотивацию к развитию теории кодирования в части разработки основ построения новых помехоустойчивых кодов и вложенных кодовых комбинаций, является предложенный отход от существующего представления кодов в паре  $\{1, -1\}$  и использование для кодирования пар  $\{1, -b\}$  и  $\{a, -b\}$ .

Полученные в работе новые коды обладают лучшими характеристиками, чем известные коды Баркера, и являются результатами, дополняющими существующую теорию кодирования и цифровой обработки сигналов.

Практическая значимость предложенного решения заключается в развитии методов и алгоритмов обработки сложных кодомодулированных сигналов в радиолокационных и телекоммуникационных системах, работающих в условиях сложной помеховой обстановки.

Предложенные в работе решения позволяют улучшить характеристики измерителей радиолокационных систем, надежность передачи цифровой информации в телекоммуникационных радиоканалах, а также повысить эффективность применения новых кодовых конструкций в оптических, акустических, сверхширокополосных и других системах при решении задачи обнаружения сигнала на фоне помех [2, 11–16].

## Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ при проведении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2.2200.2017/4.6.

## Литература

1. Шахнович И. В. *Современные технологии беспроводной связи*. М., Техносфера, 2006. 288 с.
2. Richard Klemm (ed.). *Novel Radar Techniques and Applications*. Vol 1. *Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar*. London, Scitech Publishing, 2017. 951 p.
3. Moser G., Zerubia J. (eds.). *Mathematical Models for Remote Sensing Image Processing: Models and Methods for the Analysis of 2D Satellite and Aerial Images*. Springer, 2018. 446 p.
4. Шостко И. С., Таха А., Соседка Ю. Э. Анализ моделей сверхширокополосных сигналов для инфокоммуникационных сетей. *Проблемы телекоммуникаций*, 2012, № 4, с. 45–62. <http://pt.journal.kh>.

- ua/2012/4/1/124\_shostko\_uwb.pdf (дата обращения: 29.04.2019).
5. **Ненасhev В. А., Сергеев А. М., Капранова Е. А.** Исследование и анализ автокорреляционных функций кодовых последовательностей, сформированных на основе моноциклических квазиортогональных матриц. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 4, с. 9–14. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-4-9-14>
  6. **Рожнев А. Ю., Калинин П. М., Волынская А. В.** Исследование надежности комбинированных сигналов Баркера. Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. трудов / под ред. Вл. В. Сапожникова. СПб., Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. С. 87–92.
  7. Поиск и классификация симметричных квазиортогональных матриц и их применение в задачах обработки и передачи информации в открытых радиоканалах: отчет о НИР (промежуточный, 2 этап) / Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения (ГУАП); руководитель М. Б. Сергеев; № ГР АААА-А17-117042710042-9; СПб., ГУАП, 2019. 111 с.
  8. **Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** Матрицы Мерсенна и Адамара. *Информационно-управляющие системы*, 2016, № 1, с. 2–15. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.2
  9. **Сергеев А. М.** О взаимосвязи одного вида квазиортогональных матриц, построенных на порядках последовательностей  $4k$  и  $4k - 1$ . *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 2017, № 7, с. 12–17.
  10. **Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** Расширение гипотезы Райзера на двучиклические структуры и разрешимость матриц Адамара орнаментом в виде бицикла с двойной каймой. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 1, с. 2–10. doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.1.2
  11. **Трухачев А. А.** *Радиолокационные сигналы и их применения*. М., Воениздат, 2005. 320 с.
  12. **Shepeta A. P., Makhlin A. M., Nenashev V. A. and Kryachko A. F.** Performance of UWB signal detecting circuits. *XXI International Conference “Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems” (WECONF)*, Saint-Petersburg, 2018, pp. 1–4. doi:10.1109/WECONF.2018.8604440
  13. **Merrill I. Skolnik.** *Radar handbook*. 3rd edition. 2008. 1352 p.
  14. **Блаунштейн Н. Ш., Сергеев М. Б., Шепета А. П.** *Прикладные аспекты электродинамики*. СПб., Аграф+, 2016. 272 с.
  15. **Blaunstein N., Christodoulou C., Sergeev M.** *Introduction to Radio Engineering*. CRC Press, 2016. 286 p.
  16. **Rawat B. S., Trivedi A., Manhas S., Karwal V. (eds.)** *Advances in Signal Processing and Communication*. Singapore, Springer, 2019. 618 p.

UDC 621.391.82

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-71-81

**Nested code sequences of Barker — Mersenne — Raghavarao**M. B. Sergeev<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-3845-9277, mbse@mail.ruV. A. Nenashev<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-5285-2051A. M. Sergeev<sup>a</sup>, Senior Lecturer, orcid.org/0000-0002-4788-9869<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The problem of noise-free encoding for an open radio channel is of great importance for data transfer. The results presented in this paper are aimed at stimulating scientific interest in new codes and bases derived from quasi-orthogonal matrices, as a basis for the revision of signal processing algorithms. **Purpose:** Search for new code sequences as combinations of codes formed from the rows of Mersenne and Raghavarao quasi-orthogonal matrices, as well as complex and more efficient Barker — Mersenne — Raghavarao codes. **Results:** We studied nested code sequences derived from the rows of quasi-orthogonal cyclic matrices of Mersenne, Raghavarao and Hadamard, providing estimates for the characteristics of the autocorrelation function of nested Barker, Mersenne and Raghavarao codes, and their combinations: in particular, the ratio between the main peak and the maximum positive and negative “side lobes”. We have synthesized new codes, including nested ones, formed on the basis of quasi-orthogonal matrices with better characteristics than the known Barker codes and their nested constructions. The results are significant, as this research influences the establishment and development of methods for isolation, detection and processing of useful information. The results of the work have a long aftermath because new original code synthesis methods need to be studied, modified, generalized and expanded for new application fields. **Practical relevance:** The practical application of the obtained results guarantees an increase in accuracy of location systems, and detection of a useful signal in noisy background. In particular, these results can be used in radar systems with high distance resolution, when detecting physical objects, including hidden ones.

**Keywords** — monocyclic quasi-orthogonal matrices, Mersenne codes, Barker codes, Raghavarao codes, code modulation, signal coding, noise immunity, autocorrelation function, nested code sequences, main peak to side lobe ratio, side lobe.

**For citation:** Sergeev M. B., Nenashev V. A., Sergeev A. M. Nested code sequences of Barker — Mersenne — Raghavarao. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 71–81 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-71-81

## References

1. Shakhnovich I. V. *Sovremennye tekhnologii besprovodnoj svyazi* [Modern wireless communication technologies]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 288 p.
2. Richard Klemm (ed.). *Novel Radar Techniques and Applications*. Vol 1. *Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar*. London, Scitech Publishing, 2017. 951 p.
3. Moser G., Zerubia J. (eds.) *Mathematical Models for Remote Sensing Image Processing: Models and Methods for the Analysis of 2D Satellite and Aerial Images*. Springer, 2018. 446 p.
4. Shostko I. S., Takha A., and Neighbor Yu. E. Analysis of ultra wideband signal models for infocommunication networks. *Problemy telekommunikacij*, 2012, no. 4 (9), pp. 45–62. Available at: [http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124\\_shostko\\_uwb.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124_shostko_uwb.pdf) (accessed 5 August 2013) (In Russian).
5. Nenashev V. A., Sergeev A. M., Kapranova E. A. Research and analysis of autocorrelation functions of code sequences formed on the basis of monocyclic quasi-orthogonal matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 9–14 (In Russian). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-4-9-14>
6. Rozhnev A. Yu., Kalinin P. M., Volynskaya A. V. *Issledovanie nadezhnosti kombinirovannykh signalov Barkera* [Investigation of the reliability of the combined Barker signals. In: Collection of scientific works “Actual problems of the development of railway automation and remote control systems”]. Ed. Vl. V. Sapozhnikova. Saint-Petersburg, Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Publ., 2013. Pp. 87–92.
7. Sergeev M. B., et al. *Poisk i klassifikaciya simmetrichnykh kvaziortogonal'nykh matric i ih primenenie v zadachah obrabotki i peredachi informacii v otkrytykh radiokanalakh* [Search and classification of symmetric quasi-orthogonal matrices and their application in the problems of processing and transmitting information in open radio channels]. Research Report. State reg. No. AAAA-A17-117042710042. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2019. 111 p.
8. Balonin N. A., Sergeev M. B. Mersenne and Hadamard matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 1, pp. 2–15 (In Russian). doi:10.15217/is sn1684-8853.2016.1.2
9. Sergeev A. M. On the interrelation of one type of quasi-orthogonal matrices constructed on the orders of the  $4k$  and  $4k - 1$  sequences. *Izvestiya SPbGETU “LETI”*, 2017, no. 7, pp. 12–17 (In Russian).
10. Balonin N. A., Sergeev M. B. Ryser’s conjecture expansion for bicirculant strictures and Hadamard matrix resolvability by double-border bicycle ornament. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 2–10. doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.1.2
11. Trukhachev A. A. *Radiolokacionnye signaly i ih primeneniya* [Radar Signals and their Applications]. Moscow, Voenizdat Publ., 2005. 320 p. (In Russian).
12. Shepeta A. P., Makhlin A. M., Nenashev V. A., and Kryachko A. F. Performance of UWB signal detecting circuits. *XXI International Conference “Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems” (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, 2018, pp. 1–4. doi:10.1109/WECONF.2018.8604440
13. Merrill I. Skolnik. *Radar handbook*. 3rd edition. 2008. 1352 p.
14. Blaunstein N. S., Sergeev M. B., Shepeta A. P. *Prikladnye aspekty elektrodinamiki* [Applied Aspects of Electrodynamics]. Saint-Petersburg, Agraf+ Publ., 2016. 272 p.
15. Blaunstein N., Christodoulou C., Sergeev M. *Introduction to Radio Engineering*. CRC Press, 2016. 286 p.
16. Rawat B. S., Trivedi A., Manhas S., Karwal V. (eds.) *Advances in Signal Processing and Communication*. Springer, Singapore, 2019. 618 p.

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail ([ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*



УДК 519.21:537.86

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-82-93

## Случайные процессы со случайными переходами между устойчивыми состояниями

В. И. Хименко<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-3005-052X](https://orcid.org/0000-0003-3005-052X), [vih.13@yandex.ru](mailto:vih.13@yandex.ru)<sup>а</sup>ОАО «НИО ЦИТ «Петрокомета», Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** актуальность исследований случайных процессов с несколькими устойчивыми состояниями и случайными переходами между ними объясняется широким спектром практических задач, необходимостью изучения детальной информационной структуры и отсутствием единого подхода к описанию и вероятностному анализу подобного класса процессов. **Цель:** исследование основных вероятностных характеристик случайных процессов с двумя устойчивыми состояниями и вероятностный анализ принципа управления хаотическими переходами при различных управляющих воздействиях. **Результаты:** показаны возможности представления и предварительного качественного анализа структуры случайных процессов с двумя устойчивыми состояниями на фазовой плоскости и в псевдофазовом пространстве. Предложена общая вероятностная модель для исследуемых процессов в виде двухкомпонентной вероятностной «смеси» распределений. Выполнен вероятностный анализ принципов управления случайными переходами между различными состояниями. Определены основные вероятностные характеристики процессов при управляющих воздействиях с различными спектрально-корреляционными свойствами и изменяющемся пороговом уровне при случайных переходах. На примере «высоких» пороговых уровней выполнен анализ пуассоновской модели случайного потока переходов. **Практическая значимость:** возможности объединения методов визуального, качественного и аналитического исследования при изучении динамических систем с несколькими устойчивыми состояниями. Предложенные вероятностные модели, независимо от физической природы рассматриваемых процессов, могут использоваться в задачах вероятностного анализа, задачах управления вероятностной структурой случайных переходов, задачах имитационного моделирования физических, технических и биологических систем со случайными переключениями.

**Ключевые слова** — случайные процессы, случайные переходы, фазовое пространство состояний, вероятностный анализ, характеристики пересечений уровней, управление хаотическими переключениями.

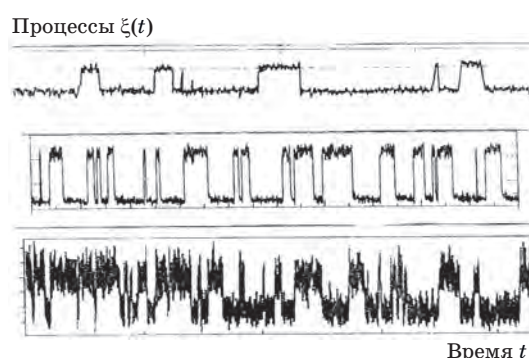
Для цитирования: Хименко В. И. Случайные процессы со случайными переходами между устойчивыми состояниями. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 82–93. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-82-93

For citation: Khimenko V. I. Random processes with random transitions between stable states. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 82–93 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-82-93

### Введение

Многие физические явления и процессы связаны со сложными динамическими системами, которые имеют несколько устойчивых состояний и в случайные моменты времени переходят из одного состояния в другое. Наиболее распространенным классом подобных систем являются динамические системы с двумя устойчивыми состояниями. При их описании и анализе возникает необходимость рассмотрения случайных процессов со случайными переходами или случайными переключениями. Это характерно, в частности, для анализа широкого класса релейных систем автоматического управления [1–3], для изучения работы ионных каналов в системах нейрофизиологии [4–6], для исследования структуры хаотических переходов в нелинейных колебательных системах [7, 8]. Моделями процессов с двумя устойчивыми состояниями и хаотическими переходами описываются многие алгоритмы бинарного представления информации [9, 10], пороговые алгоритмы в системах обнаружения, классификации и общей теории распознавания образов [11–13], алгоритмы оперативной обработки данных в системах компьютерного зрения [14], телеметрии, мониторинга и связи [15, 16].

Примеры типовой структуры случайных процессов со случайными переключениями — переходами между двумя устойчивыми состояниями показаны на рис. 1 в виде отдельных выборочных функций. Эти функции относятся к различным направлениям исследований (сверху вниз): 1) процесс переключения ионных каналов в системах нейрофизиологии; 2) хаотические переходы в нелинейных колебательных системах; 3) ре-



■ **Рис. 1.** Характерный вид выборочных функций случайных процессов со случайными переходами

■ **Fig. 1.** Characteristic look of selected functions of random processes with random transitions

гистрация on-off прыжков в квантовой динамике молекул.

В зависимости от рассматриваемой области такие процессы часто относятся к классу процессов «включено-выключено» [5, 8], «все или ничего» [6], типа «on-off» [16–18]. В задачах анализа релейных систем, задачах бинарной и пороговой обработки информации [2, 10–13] подобные процессы обычно рассматриваются как случайные последовательности со случайными длительностями интервалов и средними значениями «1–0» или «–1 +1» на этих интервалах.

По своей общей структуре случайные процессы  $\xi(t)$  со случайными переходами относятся к классу случайных функций с двойной стохастичностью. Здесь наглядно проявляются случайные составляющие с двумя различными временными масштабами: изменения процесса  $\xi(t)$  в области его устойчивых состояний и случайные изменения, связанные с переходами между этими состояниями. Кроме того, случайные переключения приводят к нарушениям свойств непрерывности, разрывам функций  $\xi(t)$  и, соответственно, к разрывам их производных  $\xi'(t)$ .

Все эти особенности усложняют исследования вероятностных свойств подобного класса процессов. Во многих прикладных задачах основную роль начинают при этом играть описательные подходы и визуальные методы анализа. Отсутствие единого общего подхода к исследованиям и отсутствие простых аналитических результатов для описания вероятностной структуры процессов часто приводит к использованию численных методов и вынужденному переходу к рассмотрению лишь отдельных частных примеров. При этом даже накопленные экспериментальные данные не во всех реальных задачах удается удовлетворительно описать, объяснить и эффективно использовать. Наглядным примером здесь могут служить сложные, интересные и практически важные эксперименты в нейрофизиологии [5, 6] и нелинейной динамике [7].

Основная цель данной работы — исследование общей вероятностной структуры случайных процессов с двумя устойчивыми состояниями и вероятностный анализ принципа управления хаотическими переходами при различных управляющих воздействиях.

### Пространство состояний и фазовые траектории процессов

Один из основных подходов к исследованиям динамических систем и структуры сложных процессов связан с определением пространства состояний и рассмотрением особенностей поведения исследуемых процессов в этом пространстве

[1, 8, 19]. Воспользуемся таким подходом и рассмотрим здесь возможности анализа вероятностной структуры случайных процессов с двумя устойчивыми состояниями и случайными переходами между ними.

Будем считать, что исследуемый процесс  $\xi(t)$  является функцией времени  $t$ , и его состояние в произвольный момент времени  $t$  можно характеризовать значением  $\xi(t)$  и скоростью изменения этого значения  $\xi'(t) = d\xi(t)/dt$ . При таком описании пространство состояний исследуемого процесса  $\xi(t)$  представляет собой типовую форму фазовой плоскости  $(x, y) = (\xi, \xi')$ .

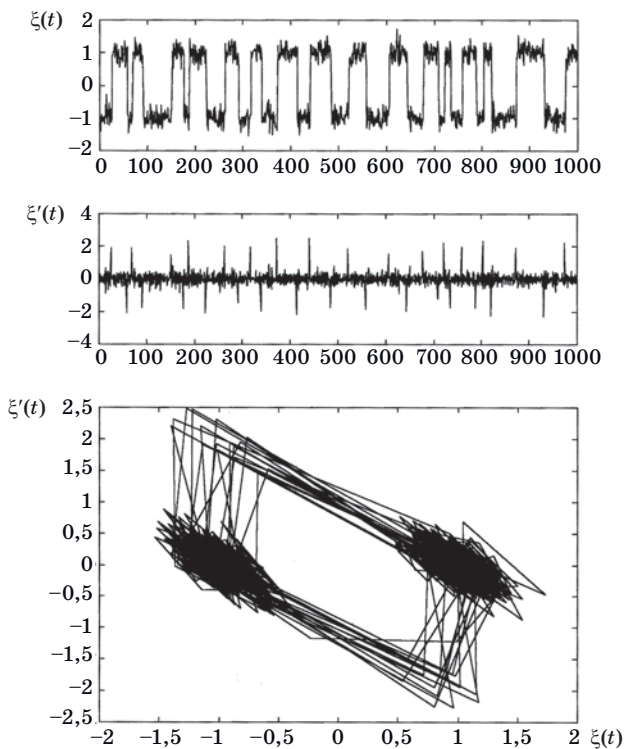
Выборочные функции, или отдельные реализации процесса  $\xi(t)$  и его производной  $\xi'(t)$ , на рассматриваемом интервале времени  $t \in [t_0, t_0 + T]$  можно интерпретировать как координаты точки на плоскости  $(\xi, \xi') = (\xi(t), \xi'(t))$ . В этом случае векторный процесс  $\{\xi(t), \xi'(t)\}$  геометрически можно представить на фазовой плоскости  $(\xi, \xi')$  в виде семейства траекторий  $L(\xi, \xi'; t)$ . При изменении параметра  $t$  на интервале  $[t_0, t_0 + T]$  движение изображающей точки с координатами  $(\xi(t), \xi'(t))$  описывает на плоскости  $(\xi, \xi')$  особенности поведения фазовых траекторий  $L(\xi, \xi'; t)$  и, соответственно, в каждый момент времени  $t \in [t_0, t_0 + T]$  отражает информацию о текущем состоянии исследуемого процесса  $\xi(t)$ .

На рис. 2 показана отдельная реализация  $\xi(t)$ ,  $t \in [t_0, t_0 + T] = [0, T]$  рассматриваемого процесса  $\xi(t)$  и характер производной  $\xi'(t)$  для этой выборочной функции  $\xi(t)$ . По этим функциям  $\xi(t)$  и  $\xi'(t)$  на плоскости  $(\xi, \xi')$  построены фазовые траектории  $L(\xi, \xi'; t)$ ,  $t \in [0, T]$ , отображающие структуру фазового портрета случайного процесса  $\xi(t)$  в пространстве состояний  $(\xi, \xi') = (\xi(t), \xi'(t))$  на интервале времени  $t \in [0, T]$ . Анализ фазовых траекторий  $L(\xi, \xi'; t)$  позволяет получить достаточно много информации о характере общей вероятностной структуры исследуемого процесса  $\xi(t)$ .

Прежде всего, здесь наглядно проявляется различный характер поведения траекторий  $L(\xi, \xi'; t)$  в отдельных областях фазового пространства  $(\xi, \xi')$ . На фазовом портрете (см. рис. 2) сформированы две наиболее вероятные области устойчивого состояния процесса  $\xi(t)$ . Эти области расположены, соответственно, в окрестностях средних значений (локальных математических ожиданий) с координатами:

$$\begin{aligned} \text{состояние (+1): } m_+(\xi, \xi') &= m_+(+1, 0); \\ \text{состояние (-1): } m_-(\xi, \xi') &= m_-(-1, 0). \end{aligned} \quad (1)$$

В области одного и другого устойчивого состояния исследуемый процесс  $\xi(t)$  ведет себя как случайный широкополосный флуктуационный шум. На фазовом портрете такие области формируются в виде эллипсов рассеяния и по своей



■ **Рис. 2.** Представление исследуемого процесса на фазовой плоскости  
 ■ **Fig. 2.** Presentation of the analyzed process on phase plane

сути отображают фазовый портрет флуктуационной компоненты исследуемого процесса  $\xi(t)$ . Математическое ожидание  $m(\xi') = M\{\xi'(t)\}$  производной  $\xi'(t)$  в области устойчивых состояний процесса  $\xi(t) > 0$  и  $\xi(t) < 0$  соответствует нулевому значению:

$$\begin{aligned} m_+(\xi') &= M\{\xi'(t) | \xi(t) > 0\} = 0; \\ m_-(\xi') &= M\{\xi'(t) | \xi(t) < 0\} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Такая особенность (2) хорошо согласуется с общими свойствами операции дифференцирования случайных функций [20, 21].

Можно, кроме того, заметить, что степень рассеяния значений  $\xi(t)$  и  $\xi'(t)$  в окрестностях устойчивых состояний (1) позволяет выполнять приближенное оценивание параметров среднего квадратического отклонения для флуктуационной компоненты процесса  $\xi(t)$  и ее производной  $\xi'(t)$ .

Еще одна особенность фазового портрета проявляется в ориентации на плоскости  $(\xi, \xi')$  областей устойчивого состояния. Их наклонное расположение относительно координатных осей показывает существование корреляционной связи между значениями  $\xi(t)$  и  $\xi'(t)$ . Объясняется это достаточно просто: моменты переходов процесса  $\xi(t)$  из одного устойчивого состояния в другое всегда связаны с резкими изменениями значений

производной  $\xi'(t)$ . Такая взаимосвязь, в свою очередь, приводит к корреляционной зависимости случайных функций в совпадающие моменты времени.

На фазовых траекториях  $L(\xi, \xi'; t)$ , помимо областей устойчивых состояний, наглядно отображаются особенности случайных переходов процесса  $\xi(t)$  между этими состояниями. Каждый такой переход на плоскости  $(\xi, \xi')$  состоит из резкого «скачка» производной  $\xi'(t)$  и непосредственного изменения процесса  $\xi(t)$ . Импульсные изменения функции  $\xi'(t)$  относительно ее математического ожидания  $m(\xi') = M\{\xi'(t)\} = 0$  происходят в область положительных  $\xi'(t) > 0$  и отрицательных  $\xi'(t) < 0$  значений, они последовательно чередуются между собой и отражают направление перехода процесса  $\xi(t)$  вверх — состояние (+1) или вниз — состояние (-1). Одновременно с изменением состояния процесса  $\xi(t)$  происходит возвращение производной  $\xi'(t)$  в область своего устойчивого положения с математическим ожиданием  $m(\xi') = 0$ .

### Особенности псевдофазового пространства

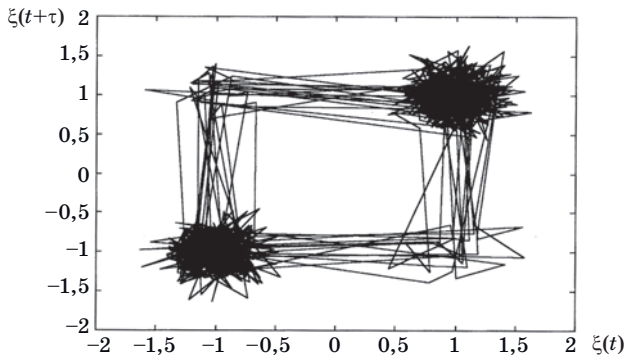
Характерной особенностью представления случайных процессов  $\xi(t)$  на фазовой плоскости  $(\xi, \xi')$  является возможность отображения информации одновременно о значениях исследуемого процесса  $\xi(t)$  и значениях его производной  $\xi'(t)$ . По существу, вероятностное поведение случайного процесса  $\xi(t)$  при таком подходе описывается особенностями поведения векторного процесса  $\{\xi(t), \xi'(t)\}$  на плоскости  $(\xi, \xi')$ .

Получение подобной информации обычно связано с предварительным выполнением операции дифференцирования  $\xi'(t) = d\xi(t) / dt$ . Процедура дифференцирования относится к классу типовых линейных преобразований, однако на практике, при обработке случайных функций со сложной спектральной структурой, не всегда эта операция удобна для аппаратурной реализации.

Для упрощения исследований в некоторых задачах анализа вместо фазовой плоскости  $(\xi, \xi')$  могут использоваться представления случайных процессов  $\xi(t)$  на псевдофазовой плоскости [21, 22]. При таком подходе рассмотрение процесса  $\xi(t)$  выполняется на уровне анализа векторного процесса  $\{\xi(t), \xi(t + \tau)\}$ , псевдофазовой плоскости  $(\xi, \xi_\tau)$  и псевдофазовых траекторий  $L(\xi, \xi_\tau; t)$ . Параметр  $\tau$  представляет здесь некоторый фиксированный временной сдвиг  $\tau = \Delta t = \text{const}, \tau > 0$ .

Показан (рис. 3) характер псевдофазовых траекторий  $L(\xi, \xi_\tau; t)$  для выборочной функции  $\xi(t)$ ,  $t \in [t_0, t_0 + T] = [0, T]$  исследуемого случайного процесса  $\xi(t)$  с двумя устойчивыми состояниями. Для наглядности и удобства сравнений псевдофа-





■ **Рис. 3.** Представление исследуемого процесса на псевдофазовой плоскости  
 ■ **Fig. 3.** Presentation of the analyzed process on pseudofazovoj plane

зовое отображение  $L(\xi, \xi_\tau; t)$  на рис. 3 и фазовое отображение  $L(\xi, \xi'; t)$  на рис. 2 построены для одной и той же выборочной функции процесса  $\xi(t)$ ,  $t \in [0, T]$ .

Полезно здесь подчеркнуть, что основой использования псевдофазовых представлений является то, что при малых интервалах  $\tau = \Delta t$  значение  $\xi(t + \Delta t)$  связано с производной  $\xi'(t)$  процесса  $\xi(t)$ . Более того, аппаратное вычисление производной  $\xi'(t)$  во многих задачах выполняется на основе алгоритма

$$\xi'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\xi(t + \Delta t) - \xi(t)}{\Delta t},$$

и эта особенность еще раз дополнительно подтверждает близость методов псевдофазового пространства и методов классического фазового пространства состояний.

### Общая вероятностная модель случайного процесса

Представление случайных процессов  $\xi(t)$  в пространстве состояний  $(\xi, \xi')$  или  $(\xi, \xi_\tau)$  позволяет при решении многих практических задач получать наглядную информацию о вероятностной структуре исследуемых процессов  $\xi(t)$  на уровне визуального, качественного анализа, по общему виду и характерным особенностям фазовых или псевдофазовых траекторий  $L(\xi, \xi'; t)$  и  $L(\xi, \xi_\tau; t)$ .

Рассмотрим теперь возможности более полного и более точного определения вероятностных характеристик — возможности построения общей вероятностной модели исследуемого процесса  $\xi(t)$  и возможности анализа структуры таких процессов на уровне количественного описания его вероятностных свойств.

Предварительный анализ случайных процессов  $\xi(t)$  с двумя устойчивыми состояниями (см. рис. 1) показывает, что в большинстве практических задач [4–18] структура процессов  $\xi(t)$  в области устойчивых состояний близка к структуре широкополосного флюктуационного шума. Эта особенность позволяет воспользоваться гауссовой моделью флюктуаций и для описания рассматриваемых процессов  $\xi(t)$  записать общую вероятностную модель в виде двухкомпонентной «вероятностной смеси»:

$$p_\xi(\xi; t) = \alpha_1 p_1(\xi | m_1, \sigma_1) + \alpha_2 p_2(\xi | m_2, \sigma_2) =$$

$$= \frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi - m_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] +$$

$$+ \frac{\alpha_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi - m_2)^2}{2\sigma_2^2}\right],$$

$$\alpha_1, \alpha_2 \in [0, 1], \alpha_1 + \alpha_2 = 1. \quad (3)$$

Плотность вероятностей  $p_\xi(\xi; t)$  состоит здесь из двух гауссовых функций  $p_1(\xi | m_1, \sigma_1)$  и  $p_2(\xi | m_2, \sigma_2)$ , каждая из которых описывает соответствующее состояние исследуемого процесса  $\xi(t)$ . Параметры  $m_1$  и  $m_2$  характеризуют математические ожидания, а  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  — дисперсии флюктуационных составляющих в каждом устойчивом состоянии процесса  $\xi(t)$ . Весовые коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в выражении (3) играют роль вероятностей нахождения исследуемого процесса  $\xi(t)$  в одном или другом состоянии.

Вероятностная модель (3) является простой и достаточно общей. За счет выбора параметров  $\alpha_i, m_i, \sigma_i^2, i = 1, 2$  она позволяет описывать случайные процессы  $\xi(t)$  с различными устойчивыми состояниями  $m_1, m_2$ , различной интенсивностью флюктуационных компонент  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  и различными вероятностями  $\alpha_1, \alpha_2$ .

В частности, применительно к рассматриваемым процессам (см. рис. 2 и 3) с устойчивыми состояниями  $\xi = \pm 1$  в модели распределения (3) следует положить  $m_1 = 1, m_2 = -1$ , а для значений дисперсий можно считать  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ :

$$p_\xi(\xi; t) =$$

$$= \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \left\{ \alpha^+ \exp\left[-\frac{(\xi - 1)^2}{2\sigma^2}\right] + \alpha^- \exp\left[-\frac{(\xi + 1)^2}{2\sigma^2}\right] \right\},$$

$$\alpha_1 = \alpha^+, \alpha_2 = \alpha^-, \alpha^- = 1 - \alpha^+. \quad (4)$$

В задачах вероятностного анализа одной из наиболее простых и распространенных характеристик является значение относительной длительности пребывания процесса  $\xi(t)$  в том или ином состоянии. Рассмотрим определение такой характеристики для исследуемого процесса  $\xi(t)$

и состояния  $\xi(t) > 0$ . Будем при этом считать, что наблюдению доступна выборочная функция  $\xi(t)$ ,  $t \in [t_0, t_0 + T] = [0, T]$  на некотором интервале длительностью  $T < \infty$ .

Если ввести здесь вспомогательную индикаторную функцию

$$x(t; 0) = I\{\xi(t) \geq 0\} = \begin{cases} 1, & \xi(t) \geq 0; \\ 0, & \xi(t) \leq 0, \end{cases} \quad (5)$$

то для  $\xi(t)$  можно определить случайную величину

$$t^+(0) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t; 0) dt, \quad (6)$$

которая характеризует относительную длительность пребывания рассматриваемой траектории  $\xi(t)$ ,  $t \in [0, T]$  в состоянии  $\xi(t) > 0$ .

Математическое ожидание  $T^+(0) = M\{t^+(0)\}$  случайной величины  $t^+(0)$  в соответствии с определением (6) равно

$$T^+(0) = \frac{1}{T} \int_0^T M\{x(t; 0)\} dt = M\{x(t; 0)\}. \quad (7)$$

Учитывая здесь плотность вероятностей (4), определение (5) и равенство

$$M\{x(t; 0)\} = 1 \cdot P\{\xi(t) > 0\} + 0 \cdot P\{\xi(t) < 0\},$$

для параметра (7) получим окончательное выражение

$$T^+(0) = P\{\xi(t) \geq 0\} = \int_0^{\infty} p_{\xi}(\xi; t) d\xi = \alpha^+. \quad (8)$$

По аналогии с этим результатом можно записать простое выражение для относительной длительности пребывания исследуемого процесса  $\xi(t)$  в состоянии  $\xi(t) < 0$

$$T^-(0) = P\{\xi(t) < 0\} = 1 - \alpha^+ = \alpha^-. \quad (9)$$

Приведенные результаты (8) и (9) позволяют выделить одну характерную особенность исследуемого процесса  $\xi(t)$ . Так, если для относительных длительностей пребывания (8) и (9) выполняется равенство  $T^+(0) = T^-(0)$ , то процесс  $\xi(t)$  с равными вероятностями может находиться в любом из двух устойчивых состояний, т. е.  $P\{\xi(t) > 0\} = P\{\xi(t) < 0\}$ . Это, в свою очередь, приводит к равенству  $\alpha^+ = \alpha^- = 0,5$  и свойству симметрии  $p_{\xi}(\xi; t) = p_{\xi}(-\xi; t)$  общей плотности вероятностей (4). Исследуемый процесс  $\xi(t)$  будет при этом характеризоваться математическим ожиданием

$$m_{\xi} = M\{\xi(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \xi p_{\xi}(\xi; t) d\xi = 0. \quad (10)$$

Если перечисленные условия не выполняются и вероятности  $P\{\xi(t) > 0\} \neq P\{\xi(t) < 0\}$ , то для функции (4) нарушается свойство симметрии  $\alpha^+ \neq \alpha^-$ ,  $p_{\xi}(\xi; t) \neq p_{\xi}(-\xi; t)$ , а исследуемый процесс  $\xi(t)$  при сохранении своих устойчивых состояний  $\xi = \pm 1$  будет характеризоваться определенным смещением

$$m_{\xi} = M\{\xi(t)\} = 1 \cdot P\{\xi(t) > 0\} + (-1) \cdot P\{\xi(t) < 0\} = \alpha^+ - \alpha^-. \quad (11)$$

Все эти особенности (8)–(11) важны и при аналитических, и при экспериментальных исследованиях процессов  $\xi(t)$  с двумя устойчивыми состояниями.

### Механизм управления случайными переходами

Для случайных процессов  $\xi(t)$  с несколькими устойчивыми состояниями многие вероятностные характеристики связаны с особенностями управления случайными переходами между этими состояниями. В зависимости от исследуемых систем, рассматриваемых процессов и решаемых задач, очевидно, принципы управления могут существенно различаться.

Рассмотрим здесь один из наиболее общих подходов к построению и вероятностному анализу механизма управления случайными переходами в динамических системах с двумя устойчивыми состояниями.

В большинстве практических задач при исследованиях динамических систем смена состояния или переход системы из одного состояния в другое может рассматриваться как реакция системы на некоторое внешнее или внутреннее возмущение — воздействие. Такие воздействия часто интерпретируются как управляющее воздействие или управляющий процесс.

При этом условия возникновения переходов, как правило, связаны с преодолением управляющим воздействием некоторого потенциального барьера, заданного порогового уровня или связаны с выходом управляющего процесса за границы определенной области допустимых значений.

В качестве управляющего воздействия, в зависимости от физической природы систем и содержания решаемых задач, могут рассматриваться самые разнообразные детерминированные или случайные процессы. Вместе с тем наиболее общей и наиболее распространенной моделью управляющего воздействия, по-видимому, следует считать модель случайного гауссова процесса. Такая модель хорошо согласуется с большим числом независимых факторов, которые обычно участвуют в формировании управляющих воз-

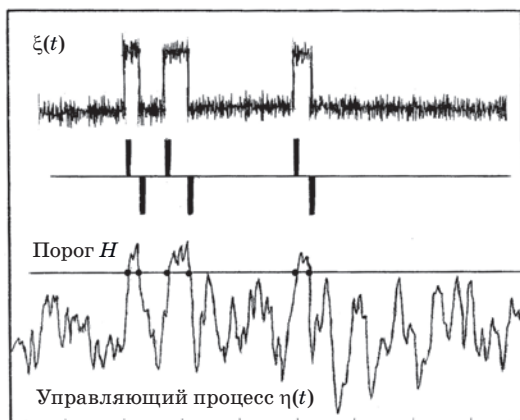
действий. Кроме того, гауссова модель позволяет отразить неизбежное влияние флуктуационных эффектов и согласуется с условиями центральной предельной теоремы теории вероятностей.

С учетом этих особенностей будем считать, что некоторая динамическая система находится в условиях случайных флуктуационных воздействий  $\eta(t)$ , и если эти воздействия достигают определенного порогового значения, исследуемая система меняет свое состояние. При таком подходе можно считать, что каждое пересечение флуктуационным процессом  $\eta(t)$  некоторого порогового уровня  $H$  порождает собой выход исследуемого процесса  $\xi(t)$  из одной области и переход в другую область устойчивого состояния (рис. 4). Флуктуационное воздействие  $\eta(t)$  играет здесь роль управляющего процесса для случайных переходов  $\xi(t)$  между его устойчивыми состояниями.

Очевидно, что пересечения уровня  $H$  могут происходить снизу вверх, т. е. с положительной производной  $\eta'(t) > 0$  (выход процесса  $\eta(t)$  за уровень  $H$ ), и сверху вниз, т. е. с отрицательной производной  $\eta'(t) < 0$  (вход процесса  $\eta(t)$  под уровень  $H$ ). Такие события (пересечения) последовательно чередуются между собой и по своей сути задают направление случайных переходов исследуемого процесса  $\xi(t)$  из одной области в другую область устойчивых состояний.

Рассмотрим возможности более полного анализа основных вероятностных характеристик процесса  $\xi(t)$  при данном способе формирования случайных переходов. Управляющее воздействие  $\eta(t)$  будем считать стационарным гауссовым случайным процессом с математическим ожиданием  $m_\eta = M\{\eta(t)\} = 0$ , дисперсией  $\sigma_\eta^2 = M\{\eta^2(t)\}$  и некоторой корреляционной функцией общего вида

$$R_\eta(\tau) = \sigma_\eta^2 r(\tau), R_\eta(0) = \sigma_\eta^2 < \infty, |r(\tau)| \leq 1. \quad (12)$$



■ **Рис. 4.** Принцип формирования случайных переходов процесса между его устойчивыми состояниями

■ **Fig. 4.** The principle of the formation of random transitions between its stable states

Анализ характеристик пересечений для случайного процесса  $\eta(t)$  связан с рассмотрением совместного поведения случайной функции  $\eta(t)$  и ее производной  $\eta'(t) = d\eta(t)/dt$  в совпадающие моменты времени  $t$ . Для описания этих свойств необходимо определить совместную плотность вероятностей

$$p(\eta, \eta'; t) = p(\eta(t), \eta'(t)).$$

При рассмотрении гауссовых моделей  $\eta(t)$  такие распределения находятся достаточно просто [21, 23]. Так, если для управляющего воздействия  $\eta(t)$  одномерная плотность вероятностей имеет вид

$$p_\eta(\eta; t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\eta^2}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma_\eta^2}\right),$$

$$\eta = \eta(t) \in (-\infty, \infty), \quad (13)$$

то совместная плотность вероятностей для значений  $\eta(t)$  и  $\eta'(t)$  определяется как

$$p(\eta, \eta'; t) = p_\eta(\eta; t) p_{\eta'}(\eta'; t) =$$

$$= \frac{1}{2\pi\sigma_\eta\sigma_*} \exp\left[-\frac{\eta^2}{2\sigma_\eta^2} - \frac{(\eta')^2}{2\sigma_*^2}\right], \quad (14)$$

где  $\sigma_*^2$  — дисперсия производной  $\eta'(t)$ :

$$\sigma_*^2 = D[\eta'(t)] = -\frac{d^2 R_\eta(\tau)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0} = -R''_\eta(0). \quad (15)$$

Результат (14) непосредственно следует из общих свойств устойчивости гауссовых распределений при линейных преобразованиях (в данном случае при дифференцировании) и известного свойства некоррелированности значений  $\eta(t)$  и  $\eta'(t)$  для класса стационарных процессов.

Выражения (12)–(15) являются достаточными исходными данными для определения основных вероятностных характеристик пересечений уровня  $H$  управляющим процессом  $\eta(t)$ . Так, из общей теории выбросов случайных функций [23, 24] для среднего числа положительных пересечений  $N_\eta^+(H, T)$  порогового уровня  $H$  траекторией случайного процесса  $\eta(t)$ ,  $t \in [t_0, t_0 + T] = [0, T]$  на интервале времени длительностью  $T$  можно записать общую формулу

$$N_\eta^+(H, T) = \int_0^T dt \int_0^\infty \eta' p(H, \eta'; t) d\eta', \quad (16)$$

в которой  $p(H, \eta'; t) = p(\eta, \eta'; t)|_{\eta=H}$  — совместная плотность вероятностей для значений  $\eta(t)$  и  $\eta'(t)$  при условии  $\eta(t) = H$ .

По аналогии с этим среднее число отрицательных пересечений  $N_\eta^-(H, T)$  уровня  $H$ , т. е. пере-



сечений с отрицательной производной  $\eta'(t) < 0$ , определяется выражением

$$N_{\eta}^{-}(H, T) = - \int_0^T dt \int_{-\infty}^0 \eta' p(H, \eta'; t) d\eta'. \quad (17)$$

С учетом совместного распределения (14), формулы (16), (17) после простого интегрирования приводят к окончательному общему результату для среднего числа пересечений порогового уровня  $H$  процессом  $\eta(t)$ :

$$N_{\eta}^{+}(H, T) = N_{\eta}^{-}(H, T) = \frac{T}{\sqrt{2\pi}} [-r''(0)]^{1/2} \varphi(h);$$

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2), \quad h = H/\sigma_{\eta}. \quad (18)$$

Если теперь воспользоваться одномерной плотностью вероятностей (13), то можно найти среднее значение относительной длительности пребывания траектории управляющего процесса  $\eta(t)$ ,  $t \in [t_0, t_0 + T] = [0, T]$  над уровнем  $H$

$$T^{+}(H) = M\{\tau^{+}(H)\} = \int_H^{\infty} p_{\eta}(\eta; t) d\eta = 1 - \Phi(h) \quad (19)$$

и на основе (18), (19) определить среднюю длительность положительных выбросов  $\bar{\tau}^{+}(H)$  и среднюю длительность отрицательных выбросов  $\bar{\tau}^{-}(H)$  случайного воздействия  $\eta(t)$  на уровне  $H$ :

$$\begin{aligned} \bar{\tau}^{+}(H) &= M\{\tau^{+}(H)\} = \\ &= \frac{T^{+}(H)}{N_{\eta}^{+}(H, 1)} = \left( \frac{2\pi}{-r''(0)} \right)^{1/2} \frac{1 - \Phi(h)}{\varphi(h)}; \\ \bar{\tau}^{-}(H) &= M\{\tau^{-}(H)\} = \\ &= \frac{T^{-}(H)}{N_{\eta}^{-}(H, 1)} = \left( \frac{2\pi}{-r''(0)} \right)^{1/2} \frac{\Phi(h)}{\varphi(h)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Для удобства численных расчетов характеристики (18)–(20) выражены здесь через табулированные функции [25]

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-y^2/2) dy;$$

$$\varphi(x) = \Phi'(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2). \quad (21)$$

По своей сути результаты (18)–(20) позволяют достаточно полно описать характеристики пересечений порогового уровня  $H$  управляющим воздействием  $\eta(t)$ . Эти характеристики в свою очередь определяют основную вероятностную струк-

туру случайных переходов исследуемого процесса  $\xi(t)$  между его устойчивыми состояниями.

При более детальных исследованиях результаты (18)–(20) могут быть выражены через спектрально-корреляционные свойства управляющих воздействий  $\eta(t)$ . Такая зависимость в данном случае определяется параметром

$$\begin{aligned} -r''(0) &= \sigma_{*}^2 / \sigma_{\eta}^2 = \\ &= \int_0^{\infty} \omega^2 S_{\eta}(\omega) d\omega / \int_0^{\infty} S_{\eta}(\omega) d\omega = \lambda_2, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $S_{\eta}(\omega)$  — спектральная плотность процесса  $\eta(t)$ , а значение  $\lambda_2$  соответствует нормированному спектральному моменту второго порядка.

Если управляющее воздействие  $\eta(t)$  относится к классу широкополосных процессов, то, как правило, его спектральная плотность  $S_{\eta}(\omega)$  сосредоточена в окрестностях частоты  $\omega_0 = 0$ , а корреляционная функция (12) имеет вид

$$R_{\eta}(\tau) = \sigma_{\eta}^2 r(\tau) = \sigma_{\eta}^2 \rho(\tau),$$

где  $\rho(\tau)$  — некоторая монотонно убывающая функция  $\tau$ .

Для таких процессов  $\eta(t)$  значение спектрального момента (22) полностью определяется эффективной шириной  $\Delta\omega_3$  и коэффициентом формы  $\kappa$  спектральной плотности [21, 23]:

$$\lambda_2 = -\sigma_{\eta}^{-2} R_{\eta}''(0) = -\rho''(0) = \kappa^2 \Delta\omega_3^2. \quad (23)$$

Следовательно, при широкополосных гауссовых управляющих воздействиях  $\eta(t)$  на основе выражений (18), (22) и (23) для среднего числа переходов (см. рис. 2) между устойчивыми состояниями случайного процесса  $\xi(t)$  на интервале времени  $t \in [t_0, t_0 + T] = [0, T]$  получим

$$\begin{aligned} N^{+}(H, T) &= N^{-}(H, T) = \\ &= \frac{T}{2\pi} [-r''(0)]^{1/2} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_{\eta}^2}\right) = \\ &= T\kappa\Delta f_3 \exp(-h^2/2). \end{aligned} \quad (24)$$

В этом выражении параметр  $h$  характеризует относительное значение порогового уровня  $h = H/\sigma_{\eta}$ , а  $\Delta f_3 = \Delta\omega_3/2\pi$  соответствует эффективной ширине спектра.

Если в качестве управляющего воздействия (см. рис. 4) рассматривать узкополосный случайный процесс  $\eta(t)$  со средней частотой  $\omega_0$ , то корреляционную функцию для таких процессов можно представить в виде

$$R_{\eta}(\tau) = \sigma_{\eta}^2 r(\tau) = \sigma_{\eta}^2 \rho(\tau) \cos \omega_0 \tau, \quad \omega_0 \gg \Delta\omega_3,$$

а спектральный момент  $\lambda_2$  будет при этом определяться величиной

$$\lambda_2 = -\sigma_\eta^{-2} R_\eta''(0) = \omega_0^2 - \rho''(0) = \omega_0^2 + \kappa^2 \Delta\omega_\eta^2. \quad (25)$$

Таким образом, при узкополосных управляющих воздействиях  $\eta(t)$  среднее число переходов случайного процесса  $\xi(t)$  в соответствии с выражениями (18), (22) и (25) будет определяться как

$$\begin{aligned} N^+(H, T) &= N^-(H, T) = \\ &= \frac{T}{2\pi} \left[ \omega_0^2 + \kappa^2 \Delta\omega_\eta^2 \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_\eta^2}\right) = \\ &= T \frac{\omega_0}{2\pi} \left[ 1 + \kappa^2 \frac{\Delta\omega_\eta^2}{\omega_0^2} \right]^{1/2} \exp(-h^2/2). \end{aligned} \quad (26)$$

Этот результат наглядно показывает, что при узкополосных воздействиях  $\eta(t)$ , помимо формы и ширины спектральной плотности  $S_\eta(\omega)$ , на вероятностную структуру случайных переходов исследуемого процесса  $\xi(t)$  существенное влияние оказывает средняя частота  $\omega_0$  управляющего процесса  $\eta(t)$ .

Важно также подчеркнуть, что при уменьшении относительной ширины спектра  $(\Delta\omega_\eta/\omega_0) \rightarrow 0$  управляющее воздействие  $\eta(t)$  приближается по своей форме к гармоническому колебанию. В подобном случае среднее число переходов (26) процесса  $\xi(t)$  между устойчивыми состояниями в основном определяется значением средней частоты  $f_0 = \omega_0/2\pi$ , а общая структура переходов для  $\xi(t)$  приближается к структуре регулярного потока событий.

Приведенные в данном разделе результаты (18)–(26) позволяют при различных широкополосных и узкополосных управляющих воздействиях  $\eta(t)$  выполнять анализ детальной вероятностной структуры случайных процессов  $\xi(t)$  со случайными переходами между устойчивыми состояниями. Они наглядно показывают характер влияния порогового уровня  $h = H/\sigma_\eta$  и спектрально-корреляционных свойств процесса  $\eta(t)$  на основные характеристики случайных переключений  $\xi(t)$ .

### Случайные переходы при изменяющемся пороговом уровне

Отдельного рассмотрения заслуживает здесь вопрос возможных обобщений результатов (16)–(20) на системы управления случайными переходами процесса  $\xi(t)$  в условиях изменяющегося порогового уровня  $H = H(t) \neq \text{const}$ . Появление подобных задач связано с изменениями условий функционирования рассматриваемых объектов, неизбежными нестабильностями параметров исследуемых процессов, изменениями пороговой

чувствительности изучаемых систем, разработкой адаптивных алгоритмов управления и многими другими причинами.

Предположим, что при формировании случайных переходов (см. рис. 4) пороговый уровень  $H$  не является постоянным, а описывается некоторой функцией времени  $H = H(t)$ . В моменты пересечений управляющего воздействия  $\eta(t)$  с пороговым уровнем  $H(t)$  исследуемый процесс  $\xi(t)$  меняет свое состояние, переходя из одного устойчивого положения в другое. Если при анализе таких переходов ввести вспомогательную случайную функцию  $\eta_*(t) = \eta(t) - H(t)$ , то можно заметить, что пересечения случайного процесса  $\eta(t)$  с уровнем  $H(t)$  совпадают с пересечениями нулевого уровня функцией  $\eta_*(t)$ .

Воспользуемся этой особенностью и в плотности вероятностей  $p(\eta(t), \eta'(t))$  по известным правилам [20, 23] выполним переход от переменных  $\eta(t)$  и  $\eta'(t)$  к новым переменным  $\eta_*(t) = \eta(t) - H(t)$  и  $\eta'_*(t) = \eta'(t) - H'(t)$ . Такое преобразование позволяет получить совместную плотность вероятностей для значений  $\eta_*(t)$  и  $\eta'_*(t)$ :

$$p_*(\eta_*, \eta'_*; t) = p(\eta_*(t) + H(t), \eta'_*(t) + H'(t)) \quad (27)$$

и на основе формул (16) или (17) записать общее выражение для среднего числа положительных и отрицательных пересечений порогового уровня  $H(t)$  траекторией  $\eta(t)$ ,  $t \in [0, T]$  управляющего процесса  $\eta(t)$

$$\begin{aligned} N_\eta^+(H_t, T) &= N_\eta^-(H_t, T) = \\ &= \int_0^T \int_0^\infty \eta'_*(t) p(H(t), H'(t) + \eta'_*(t)) d\eta'_*. \end{aligned} \quad (28)$$

Если функция  $H_t = H(t)$  характеризуется средним значением  $m_H = M\{H(t)\}$ , то по аналогии с формулами (19), (20) можно определить вероятности и относительные длительности пребывания выборочной функции  $\eta(t)$ ,  $t \in [0, T]$  над уровнем и под изменяющимся пороговым уровнем  $H(t)$ :

$$\begin{aligned} T^+(H_t) &= P\{\eta(t) \geq m_H\} = 1 - F_\eta(m_H); \\ T^-(H_t) &= P\{\eta(t) \leq m_H\} = F_\eta(m_H), \end{aligned} \quad (29)$$

где  $F_\eta(m_H)$  — одномерная функция распределения  $F_\eta(\eta)$  процесса  $\eta(t)$  при  $\eta = m_H$ .

В свою очередь, характеристики (29) и (28) позволяют найти среднюю длительность положительных и отрицательных выбросов управляющего воздействия  $\eta(t)$  на уровне  $H(t)$ :

$$\bar{\tau}^+(H_t) = \frac{T^+(H_t)}{N_\eta^+(H_t, 1)} = \frac{1 - F_\eta(m_H)}{N_\eta^+(H_t, 1)};$$

$$\bar{\tau}^-(H_t) = \frac{T^-(H_t)}{N_{\eta}^-(H_t, 1)} = F_{\eta}(m_H) / N_{\eta}^-(H_t, 1). \quad (30)$$

Результаты (27)–(30) приведены здесь в достаточно общей форме и справедливы для различных вероятностных моделей управляющих воздействий  $\eta(t)$ . Они позволяют исследовать особенности случайных переходов и основные вероятностные характеристики процесса  $\xi(t)$  в условиях изменяющегося порогового уровня.

### Пуассоновская модель случайного потока переходов

Рассмотрим теперь еще один возможный подход к описанию и вероятностному анализу случайных процессов со случайными переходами. Общая структура таких процессов и характер их выборочных функций (см. рис. 1 и 2) позволяют интерпретировать случайные переходы как случайные потоки однородных событий. Подобная формализация в свою очередь приводит к возможности использовать методы общей теории случайных потоков или теории случайных точечных процессов в задачах анализа вероятностной структуры процессов  $\xi(t)$ .

Предположим, согласно рис. 4, что формирование случайных переходов процесса  $\xi(t)$  между его устойчивыми состояниями происходит в соответствии с принципом пересечений некоторого порогового уровня  $H$  управляющим воздействием  $\eta(t)$ . В большинстве практических задач типовой моделью для процессов  $\eta(t)$  может считаться широкополосный гауссов процесс с распределением (13), (14) и корреляционной функцией вида (12).

Если при этом рассмотреть вариант «высоких» пороговых уровней, например  $H \geq 2\sigma_{\eta}$ , то поток положительных выбросов  $n^+(t)$  по своим вероятностным свойствам будет приближаться к простому пуассоновскому потоку событий [26, 27]. Иначе говоря, при рассмотрении исследуемого процесса  $\xi(t)$  вероятность  $P\{n^+(H, T) = k\}$  того, что на интервале  $t \in [t_0, t_0 + T] = [0, T]$  длительностью  $T$  произойдет ровно  $k$  положительных переходов  $n^+(H, T) = k$ , будет описываться распределением

$$P\{n^+(H, T) = k\} = \frac{1}{k!} (\mu T)^k \exp(-\mu T), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (31)$$

Интенсивность  $\mu$  потока событий  $n^+(t)$  соответствует здесь среднему числу положительных переходов процесса  $\xi(t)$  на единичном интервале времени и в соответствии с результатами (16), (18), (24) определяется как

$$\mu = \frac{1}{T} N^+(H, T) = \kappa \Delta f_{\eta} \exp(-h^2/2), \quad h = H/\sigma_{\eta}. \quad (32)$$

Важной особенностью распределения (31) является то, что для случайной величины  $n^+(H, T)$  — числа положительных переходов процесса  $\xi(t)$  — математическое ожидание  $M\{n^+(H, T)\}$  и дисперсия  $D[n^+(H, T)]$  совпадают:

$$\begin{aligned} N^+(H, T) &= M\{n^+(H, T)\} = \mu T; \\ D[n^+(H, T)] &= \\ &= M\left\{[n^+(H, T) - N^+(H, T)]^2\right\} = \mu T. \end{aligned} \quad (33)$$

Такое равенство заметно упрощает исследование случайного числа событий  $n^+(H, T)$ .

При выполнении свойств пуассоновости (31) для случайного потока переходов  $n^+(t)$  последовательность  $\{\tau_i, i = 1, 2, \dots\}$  временных интервалов  $\tau_i$  между соседними событиями (соседними положительными переходами) представляет собой последовательность независимых и одинаково распределенных случайных величин. Плотность вероятностей  $p_{\tau}(\tau)$  и функция распределения  $F_{\tau}(\tau)$  случайной величины  $\tau_i$  являются при этом экспоненциальными:

$$\begin{aligned} p_{\tau}(\tau) &= \mu \exp(-\mu T); \\ F_{\tau}(\tau) &= P\{\tau_i \leq \tau\} = 1 - \exp(-\mu T), \quad \tau \geq 0. \end{aligned} \quad (34)$$

Выражения (34) позволяют достаточно просто определить среднее значение и дисперсию для длительностей  $\tau_i$  временных интервалов между положительными переходами рассматриваемого случайного процесса  $\xi(t)$ :

$$m_{\tau} = M\{\tau_i\} = \frac{1}{\mu}; \quad \sigma_{\tau}^2 = D[\tau_i] = \frac{1}{\mu^2}. \quad (35)$$

Результаты (31)–(35) дают исчерпывающее описание вероятностной структуры потока переходов  $n^+(t)$  для процесса  $\xi(t)$ . Они хорошо согласуются со многими экспериментальными данными (например, [4–7, 9, 18]). При выполнении свойства пуассоновости все характеристики вероятностей событий (31), характеристики числа переходов (31)–(33) и длительностей интервалов между переходами (34), (35) зависят только от интенсивности (32) рассматриваемого потока событий  $n^+(t)$ .

### Заключение

Представленные в данной работе результаты показывают возможности вероятностного анализа случайных процессов с двумя устойчивыми состо-



яниями и особенности исследования случайных переходов между этими состояниями при различных управляющих воздействиях. В зависимости от содержания решаемых задач и физической природы исследуемых процессов рассмотренные в работе вероятностные модели и полученные результаты допускают различные обобщения и могут использоваться в задачах вероятностного анализа, задачах управления вероятностными характеристиками случайных переходов или случайных переключений, задачах имитационного моделирования физических, технических и биологических систем с несколькими устойчивыми состояниями.

В целом полезно отметить, что полученные здесь результаты, совместно с результатами работ [28–30], по своей сути формируют основу единого, общего подхода к описанию и исследованию детальной вероятностной структуры непрерывных и дискретных [21, 28, 29], скалярных и векторных [28, 30] случайных функций. Возможности такого подхода связаны с объединением общей теории выбросов случайных функций [23, 24, 26] и методов классической теории фазового пространства или фазовой плоскости [8, 19, 31]. При этом происходит объединение методов визуального, качественного анализа и методов аналитического, количественного исследования «тонкой» вероят-

ностной структуры выборочных функций  $\xi(t)$ , фазовых траекторий  $L(\xi, \xi; t)$  и псевдофазовых отображений  $L(\xi, \xi; t)$  случайных процессов.

Потенциальная полезность рассматриваемого подхода объясняется здесь несколькими характерными особенностями, состоящими в возможности:

— наглядного описания и представления информации в фазовом пространстве состояний;

— накопления, усреднения и отображения случайных данных «в целом» на выбранном интервале анализа  $t \in [t_0, t_0 + T]$ ;

— оперативного оценивания однородности выборки, эффектов коррелированности, группировки и случайных «загрязнений» экспериментальных данных;

— простой и физически наглядной аппаратной реализации алгоритмов оценивания числовых характеристик детальной вероятностной структуры исследуемых процессов.

Перечисленные особенности играют важную роль в решении многих практических задач, связанных с извлечением полезной информации из случайных данных, обработкой случайных процессов и исследованиями поведения сложных динамических систем в условиях меняющейся помеховой обстановки.

## Литература

1. *Справочник по теории автоматического управления*/ под ред. А. А. Красовского. М., Наука, 1987. 712 с.
2. **Цыпкин Я. З.** *Релейные автоматические системы*. М., Наука, 1974. 576 с.
3. **Миллер Б. М., Рубинович Е. Я.** *Оптимизация динамических систем с импульсным управлением и ударными воздействиями*. М., Ленанд, 2019. 736 с.
4. *Microcomputers in Physiology*/ Ed. P. J. Fraser. Oxford, IRL Press, 1990. 383 p.
5. **Rangayyan R. M.** *Biomedical Signal Analysis*. N. Y., Wiley, 2002. 440 p.
6. **Nicholls J. G., Martin A. R., Wallace B. G.** *From Neuron to Brain*. Sunderland, Sinauer Associates, 2008. 672 p.
7. **Simiu E.** *Chaotic Transitions in Deterministic and Stochastic Dynamical Systems*. Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2002. 208 p.
8. **Franaszek M., Simiu E.** Stochastic resonance: A chaotic dynamics approach. *Physical Review E*, 1996, vol. 54, pp. 1288–1304.
9. **Schott J.** *Remote Sensing: The Image Chain Approach*. N. Y., Oxford University Press, 2007. 701 p.
10. **Jedlovec G.** Automated Detection of Clouds in Satellite Imagery. In: *Advances in Geoscience and Remote Sensing*/ Ed. by G. Jedlovec. 2009. Pp. 303–316.
11. **Owens J. D., Luebke D., Govindaraju N.** A Survey of general-purpose computation on graphics hardware. *Comput. Graph. Forum*, 2007, vol. 26, no. 1, pp. 80–113.
12. **Hirschmuller H., Gehrig S.** Stereo matching in the presence of sub-pixel calibration errors. *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009, pp. 437–444.
13. **Schowengerdt R. A.** *Remote Sensing Models and Methods for Image Processings*. N. Y., Elsevier, 2007. 560 p.
14. **Shapiro L. G., Stockman G. C.** *Computer Vision*. New Jersey, Prentice Hall, 2006. 752 p.
15. *Современная телеметрия в теории и на практике*/ под ред. Г. И. Козырева. СПб., Наука и техника, 2007. 672 с.
16. **Шелухин О. И., Тенякшев А. М., Осин А. В.** *Фрактальные процессы в телекоммуникациях*. М., Радиотехника, 2003. 480 с.
17. **Platt N., Spiegel E. A., Tresser C.** On-off intermittency: a mechanism for bursting. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, vol. 70, no. 3, pp. 279–282.
18. **Осадько И. С.** *Квантовая динамика молекул*. М., Физматлит, 2018. 368 с.
19. **Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э.** *Теория колебаний*. М., Гостехиздат, 1937; М., Физматгиз, 1959; М., Наука, 1981. 568 с.
20. **Тихонов В. И.** *Статистическая радиотехника*. М., Радио и связь, 1982. 624 с.

21. **Хименко В. И.** *Случайные данные: структура и анализ*. М., Техносфера, 2017. 424 с.
22. **Moore F.** *Chaotic Vibrations*. N. Y., Wiley, 1992. 312 p.
23. **Тихонов В. И., Хименко В. И.** *Выбросы траекторий случайных процессов*. М., Наука, 1987. 304 с.
24. **Tikhonov V. I., Khimenko V. I.** Level-crossing problems for stochastic processes in physics and radio engineering: An overview. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1998, vol. 43, no. 5, pp. 501–523.
25. **Большев Л. Н., Смирнов Н. В.** *Таблицы математической статистики*. М., Наука, 1983. 416 с.
26. **Cramer H., Leadbetter M.** *Stationary and Related Stochastic Processes*. N. Y., Wiley, 1969. 400 p.
27. **Markovich N. M.** Clusters of extremes: modeling and examples. *Extremes*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 519–538.
28. **Хименко В. И.** Вероятностная структура фазовых траекторий случайных процессов. *Информационно-управляющие системы*, 2016, № 3, с. 85–94. doi:10.15217/issn 1684-8853.2016.3.85
29. **Хименко В. И.** Диаграммы рассеяния в анализе случайных потоков событий. *Информационно-управляющие системы*, 2016, № 4, с. 85–93. doi:10.15217/issn 1684-8853.2016.4.85
30. **Хименко В. И.** Вероятностный анализ двумерных векторных случайных процессов на фазовой плоскости. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 2, с. 10–18. doi:10.31799/issn1684-8853.2019.2.10-18
31. **Анищенко В. С.** *Сложные колебания в простых системах*. М., URSS, 2018. 320 с.

UDC 519.21:537.86

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-82-93

#### Random processes with random transitions between stable states

V. I. Khimenko<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/ 0000-0003-3005-052X, vih.13@yandex.ru

<sup>a</sup>JSC «The Scientific Research and Experimental Centre of Intelligent Technologies «Petrokometa», 67, B. Morskaiia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Studying random processes with several stable states and random transitions between them is important because it opens a wide range of practical problems. The detailed information structure is not studied well enough, and there is no unified approach to the description and probabilistic analysis of such processes. **Purpose:** Studying the main probabilistic characteristics of random processes with two stable states, and probabilistic analysis of control over chaotic transitions under various control actions. **Results:** We show the ways to represent and preliminarily analyze random processes with two stable states on the phase plane and in the pseudophase space. A general probabilistic model for the processes in question is proposed in the form of a two-component probabilistic «mixture» of distributions. A probabilistic analysis was carried out for the principles of control over random transitions between different states. We have defined the basic probabilistic characteristics for the processes in a management action with a variety of spectral-correlation properties and a changeable threshold for random transitions. The Poisson model of a random transition flow is analyzed with an example of «high» threshold levels. **Practical relevance:** The methods of visual, qualitative and analytical research in studying dynamic systems with several stable states can be combined. The proposed probabilistic models, regardless of the physical nature of the processes under consideration, can be used in problems of probabilistic analysis, control over probabilistic structure of random transitions, and simulation of physical, technical or biological systems with random switching.

**Keywords** — random processes, random transitions, phase space of states, probabilistic analysis, characteristics of level crossings, control of chaotic switches.

**For citation:** Khimenko V. I. Random processes with random transitions between stable states. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 82–93 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-82-93

#### References

1. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniia* [Guide to the theory of automatic control]. Ed. by A. A. Krasovskii. Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p. (In Russian).
2. *Tsyarkin Ya. Z. Releinye avtomaticheskie sistemy* [Relay Automatic Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 576 p. (In Russian).
3. *Miller B. M., Rubinovich E. Ya. Optimizatsiia dinamicheskikh sistem s impyl'snym upravleniem i udarnymi vosdeistviiami* [Optimization of Dynamic Systems with Impulse Control and Shock Effects]. Moscow, Lenand Publ., 2019. 736 p. (In Russian).
4. *Microcomputers in Physiology*. Ed. P. J. Fraser. Oxford, IRL Press, 1990. 383 p.
5. *Sakmann B., Neher E. Biomedical Signal Analysis*. N. Y., Wiley, 2002. 440 p.
6. *Nicholls J. G., Martin A. R., Wallace B. G. From Neuron to Brain*. Sunderland, Sinauer Associates, 2008. 672 p.
7. *Simiu E. Chaotic Transitions in Deterministic and Stochastic Dynamical Systems*. Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2002. 208 p.
8. *Franaszek M., Simiu E. Stochastic resonance: A chaotic dynamics approach. Physical Review E*, 1996, vol. 54, pp. 1288–1304.
9. *Schott J. Remote Sensing: The Image Chain Approach*. N. Y., Oxford University Press, 2007. 701 p.
10. *Jedlovec G. Automated Detection of Clouds in Satellite Imagery*. In: *Advances in Geoscience and Remote Sensing*. Ed. by G. Jedlovec. 2009. Pp. 303–316.
11. *Owens J. D., Luebke D., Govindaraju N. A Survey of general-purpose computation on graphics hardware. Comput. Graph. Forum*, 2007, vol. 26, no. 1, pp. 80–113.
12. *Hirschmuller H., Gehrig S. Stereo matching in the presence of sub-pixel calibration errors. Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009, pp. 437–444.
13. *Schowengerdt R. A. Remote Sensing Models and Methods for Image Processings*. N. Y., Elsevier, 2007. 560 p.
14. *Shapiro L. G., Stockman G. C. Computer Vision*. New Jersey, Prentice Hall, 2006. 752 p.
15. *Sovremennaiia telemetriia v teorii i na praktike* [Modern Telemetry in Theory and Practice]. Saint-Petersburg, Nauka i tehnika Publ., 2007. 672 p. (In Russian).
16. *Sheluchin O. I., Teniakshev A. M., Osin A. V. Fraktal'nyia process v telekommunikaciach* [Fractal Processes in Tele-

- communications]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 480 p. (In Russian).
17. Platt N., Spiegel E. A., Tresser C. On-off intermittency: a mechanism for bursting. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, vol. 70, no. 3, pp. 279–282.
  18. Osad'ko I. S. *Kvantovaya dinamika molekul* [Quantum Dynamics of Molecules]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2018. 368 p. (In Russian).
  19. Andronov A. A., Vitt A. A., Khaikin S. E. *Theory of Oscillators*. Oxford, Pergamon Press, 1966. 570 p.
  20. Tikhonov V. I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical Radiotechnics]. Moscow, Radio i svias' Publ., 1982. 624 p. (In Russian).
  21. Khimenko V. I. *Sluchainye dannye: struktura i analisis* [Random Data: Structure and Analysis]. Moscow, Technosfera Publ., 2017. 424 p. (In Russian).
  22. Moon F. *Chaotic Vibrations*. N. Y., Wiley, 1992. 312 p.
  23. Tikhonov V. I., Khimenko V. I. *Vybrosy traektorii sluchainykh protsessov* [Trajectories Emissions of Stochastic Processes]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 304 p. (In Russian).
  24. Tikhonov V. I., Khimenko V. I. Level-crossing problems for stochastic processes in physics and radio engineering: An overview. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1998, vol. 43, no. 5, pp. 501–523.
  25. Bol'shev L. N., Smirnov N. V. *Tablitsi matematicheskoi statistiki* [Tables of Mathematical Statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 416 p. (In Russian).
  26. Cramer H., Leadbetter M. *Stationary and Related Stochastic Processes*. N. Y., Wiley, 1969. 400 p.
  27. Markovich N. M. Clusters of extremes: modeling and examples. *Extremes*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 519–538.
  28. Khimenko V. I. Probability structure of phase trajectories of random processes. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 3, pp. 85–94 (In Russian). doi:10.15217/issn 1684-8853.2016.3.85
  29. Khimenko V. I. Scatterplots to analysis of random stream of events. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 4, pp. 85–93 (In Russian). doi:10.15217/issn 1684-8853.2016.4.85
  30. Khimenko V. I. Probabilistic analysis of two-dimensional vector random processes on the phase plane. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 2, pp. 10–18 (In Russian). doi:10.31799/issn 1684-8853.2019.2.10-18
  31. Anishchenko V. S. *Slozhnye kolebaniia v prostykh sistemakh* [Complicated Oscillations in Simple Systems]. Moscow, URSS Publ., 2018. 320 p. (In Russian).

**Научный журнал**  
**«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»**  
 выходит каждые два месяца.

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 6000 рублей, для подписчиков стран СНГ — 6600 рублей, включая НДС 20%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Пресса России»: № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: [press@crp.spb.ru](mailto:press@crp.spb.ru), [zajavka@crp.spb.ru](mailto:zajavka@crp.spb.ru),

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: [export@periodicals.ru](mailto:export@periodicals.ru), сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: [podpiska@delpress.ru](mailto:podpiska@delpress.ru),

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: [kazan@komcur.ru](mailto:kazan@komcur.ru),

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>; РУКОИТ: <http://www.rucont.ru>;

ИВИС: <http://www.ivis.ru>; Некс-Медиа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=news&id=11196>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2017 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/journal/n/informatsionno-upravlyayushchiesistemy>).



UDC 621.371

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-94-104

## Optical data signals in fiber optic communication links with fading

I. Juwiler<sup>a</sup>, PhD, Senior Lecturer, [orcid.org/0000-0002-0669-7828](https://orcid.org/0000-0002-0669-7828)

I. Bronfman<sup>a</sup>, Assistant, [orcid.org/0000-0001-6195-069X](https://orcid.org/0000-0001-6195-069X)

N. Blaunstein<sup>b</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, [orcid.org/0000-0003-2945-9379](https://orcid.org/0000-0003-2945-9379),  
[nathan.blaunstein@hotmail.com](mailto:nathan.blaunstein@hotmail.com)

<sup>a</sup>Electrical and Electronics Engineering Department, Shamoon College of Engineering, 84, Jabotinsky St., Ashdod, 77245, Israel

<sup>b</sup>Ben-Gurion University of the Negev, P.O.B. 653, 1, Ben-Gurion St., Beer-Sheva, 74105, Israel

**Introduction:** This article is based on the recent research work in the field of two subjects: signal data parameters in fiber optic communication links, and dispersive properties of optical signals caused by non-homogeneous material phenomena and multimode propagation of optical signals in such kinds of wired links. **Purpose:** Studying multimode dispersion by analyzing the propagation of guiding optical waves along a fiber optic cable with various refractive index profiles of the inner optical cable (core) relative to the outer cladding, as well as dispersion properties of a fiber optic cable due to inhomogeneous nature of the cladding along the cable, for two types of signal code sequences transmitted via the cable: return-to-zero and non-return-to-zero ones. **Methods:** Dispersion properties of multimode propagation inside a fiber optic cable are analyzed with an advanced 3D model of optical wave propagation in a given guiding structure. The effects of multimodal dispersion and material dispersion causing the optical signal delay spread along the cable were investigated analytically and numerically. **Results:** Time dispersion properties were obtained and graphically illustrated for two kinds of fiber optic structures with different refractive index profiles. The dispersion was caused by multimode (e.g. multi-ray) propagation and by the inhomogeneous nature of the material along the cable. Their effect on the capacity and spectral efficiency of a data signal stream passing through such a guiding optical structure is illustrated for arbitrary refractive indices of the inner (core) and outer (cladding) elements of the optical cable. A new methodology is introduced for finding and evaluating the effects of time dispersion of optical signals propagating in fiber optic structures of various kinds. An algorithm is proposed for estimating the spectral efficiency loss measured in bits per second per Hertz per each kilometer along the cable, for arbitrary presentation of the code signals in the data stream, non-return-to zero or return-to-zero ones. All practical tests are illustrated by MATLAB utility.

**Keywords** — capacity, cladding, core, delay spread of optical pulses, dispersion curves, dispersion diagram of optical modes, fiber optic cable, graded-index cable, material time dispersion, linearly polarized (LP) modes, material dispersion factor, multimode time dispersion, non-return-to-zero (NRZ) code, numerical aperture, optical modes in cable, refractive index, relative refractive index, return-to-zero (RZ) code, single-mode condition, spectral efficiency, step-index cable.

**For citation:** Juwiler I., Bronfman I., Blaunstein N. Optical data signals in fiber optic communication links with fading. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 94–104. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-94-104

### Introduction

In recent years there observed huge development of complex communication systems, including both radio and optical wired and wireless communication, mostly in the modern 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> generations of communication networks. This first of all related to growth demands to increase of the rate of information transfer, its density during transmission, as well as to exponential grow of number of subscribers — users of wired and wireless communication. In this case increases the role of wired optical communication — fiber optic guiding systems — optical cables. However, practice showed that such “wired” channels are affected by fading caused by multimode interference of modes propagating within the channel, which has stochastic character, as well as by inhomogeneous and roughness structure of cable walls, leading to deviations of propagating modes from specular reflection. Cumulatively, these phenomena lead to “spreading” of time delay of signals

along the fiber optical cable. These phenomena lead to dispersion of signals, and as the result — to loss of information transferred along the cable.

How much these phenomena lead to loss of information — nobody did not investigate systematically until nowadays. In the modern literature, only break empirical data were presented based on experimental observed data. However, was not developed unified unique approach to resolve the problem, which stimulated beginning of the problems investigations by the authors. Therefore, in the work from the beginning were introduced the optical cables that more been used in practice, with step-index and graded-index profiles of refraction indexes, analytically had considered character of propagation of optical waves (modes) inside the optical guiding structure, from which inhomogeneous structure of optical cable walls. As the result, spread of time delay of optical signals is shown depending on the type of coding of information inside them — return-to-zero or non-return-to-zero.

### Types of optical fibers

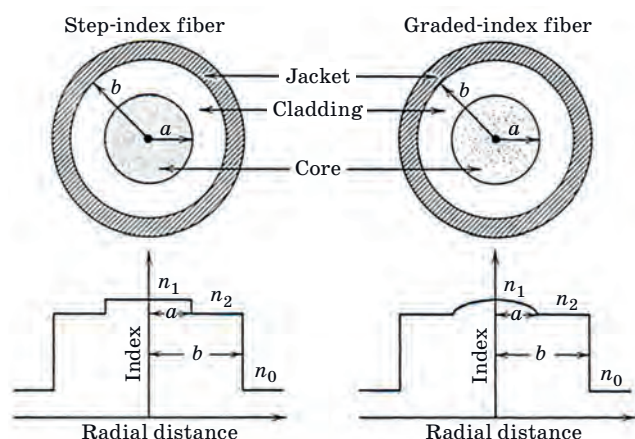
The first commonly used kind of fiber optic structure is the *step-index fiber* (Fig. 1).

The inner structure of each kind of fiber optic is schematically presented in Fig. 2.

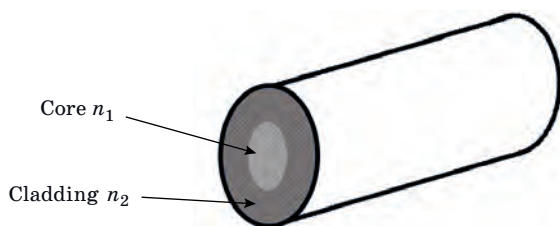
As it is clearly seen from Fig. 2, such kind of fiber consists of a central core of radius  $a$  and refractive index  $n_1$ , surrounded by a cladding of radius  $b$  and the refractive index  $n_2$ .

According to the definition of total intrinsic reflection (see definition in [1–3]), to obtain the total reflection from the cladding, its refractive index should be lower than that of the core, i. e.  $n_1 > n_2$ . Fig. 3 shows geometry of optical ray propagation within the core under the assumption that the cladding width is thick enough to exclude the evanescent field decay inside the cladding depth. So, from the beginning we can suppose that the effects of a finite cladding thickness are negligible, and a ray field is small enough to penetrate the outer edges of the cladding. As will be described below, in a multi-mode *step-index* fiber, a large modal distortion occurs.

To avoid such drawbacks of this kind of fiber, a new type, called *graded-index* fiber was developed [1–6] that has the same configuration as the previous fiber (shown in Fig. 1). The difference between both kinds of fiber is defined by differences in profiles of refractive indexes of core and cladding, as



■ Fig. 1. Difference between the refractive index profiles for step-index and graded-index fibers



■ Fig. 2. A view of the fiber optic inner structure

illustrated in Fig. 1. Thus, as clearly seen from illustrations, in the step-index fiber the index change at the core-cladding interface is abrupt, whereas in the graded-index fiber the refractive index decreases gradually inside the core.

In fiber optics, there is an important parameter that is usually used, called the *numerical aperture* of fiber optic guiding structure, denoted as N.A. [1–9]:

$$N.A. = n_1 \sin \theta_c \equiv \sin \theta_a,$$

where  $\theta_{full} = 2\theta_a$  is so-called in the literature as the angle of minimum light energy spread outside the cladding, or of full communication [10–14], when total internal reflection occurs in fiber optic structures. Accounting for  $\cos^2\theta = 1 - \sin^2\theta$ , we finally get

$$N.A. = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}.$$

Sometimes, in fiber optic physics, designers use the parameter, called the *relative refractive index difference* [1–9]:

$$\Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2} \equiv \frac{(N.A.)^2}{2n_1^2}.$$

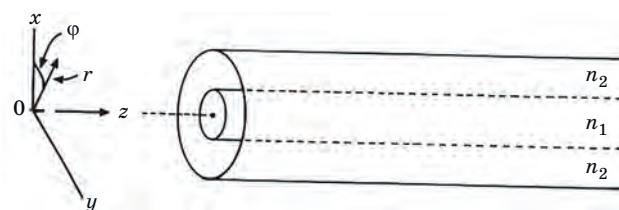
Using the above formulas, we can find relations between these two engineering parameters:

$$N.A. = \sqrt{2}n_1(\Delta)^{1/2}.$$

To understand the effects of optical wave propagation in both kinds of fibers, let us consider a similar 3D problem of ray propagation in a cylindrical waveguide, but now having more complicated geometry by having an inner core and an outer cladding.

### Propagation of optical waves inside the fiber-optic structure

Let us now consider the cylindrical dielectric structure as shown in Fig. 3. This is just the geometry of the optical fiber, where the central region is known as the *core* and the outer region as the *clad-*



■ Fig. 3. Presentation of fiber optic structure in the cylindrical coordinate system

ding. In this case, the same basic principles exist as for the dielectric slab, but the circular rather than planar symmetry changes the mathematics. We use the solution of Maxwell's equation in the cylindrical coordinates for both the coaxial cable and the circular waveguide, where we deal mostly with guiding modes rather than the ray concept [1–9, 13].

The wave equation that describes such propagation of light within cylindrical waveguides can be presented in cylindrical coordinates as follows for  $\mu_r = 1$ :

$$\nabla^2 E \equiv \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (1)$$

We can (as in [12–14]) present the solution by using the separation of variables:

$$E = E_r(r)E_\phi(\phi)E_z(z).$$

From well-known physics [10–14], we immediately take  $E_t(t)E_z(z) = \exp\{i(\beta z - \omega t)\}$ . This allows us to rewrite the wave equation (1) in the form

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial (E_r E_\phi)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 (E_r E_\phi)}{\partial \phi^2} - \beta^2 E_r E_\phi + \frac{n^2 \omega^2}{c^2} (E_r E_\phi) = 0.$$

We now suggest that function  $E_\phi$  is periodic and can be presented in the form

$$E_\phi = \exp(\pm im\phi),$$

where  $m$  is an integer. Now we can reduce the above equation as follows:

$$\frac{\partial^2 E_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial r} + \left( n^2 \frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) E_r = 0. \quad (2)$$

Equation (2) is a form of Bessel's equation and its solutions are Bessel functions [14]. We finally can obtain solutions for the field of rays through the modified Bessel functions of the first and second order,  $J(qr)$  and  $K(pr)$ , via wave parameters  $q$  and  $p$  as propagation parameters inside the core and cladding, respectively. This finally gives at the core ( $r \leq a$ )

$$\frac{\partial^2 E_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial r} + \left( q^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) E_r = 0$$

and at the cladding ( $r > a$ )

$$\frac{\partial^2 E_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial r} + \left( p^2 + \frac{m^2}{r^2} \right) E_r = 0.$$

Solutions of these equations, respectively, are

$$E_r = E_c J_m(qr);$$

$$E_r = E_{c1} K_m(qr),$$

where  $J_m(qr)$  and  $K_m(qr)$  are the first kinds of the Bessel function; and the modified Hankel function (e. g., Bessel function of the second kind) [14], respectively. Roots of  $J_m(qr) \equiv J_m(v)$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$ , are shown in Fig. 4.

As for information of  $K_m(qr)$ , the reader can find it, for example, in [8, 9]. Finally, the full solution at the core is

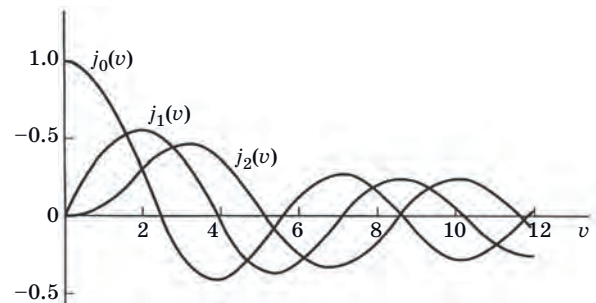
$$E = E_c J_m(qr) \exp\{-j(\omega t - \beta z)\} \exp(\pm jm\phi)$$

and a similar full solution for the cladding

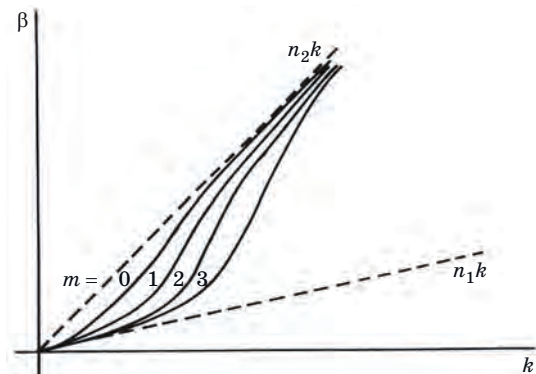
$$E = E_{c1} K_m(qr) \exp\{-j(\omega t - \beta z)\} \exp(\pm jm\phi),$$

where  $m$  is the azimuth integer.

Now, as in the case of the 3D cylindrical empty waveguide, described in [7], we can determine for an optical fiber the corresponding values for given propagation parameters  $k$  and  $\beta$ , by imposing the boundary conditions at  $r = a$ . The result is a relationship which provides the  $\beta$  versus  $k$  or *dispersion curves* shown in Fig. 5.



■ Fig. 4. Bessel function of the first kind and  $n$  order vs. variable  $v$



■ Fig. 5. Dispersion diagram of optical modes in a fiber optic structure



It is clearly seen that the modes with numbers from 0 to 3 (the same property occurring for modes with numbers  $n > 3$ ) propagate between the core and cladding of the fiber optic with wavelengths depending on refractive properties of these two fiber structures, and with an increase of wave propagation number  $k$ , propagate inside the inner (core) structure.

The full mathematical approach is very complicated, and we use the so-called “weakly guiding” approximation [12, 14]. This makes use of the fact that if  $n_1 \approx n_2$  the ray’s angle of incidence at the boundary “core-cladding” must be very large, if total internal reflection is to occur. The ray must bounce down the core almost at grazing incidence. This means that the wave is almost a transverse wave, with very small  $z$ -components.

Since the wave within the fiber is considered transverse, the solution can be resolved conveniently into two linearly polarized components, just as for free-space propagation. The modes are called *linearly polarized* (LP) [1, 2, 4]. All solutions obtained above relate directly to the optical fiber guiding structures. The latter has just the cylindrical geometry, and if for a typical fiber, we have that  $(n_1 - n_2)/n_1 \approx 0/01$  than the “weakly guiding” approximation is valid.

There are two possible LP optical fiber modes:  $LP_{01}$  ( $m = 0, n = 0$ ) and  $LP_{11}$  ( $m = 1, n = 1$ ) [1, 2, 4]. For cylindrical geometry, the *single-mode condition* is [12, 14]

$$\frac{2\pi a}{\lambda}(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} < 2.404.$$

As follows from presented illustrations, depending on the shape of the intrinsic refractive index distribution, the corresponding LP-modes can propagate asymmetrically and inhomogeneously. This phenomenon is called the *modal dispersion* [1–9, 12–14] and will be discussed in the next section.

### Dispersion effects of signals occurring in fiber optic communication link

As was discussed in the previous paragraph, in fiber optic channels fading of optical signals occurs due to two factors: 1) multimode phenomena leading to the inter-ray interference and 2) dispersive properties of the material at the inner and outer coating of the fiber guide caused by inhomogeneous structure of the wire communication channel. Dispersion of these two types was discussed briefly in [9, 12, 14] and below in our description of the matter, we will follow on some of the formulas presented there.

A problem of transmission of pulses via fiber optic structure occurs because of two factors. One

is that the source of light is not emitted at a single wavelength, but exists over a range of wavelengths called the source spectral width [1–10]. The second factor is that the index of refraction is not the same at all wavelengths. The property of when the light velocity is dependent on the wavelength is called *dispersion*.

*Material Dispersion (MD)*. We can observe that the material dispersion is dependent on the properties of the material from which fiber structures are developed. Such a kind of dispersion caused the spread of the light wavelength as it travels along the fiber.

This is because each component wavelength (also called *wave harmonic*) travels at a different speed, each arriving with a slight delay with respect to the others. The amount of pulse spreading ( $\tau$ ) per unit of length of fiber ( $l$ ) is given by [12, 14]

$$\Delta\left(\frac{\tau}{l}\right) = -M\Delta\lambda,$$

where  $M$  is the *material dispersion factor*, and it is plotted in Fig. 6, according to [6, 7], for pure silica glass versus wavelength varied from 0.7  $\mu\text{m}$  in units of picoseconds per nanometer per kilometer [ps/(nm·km)] of length of fiber.

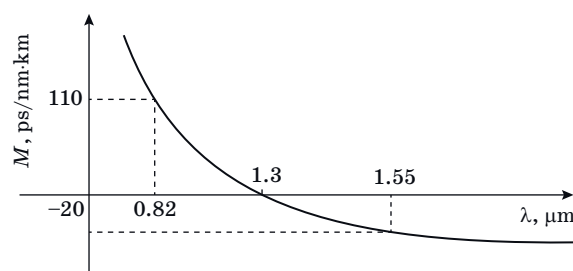
It is clearly seen that  $M = 0$  near 1300 nm, that is, here the pulse has a minimum spreading factor. In the range 1200 to 1600 nm, the material dispersion factor can be approximated by:

$$M = \frac{M_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \quad (3)$$

where  $M_0 \approx -0/095$  ps/(nm·km) and  $\lambda_0 \approx 1300$  nm (wavelength where  $M = 0$ ). At 1500 nm,  $M \approx -20$  ps/(nm·km).

For the case of *material dispersion* caused by cable material inhomogeneity along the fiber we can use the following formula (see [12, 14]):

$$\Delta\left(\frac{\tau}{l}\right) = -M\Delta\lambda. \quad (4)$$



■ Fig. 6. Dependence of dispersion properties of fiber-optic materials vs the length of optical waves  $\lambda$ , extracted from [4, 6]

For example, using an optical detector of type LED with spectral width of 20 nm (see [4]), yields a pulse spread per unit length of the transmission path inside the fiber:

$$\Delta\left(\frac{\tau}{l}\right) = -M\Delta\lambda = -(-20) \cdot 20 = 400 \text{ ps/km.}$$

*Multimode Dispersion (MMD).* Now we will discuss the modal dispersion caused by non-symmetrical distribution of the refractive index within the asymmetric fiber structure. In the case of the step-index fiber, as described above, we, following [12, 14], can obtain a pulse spread per unit length along the fiber:

$$\Delta\left(\frac{\tau}{l}\right) = \frac{n_1}{cn_2}(n_1 - n_2) = \frac{n_1}{c}\Delta. \quad (5)$$

If we account now for the fractional refractive index, we finally get that the modal pulse spread can be expressed as

$$\Delta\left(\frac{\tau}{l}\right) = \frac{n_1\Delta}{c}$$

or

$$\Delta\left(\frac{\tau}{l}\right) = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2cn_1}. \quad (6)$$

Here, as above,  $c$  is the speed of light. The problem with pulse spreading is that it limits the information carrying capacity of the fiber. This aspect we will discuss below, where the data stream parameters of information passing the fiber optic channel will be considered.

This means that the time delay dispersion  $\tau$  of set of pulses along the fiber with the length  $l$ ,  $\Delta(\tau/l)$

can be estimated by knowledge of refraction indexes of the inner and outer cables,  $n_1$  and  $n_2$ .

In the case of modal dispersion caused by multimode propagation inside the optic fiber, a spread of information pulses at the length of an optical cable in time is given by (see [12])

$$\Delta T = \frac{ln_1^2}{cn_2}\Delta \propto \frac{ln_1}{cn_2}\Delta. \quad (7)$$

### Data stream parameters in fiber optic communication links

The problem with optical data signal spreading is that it limits the information carrying capacity of the channel [9, 10, 12, 14]. Pulses that spread, eventually overlap with neighboring pulses, creating inter-symbol interference [9–11]. This leads to transmission errors and must be avoided. The direct way to avoid this is to place pulses further apart from the transmitter. This means lowering the data rate.

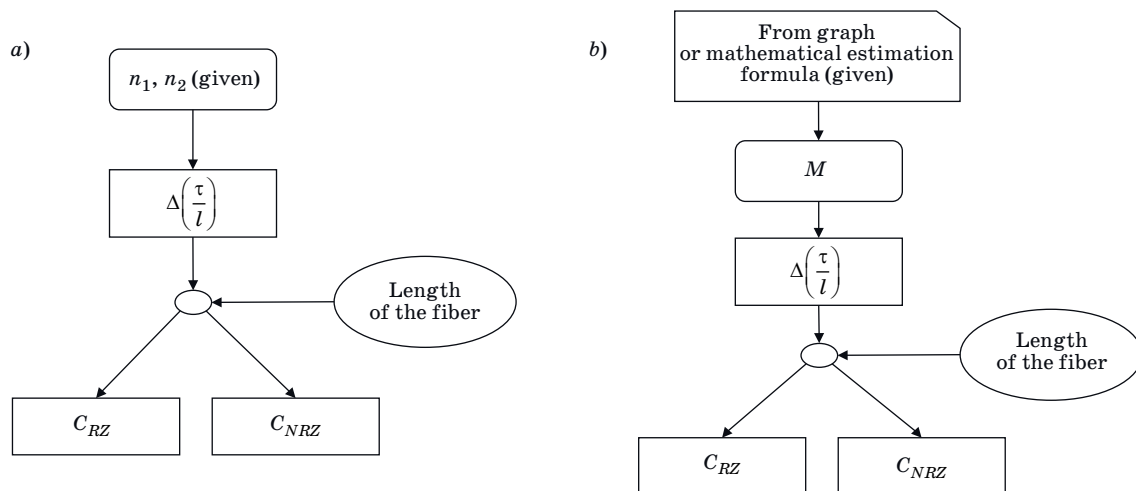
Then limitations in capacity of data flow inside the fiber depend on the type of pulses, either return-to-zero (RZ) or non-return-to-zero (NRZ) (see [14]). Thus, for RZ pulses, we get

$$C_{RZ} \times l = \frac{0.35}{\Delta(\tau/l)}.$$

Whereas, for NRZ pulses we get

$$C_{NRZ} \times l = \frac{0.7}{\Delta(\tau/l)}.$$

Using numerical data regarding material dispersion parameter  $M$ , presented above, we can also



■ Fig. 7. Diagram of the algorithm of the computation of fiber optic channel capacity in the case of multimode dispersion (a) and material dispersion  $M$  (b) along the length  $l$  of the optical cable

obtain the empirical formulas for computation of the capacity of fiber optic channels along the length  $l$  for two types of pulses, that is,

$$C_{NRZ} \times l = 1.75 \text{ (Mbit/s)} \cdot \text{km}$$

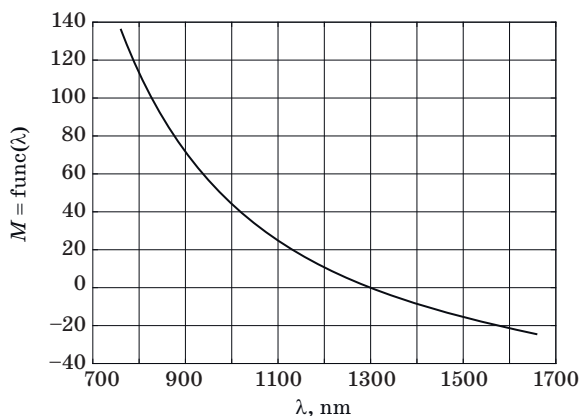
and

$$C_{RZ} \times l = 0.875 \text{ (Mbit/s)} \cdot \text{km}.$$

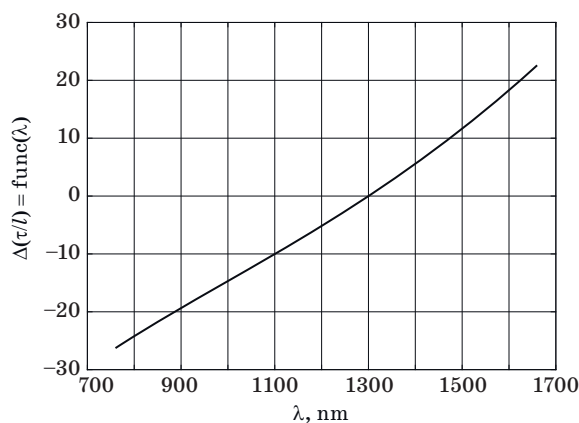
In Fig. 7, *a* and *b* the corresponding diagrams show the algorithm of computation of the capacity of the fiber optic communication links with time dispersion caused by multimode interference and by material inhomogeneity along the optical cable.

### Results of numerical simulation

In Fig. 8, the dependence of the factor of material dispersion versus the wavelength along the optic fiber [according to formula (3)] is illustrated.



■ Fig. 8. The factor of material dispersion along the optic fiber vs wavelength



■ Fig. 9. The delay along the fiber-optic channel vs wavelength along this fiber

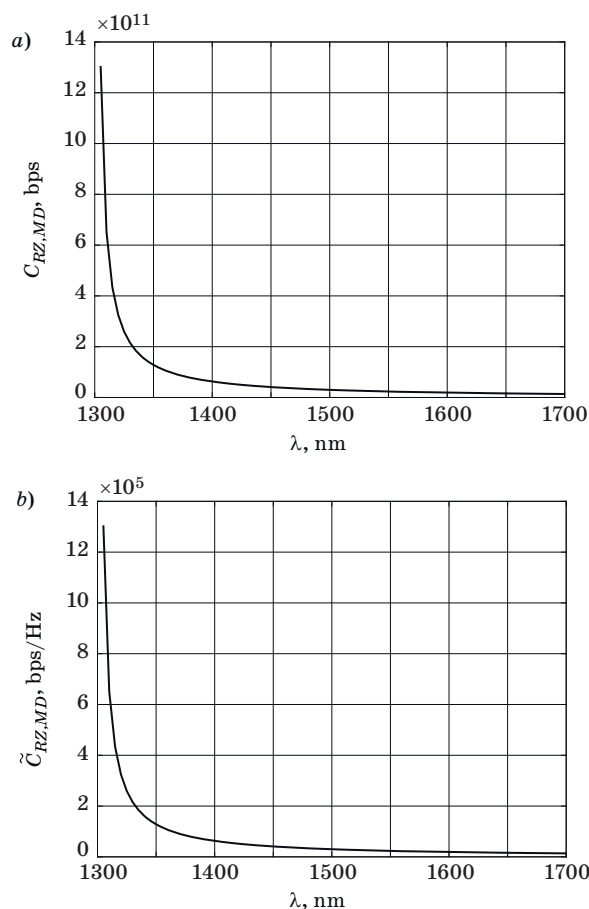
From Fig. 8 it is seen that with an increase of wavelength, the factor of material dispersion is decreased exponentially, when for a wavelength of 1300 nm this factor is zero.

In Fig. 9 the dependence of the delay along the fiber-optic channel versus the wavelength along this fiber [according to formula (4)], is illustrated.

From Fig. 9 it is seen that with an increase of wavelength, the delay is also increased almost linearly, when for a wavelength of 1300 nm this delay is zero.

In Fig. 10, *a* and *b* the dependence of the capacity and the spectral efficiency of the type RZ, of the fiber-optic channel versus the wavelength along this fiber with a length of 1 km, for material dispersion is illustrated.

From Fig. 10 it is clearly seen that with an increase of the difference between the refraction indexes of the inner and outer parts of the fiber, the capacity and the spectral efficiency of the type RZ, for material dispersion, of such a fiber optic channel is decreased exponentially. Thus, the maximum rate of data passing through such a channel also decreases exponentially.



■ Fig. 10. The capacity (a) and the spectral efficiency (b) of the type RZ, of the fiber communication link with the length of 1 km for material dispersion vs the wavelength along this fiber



In Fig. 11, *a* and *b* the dependence of the capacity and the spectral efficiency of the type NRZ, of the fiber-optic channel versus the wavelength along this fiber with a length of 1 km, respectively, for material dispersion is illustrated.

From Fig. 11 it is clearly seen that with an increase of the wavelength of an optical signal with data, propagating inside the optical cable, the capacity and the spectral efficiency of the type NRZ, for material dispersion, of such a fiber optic channel is decreased exponentially. Thus, the maximum rate of data passing through such a channel also decreases exponentially.

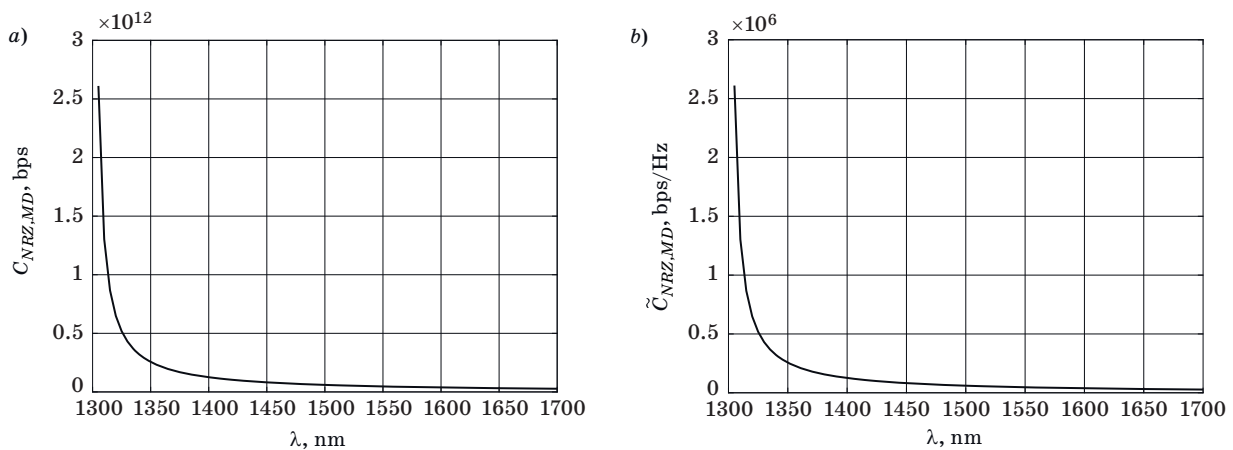
In Fig. 12, *a* and *b* the dependence of the capacity of the fiber-optic channel versus the *fractional refractive indexes difference* (FRID) of the inner and outer cables along the length of a cable of 1 km and for  $n_1 = 1.45$  [according to formulas (5), (6)], is illustrated.

From Fig. 12, *a* and *b* it is clearly seen that with an increase of the FRID of the inner and outer parts of the fiber, the broadening of pulses of such a fiber-optic channel is increased linearly.

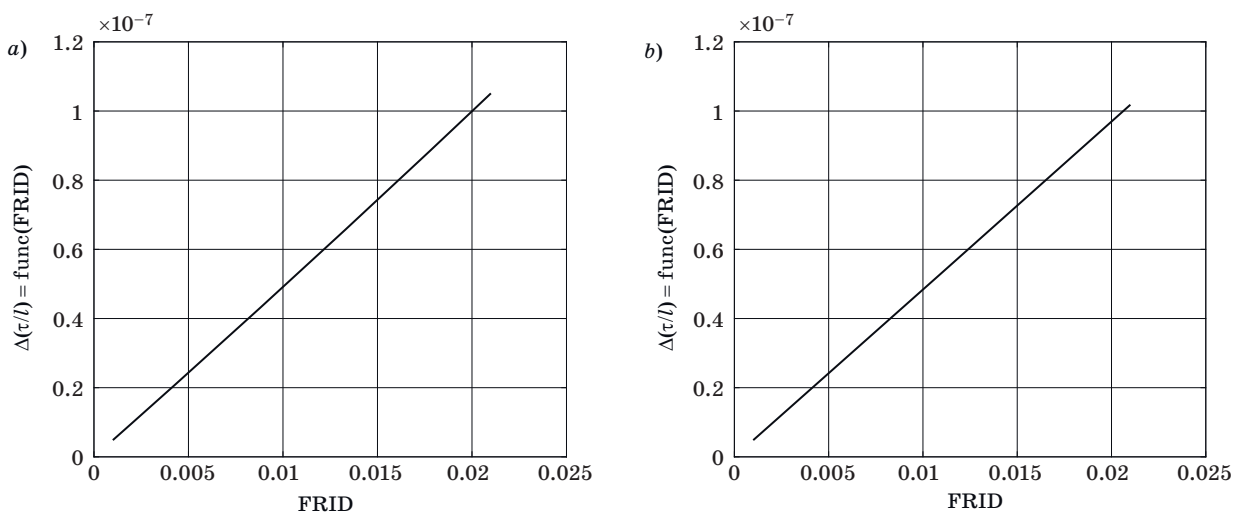
In Fig. 13 the dependence of the broadening of the pulses of information data signals along the fiber-optic channel versus the FRID of the inner and outer cables along the length of a cable of 1 km for  $n_1 = 1.45$  [according to formula (7)], is illustrated.

From Fig. 13 it is seen that with an increase of the difference between the refraction indexes of the inner and outer parts of the fiber, the broadening of pulses of such a fiber-optic channel is increased linearly.

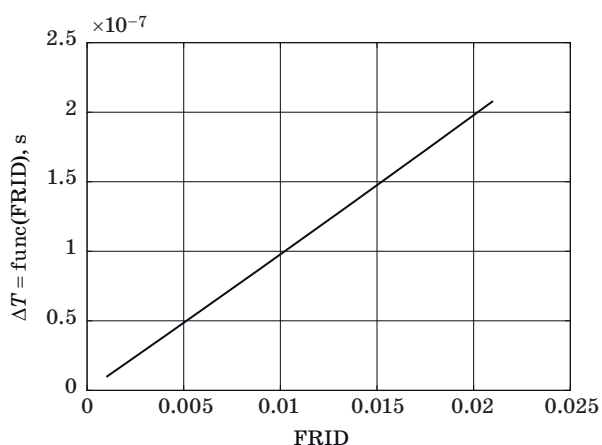
In Fig. 14, *a* and *b*, the dependence of the capacity and the spectral efficiency of the signal code of type of RZ, for multimode dispersion, of the fiber-optic channel versus the FRID of the inner and outer cables along the length of a cable of 1 km and



■ **Fig. 11.** The capacity (*a*) and the spectral efficiency (*b*) of the type NRZ, of the fiber communication link with the length of 1 km for material dispersion vs the wavelength along this fiber



■ **Fig. 12.** The delay of the fiber communication link with the length of 1 km vs the FRID of the cladding and core of the optical cable for  $n_1 = 1.45$ : *a* — formula (5); *b* — formula (6)

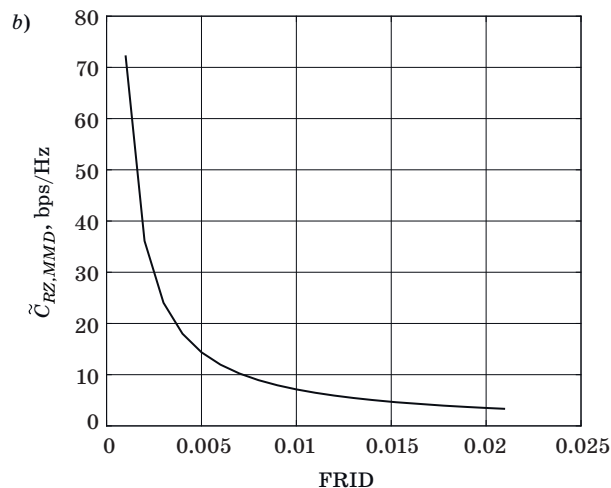
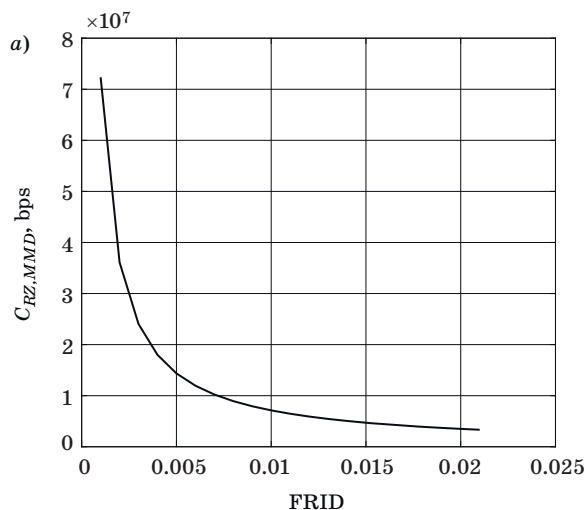


■ **Fig. 13.** The broadening of the pulses of information along the fiber with a length of 1 km vs the FRID of the cladding and core of the optical cable for  $n_1 = 1.45$

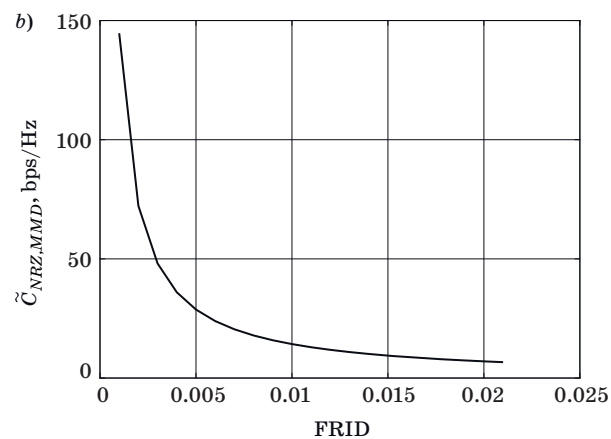
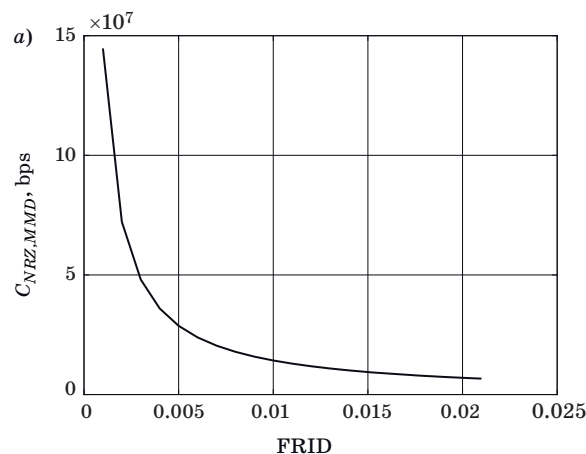
for  $n_1 = 1.45$ , for multimode dispersion [formula (5)], is illustrated.

From Fig. 14 it is clearly seen that with an increase of the difference between the refraction indexes of the inner and outer parts of the fiber, the capacity and the spectral efficiency of the RZ-type, for multimode dispersion (5), of such a fiber optic channel is decreased exponentially. Thus, the maximum rate of data passing through such a channel also decreases exponentially.

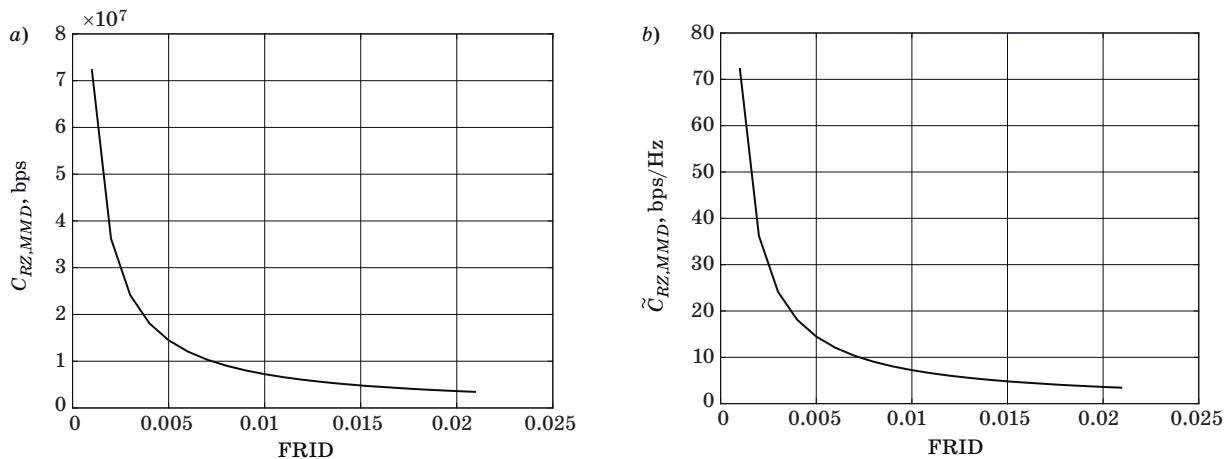
In Fig. 15, *a* and *b* the dependence of the capacity and the spectral efficiency of the signal codes of type NRZ, for multimode dispersion, of the fiber-optic channel versus the FRID of the inner and outer cables along the length of a cable of 1 km and for  $n_1 = 1.45$ , for multimode dispersion [formula (5)].



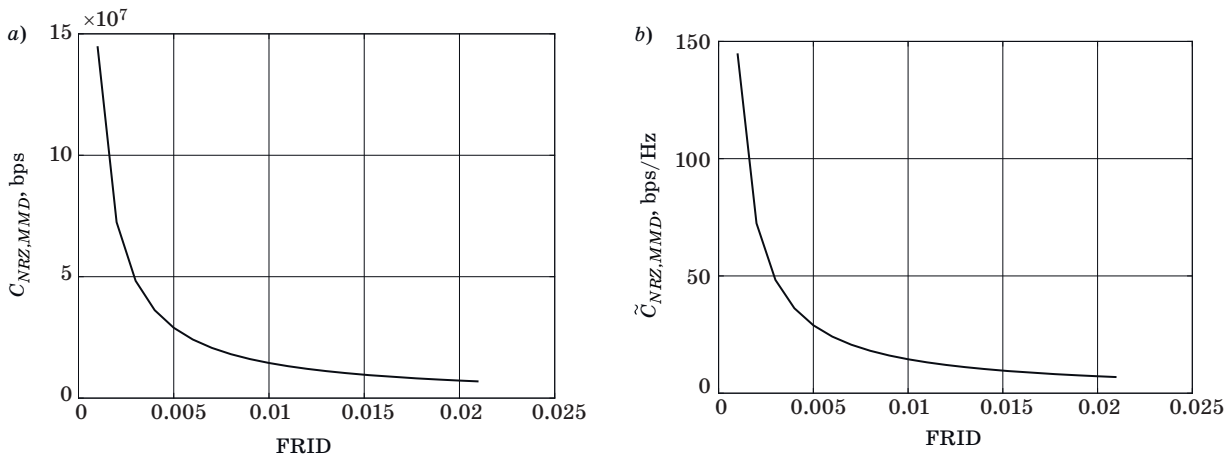
■ **Fig. 14.** The capacity (a) and the spectral efficiency (b) of the type RZ, of the fiber communication link with the length of 1 km for multimode dispersion vs FRID of the cladding and core of the optical cable for  $n_1 = 1.45$



■ **Fig. 15.** The capacity (a) and the spectral efficiency (b) of the type NRZ, of the fiber communication link with a length of 1 km for multimode dispersion vs FRID of the cladding and core of the optical cable for  $n_1 = 1.45$



■ **Fig. 16.** The capacity (a) and the spectral efficiency (b) of the type RZ, of the fiber communication link with a length of 1 km for multimode dispersion vs FRID of the cladding and core of the optical cable for  $n_1 = 1.45$



■ **Fig. 17.** The capacity (a) and the spectral efficiency (b) of the type NRZ, of the fiber communication link with a length of 1 km for multimode dispersion vs FRID of the cladding and core of the optical cable for  $n_1 = 1.45$

From Fig. 15 it is clearly seen that with an increase of the difference between the refraction indexes of the inner and outer parts of the fiber, the capacity and the spectral efficiency of the NRZ-type signal codes, for multimode dispersion (5), of such a fiber optic channel is decreased exponentially. Thus, the maximum rate of data passing through such a channel also decreases exponentially.

In Fig. 16, a and b the dependence of the capacity and the spectral efficiency of the type RZ, for multimode dispersion, of the fiber-optic channel versus the fractional refractive indexes difference FRID of the inner and outer cables along the length of a cable of 1 km and for  $n_1 = 1.45$ , for multimode dispersion [(formula (6))], is illustrated.

From Fig. 16 it is clearly seen that with an increase of the difference between the refraction indexes of the inner and outer parts of the fiber, the capacity and the spectral efficiency of the RZ-type

signal codes, for multimode dispersion (6, of such a fiber optic channel is decreased exponentially. Thus, the maximum rate of data passing through such a channel also decreases exponentially.

In Fig. 17, a and b the dependence of the capacity and of the spectral efficiency of the type NRZ, for multimode dispersion, of the fiber-optic channel versus the FRID of the inner and outer cables along the length of the cable of 1 km and for  $n_1 = 1.45$ , for multimode dispersion [(formula (6))], is illustrated.

From Fig. 17 it is clearly seen that with an increase of the difference between the refraction indexes of the inner and outer parts of the fiber, the capacity and the spectral efficiency of the NRZ-type signal codes, for multimode dispersion (6), of such a fiber optic channel is decreased exponentially. Thus, the maximum rate of data passing through such a channel also decreases exponentially.



## Summary

Theoretical analysis and the corresponding computer simulation using the MATLAB utility have shown that:

1. Depending on the wavelength of optical signal propagating inside the fiber-optic communication channel, the material dispersion index is decreased exponentially with an increase of the signal wavelength.

2. At the same time, with an increase of the wavelength of optical signal passing through the fiber optic channel, the delay spread (e. g., widening) of the resulting optical signal inside the cable increases linearly.

3. The material time-dispersion parameter along the fiber optic cable increases linearly with an

increase of the difference between the refraction indexes of the inner and outer parts of the fiber, called fractional refractive indexes difference (FRID).

4. The exponential decrease of the signal data flow of fiber-optic channels is observed with FRID both for NRZ- and RZ-types of codes inside the data flow.

5. The multimode time dispersion depends significantly on the difference between the refraction indexes of the inner and outer parts of the fiber, and with an increase of FRID, it increases linearly.

6. For both types of signal codes, NRZ and RZ, exponential decrease of the channel capacity and spectral efficiency is observed — the multimode dispersion — depends on the difference between the refraction indexes of the inner and outer parts of the fiber and on the increase of the length of the channel (e. g., fiber cable).

## References

1. Dudley J. M., and Taylor J. R. *Supercontinuum generation in optical fibers*. London, Cambridge University Press, 2010. 167 p.
2. Shu Namiki, Takayuki Kurosu, Ken Tanizawa, Stephane Petit, Mingyi Gao, Junya Kurumida. Controlling optical signals through parametric processes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 717–725.
3. Okuno T., Hirano M., Nakanishi T., and Onishi M. Highly-nonlinear optical fibers and their applications. *SEI Tech. Rev.*, 2006, no. 62, pp. 34–40.
4. Wandel Marie, and Kristensen Poul. Fiber designs for high figure of merit and high slope dispersion compensating fibers. *J. Opt. Fiber. Commun.*, 2006, vol. 3, no. 1, pp. 25–60.
5. Poletti F., Feng X., Ponzio G. M., Petrovich M. N., Loh W. H., Richardson D. All-solid highly nonlinear single mode fibers with a tailored dispersion profile. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 1, pp. 66–80.
6. Shuai C., Gao C., Nie Y., and Peng S. Performance improvement of optical fiber coupler with electric heating versus gas heating. *Appl. Opt.*, 2010, vol. 49, pp. 4514–4519.
7. Jasion G. T., Shrimpton J. S., Chen Y., Bradley T., Richardson D. J., and Poletti F. MicroStructure Element Method (MSEM): viscous flow model for the virtual draw of microstructured optical fibers. *Optics Express*, 2015, vol. 23(1), pp. 312–329.
8. Kostecki R., Ebendorff-Heidepriem H., Warren-Smith S. C., and Monroe T. M. Predicting the drawing conditions for microstructure optical fiber fabrication. *Optical Materials Express*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 29–40.
9. Aparna A. Nair, Sudheer S. K., and Jayaraju M. Analysis of optical characteristics for photonic crystal fiber at small core diameters. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2014, vol. 3, iss. 4, pp. 377–380.
10. Filipenko A. I., Ponomarjova A. V. Modern state of the problem of the design-geometric parameters of micro structured optic fibers control. *Radiotekhnika*, 2008, no. 154, pp. 102–107 (In Russian).
11. Mishra S. S., and Singh V. K. Comparative study of fundamental properties of honey comb photonic crystal fiber at 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2011, vol. 10, no. 2, pp. 343–354.
12. Palais J. C. *Optical Communications*. In: *Engineering Electromagnetics Applications*. Ed. by R. Bansal. New York, Taylor and Frances, 2006.
13. Tiker A., Yarkoni N., Blaunstein N., Zilberman A., Kopeika N. Prediction of data stream parameters in atmospheric turbulent wireless communication links. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 2, pp. 190–199.
14. Blaunshstein N. Sh., Krouk E. A., and Sergeev M. B. *Opticheskaya svyaz': optovolokonnyya, atmosfernaya* [Optical Communication: Fiber Optic, Atmospheric]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet aerokosmicheskogo priborostroyeniya Publ., 2016. 286 p. (In Russian).

УДК 621.371

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-94-104

**Оптические сигналы в оптоволоконных линиях связи с федингом**И. Джувилер<sup>а</sup>, PhD, старший преподаватель, orcid.org/ 0000-0002-0669-7828И. Бронфман<sup>а</sup>, ассистент, orcid.org/ 0000-0001-6195-069XН. Блаунштейн<sup>б</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор, orcid.org/ 0000-0003-2945-9379, nathan.blaunstein@hotmail.com<sup>а</sup>Технический колледж им. Сами Шамуна, ул. Жаботинского, 84, Ашдод, 77245, Израиль<sup>б</sup>Негевский университет им. Бен-Гуриона, П.О.Б. 653, Бен-Гуриона ул., 1, Беэр-Шева, 74105, Израиль

**Введение:** исследование параметров сигналов в оптоволоконных каналах связи и дисперсионных свойств оптических сигналов, обусловленных неоднородностью материала и многомодовым характером распространения оптических сигналов в данных типах проводной связи, является актуальной проблемой для создания современных систем проводной связи 4-го и 5-го поколений, подверженных федингу, вызванному вышеупомянутым выше фактором, с большой скоростью в условиях многочисленного контингента пользователей. **Цель:** исследование характера многомодовой дисперсии на основе анализа распространения волноводных оптических волн вдоль оптоволоконного кабеля с различным профилем показателя рефракции внутреннего оптического кабеля относительно внешней оболочки, а также дисперсионных свойств оптоволоконного кабеля за счет неоднородности материала оболочки вдоль длины кабеля для двух типов сигналов в последовательности кодов, передаваемых через оптический кабель: возвратных и невозвратных к нулю кодов. **Методы:** дисперсионные свойства многомодового распространения внутри оптоволоконного кабеля проанализированы введением трехмерной модели распространения оптической волны в заданной направляющей структуре. Эффекты многомодовой дисперсии и материальной дисперсии, вызывающих «уширение» времени запаздывания оптических сигналов вдоль кабеля, исследовались аналитически и численно. **Результаты:** получены и проиллюстрированы свойства временной дисперсии двух видов оптоволоконных структур: с пошаговым и степенным профилем показателя преломления, — вызванной многомодовым (многолучевым) распространением и неоднородностью материала вдоль кабеля, а именно интерференцией мод, распространяющихся по оптическому кабелю, и нарушением зеркального отражения мод от стенок кабеля на неоднородностях материала стенок. Их воздействие на емкость и спектральную эффективность потока сигналов с данными, пропускаемого подобной направляющей структурой, проиллюстрировано для произвольных индексов рефракции внутреннего (стержень) и внешнего (оболочка) элементов оптического кабеля. Применен новый метод нахождения и оценки эффектов временной дисперсии оптических сигналов, распространяющихся в различных видах оптоволоконных структур. Предложен алгоритм оценки потерь в спектральной эффективности, измеряемой в битах на секунду на герц на один километр, вдоль длины кабеля для произвольного представления кодовых сигналов в потоке данных, невозвратных к нулю и возвратных к нулю. Все практические проверки были проиллюстрированы с использованием программы MATLAB.

**Ключевые слова** — емкость, оболочка, стержень, уширение задержки оптических импульсов, дисперсионные кривые, дисперсионные диаграммы оптических мод, оптоволоконно, кабель со степенным профилем рефракции, многомодовая дисперсия, линейно-поляризационные моды, фактор материальной дисперсии, многомодовая временная дисперсия, невозвратный к нулю код, численная апертура, оптические моды кабеля, индекс рефракции, возвратный к нулю код, условие существования единственной моды, спектральная эффективность, кабель с пошаговым профилем рефракции.

**Для цитирования:** Juwiler I., Bronfman I., Blaunstein N. Optical data signals in fiber optic communication links with fading. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 94–104. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-94-104

**For citation:** Juwiler I., Bronfman I., Blaunstein N. Optical data signals in fiber optic communication links with fading. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 94–104. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-94-104

УДК 621.391.832.42

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

## Исследование помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами при наличии ошибок синхронизации по задержке

Г. Н. Мальцев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-6755-5700](https://orcid.org/0000-0002-6755-5700), [georgy\\_maltsev@mail.ru](mailto:georgy_maltsev@mail.ru)

А. В. Евтеев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-4994-9220](https://orcid.org/0000-0002-4994-9220)

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

**Введение:** потенциальная помехоустойчивость радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе псевдослучайных последовательностей достигается при точном слежении за задержкой принимаемого сигнала в корреляционном приемнике. При работе с подвижными объектами задержка принимаемого сигнала непрерывно изменяется, и качество приема шумоподобных фазоманипулированных сигналов в значительной степени зависит от функционирования системы синхронизации и точности оценки задержки принимаемого сигнала следящей системой. Для достижения требуемого качества приема сигналов необходим обоснованный выбор параметров следящей системы с учетом влияния ее параметров – случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой – на выбранный показатель помехоустойчивости. **Цель:** анализ влияния ошибок слежения за задержкой принимаемого фазоманипулированного сигнала на основе псевдослучайной последовательности системой синхронизации радиотехнической системы передачи информации на вероятность ошибочного приема информационного символа. **Результаты:** расчетным методом получены семейства зависимостей вероятности ошибочного приема информационного символа от отношения сигнал/шум, величины случайной и систематической составляющих ошибок слежения за задержкой, нормированных к полосе захвата корреляционного приемника. Показано, что при фиксированном отношении сигнал/шум определяющее влияние на вероятность ошибочного приема информационного символа оказывают величины случайной и систематической составляющих ошибки слежения за задержкой. Во всех рассмотренных случаях, для всех зависимостей характерно медленное изменение вероятности ошибочного приема информационного символа при фиксированных значениях ошибок синхронизации в области малых значений отношения сигнал/шум, а при дальнейшем увеличении отношения сигнал/шум начинается более резкое уменьшение вероятности ошибочного приема информационного символа. Исходя из полученных результатов, для обеспечения заданного качества приема сигналов и достоверности выделения информационных символов и сообщений в радиотехнической системе передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами для ее системы синхронизации необходим совместный выбор параметров системы слежения за задержкой с учетом ограничений, накладываемых условиями функционирования и особенностями технической реализации радиотехнической системы. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при анализе помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами в широком диапазоне условий связи и при обосновании технических решений системы синхронизации, обеспечивающих требуемое качество приема сигналов.

**Ключевые слова** — радиотехнические системы передачи информации, шумоподобные фазоманипулированные сигналы, помехоустойчивость, синхронизация.

**Для цитирования:** Мальцев Г. Н., Евтеев А. В. Исследование помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами при наличии ошибок синхронизации по задержке. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 105–113. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

**For citation:** Maltsev G. N., Evteev A. V. Studying noise immunity of radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals and synchronization delay errors. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 105–113 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

### Введение

В радиотехнических системах (РТС) передачи информации различного назначения широкое распространение получает использование шумоподобных фазоманипулированных сигналов на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП) [1–3]. Особенностью оптимального корреляционного приема таких сигналов является узкая полоса захвата дискриминатора системы слежения за задержкой принимаемого сигнала, ширина которой определяется длительностью символа модулирующей ПСП. Поэтому при работе с подвиж-

ными объектами качество приема шумоподобных фазоманипулированных сигналов на основе ПСП в значительной степени зависит от функционирования системы синхронизации и определяется точностью оценки задержки принимаемого сигнала. При этом функция системы синхронизации состоит в том, чтобы обеспечить решающую схему информацией о моментах начала и окончания каждого из принимаемых входных символов для реализации оптимального приема и их различения. Если синхронизация символов по задержке осуществляется неточно, то качество работы решающего устройства ухудшается по сравнению



с идеальной синхронизацией, и помехоустойчивость РТС передачи информации снижается.

Существенное влияние точности синхронизации по задержке на качество приема сигналов характерно, например, для РТС передачи информации, работающих с воздушными и космическими объектами, вследствие непрерывного измерения в широких пределах задержки принимаемых сигналов. В то же время шумоподобные фазоманипулированные сигналы на основе ПСП получают широкое распространение в РТС отечественных и зарубежных космических систем [4–7] и представлены в рекомендациях международного Консультативного комитета по системам передачи космических данных (CCSDS) [8, 9]. В настоящей статье показаны результаты исследования помехоустойчивости РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП при наличии ошибок слежения за задержкой модулирующей ПСП системой синхронизации. В качестве показателя помехоустойчивости рассматривается вероятность ошибочного приема информационного символа. Данный показатель широко используется при анализе помехоустойчивости РТС передачи информации и является исходным для определения вероятности ошибочного приема сообщения с учетом используемых методов кодирования.

**Основные соотношения для расчета вероятности ошибочного приема информационного символа при наличии систематических и случайных ошибок синхронизации по задержке принимаемого сигнала**

При наиболее распространенном в РТС передаче информации различного назначения с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП методе передачи информации инвертированием одного или нескольких периодов модулирующей ПСП [5, 6, 10, 11] вероятность ошибочного приема информационного символа при когерентном приеме сигналов в условиях аддитивного белого гауссова шума определяется выражением [2, 3]

$$p_0 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi(\sqrt{2q}) \right], \quad (1)$$

где  $q = E_c/N_0$  — отношение сигнал/шум (ОСШ),  $E_c$  — энергия сигнала, приходящаяся на информационный символ,  $N_0$  — спектральная плотность мощности шума;  $\Phi(y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  — функция Крампа (одна из форм записи гауссова интеграла ошибок).

Выражение (1) характеризует потенциальную помехоустойчивость передачи информации при оптимальном приеме противоположных сигналов в отсутствие ошибок синхронизации. При корреляционном приеме ошибки синхронизации приводят к отклонению обработки принимаемых сигналов от оптимальной вследствие расстройки опорного сигнала. При наличии расстройки корреляционного приемника, обусловленной ошибкой слежения за задержкой принимаемого сигнала  $\Delta\tau$ , вероятность ошибочного приема информационного символа определяется выражением [2]

$$p_0 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{2q}) - \frac{1}{2} \Phi\left(\sqrt{2q\left(1 - 2\frac{|\Delta\tau|}{\Delta t}\right)}\right) \right], \quad (2)$$

где  $\Delta t$  — длительность символа модулирующей ПСП. Если ввести нормированную ошибку синхронизации  $\Delta x = \Delta\tau/\Delta t$ , то выражение для вероятности ошибочного приема информационного символа (2) приобретает следующий вид:

$$p_0 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{2q}) - \frac{1}{2} \Phi\left(\sqrt{2q(1 - 2|\Delta x|)}\right) \right]. \quad (3)$$

При проведении аналитических расчетов удобно использовать параметры системы слежения за задержкой, нормированные к полуширине дискриминационной характеристики. Для корреляционного приемника с шириной дискриминационной характеристики  $\Delta = 2\Delta t$  нормированная ошибка синхронизации составляет  $\Delta x = 2\Delta\tau/\Delta$ . При этом диапазон значений нормированной ошибки слежения за задержкой  $\Delta x$ , учитываемых выражениями (2) и (3), составляет  $-0,5 < \Delta x < 0,5$ , поскольку за пределами этого диапазона аргумент второй функции Крампа становится отрицательным. Однако значения  $|\Delta x| > 0,5$  соответствуют низкому качеству синхронизации, и при слежении за задержкой модулирующей ПСП принимаемого шумоподобного фазоманипулированного сигнала в реальных РТС передачи информации условие  $|\Delta x| < 0,5$ , как правило, выполняется, а при  $|\Delta x| > 0,5$  задержку нужно относить к предыдущему или последующему символу ПСП. Поэтому при анализе величины  $p_0$  в условиях ошибок синхронизации использовалось выражение (3) с соответствующим заданием нормированной ошибки слежения за задержкой  $\Delta x$  в диапазоне  $|\Delta x| < 0,5$ .

Выражения (2) и (3) соответствуют конкретному значению ошибки слежения за задержкой  $\Delta\tau$ , которая может рассматриваться как систематическая ошибка  $\delta\tau = \Delta\tau$  при отсутствии случайных ошибок синхронизации, и описанию ошибок слежения за задержкой плотностью распределения типа  $\delta$ -функции  $w(\Delta\tau) = \delta(\Delta\tau - \delta\tau)$ . В реальных

условиях имеют место как систематическая, так и случайная составляющие ошибки синхронизации, и необходимо усреднять выражения (2) и (3) по плотности распределения  $w(\Delta\tau)$  ошибок слежения за задержкой  $\Delta\tau$ . Известны достаточно сложные аналитические описания законов распределения ошибок слежения в системах синхронизации, учитывающие параметры контура слежения (порядок астатизма, форму характеристики дискриминатора, вид действующих помех), в том числе достаточно сложные [12–15]. В то же время в качестве аппроксимации закона распределения ошибок слежения за задержкой в системах синхронизации достаточно часто [4, 8, 16] используется нормальный закон распределения

$$w(\Delta\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\tau} \exp\left[-\frac{(\Delta\tau - \delta\tau)^2}{2\sigma_\tau^2}\right], \quad (4)$$

где  $\sigma_\tau$  — среднеквадратическое отклонение ошибки слежения за задержкой (случайная составляющая ошибки);  $\delta\tau$  — математическое ожидание ошибки слежения за задержкой (систематическая составляющая ошибки).

Зависимость параметров  $\sigma_\tau$  и  $\delta\tau$  закона распределения (4) от характеристик системы синхронизации уточняется для конкретной технической реализации и условий функционирования радиотехнической системы передачи информации. Кроме того, точность слежения за задержкой может быть повышена за счет использования адаптивной фильтрации и совместной фильтрации нескольких параметров принимаемого сигнала (фазовой или частотной «поддержки» слежения за задержкой) в так называемых гибридных системах синхронизации радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами [17–20].

Для проведения расчетов и анализа влияния ошибок слежения за задержкой на вероятность ошибочного приема информационного символа в широком диапазоне условий приема сигналов введем обозначения:  $\Delta$  — ширина полосы захвата дискриминатора системы слежения за задержкой;  $\Delta x = 2\Delta\tau/\Delta$  — нормированная ошибка слежения за задержкой;  $\delta x = 2\delta\tau/\Delta$  — математическое ожидание нормированной ошибки слежения за задержкой;  $\sigma_x = 2\sigma_\tau/\Delta$  — среднеквадратическое отклонение нормированной ошибки слежения за задержкой. Тогда при нормальном законе распределения ошибки слежения за задержкой  $\Delta\tau$  плотность распределения нормированной ошибки слежения за задержкой  $\Delta x$  имеет вид

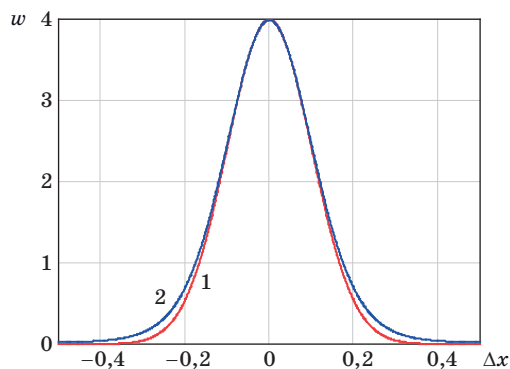
$$w(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\Delta x - \delta x)^2}{2\sigma_x^2}\right]. \quad (5)$$

В общем случае гауссово приближение является хорошей аппроксимацией более точных описаний плотности распределения ошибки слежения за задержкой, например, закона распределения Тихонова [7]

$$w(\Delta x) = \frac{\exp\left[\cos(2\pi\Delta x)/(2\pi\sigma_x)^2\right]}{I_0\left[1/(2\pi\sigma_x)^2\right]}, \quad (6)$$

где  $I(\cdot)$  — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $\Delta x$  и  $\sigma_x$  соответствуют введенным параметрам нормированной ошибки слежения за задержкой и среднеквадратического отклонения нормированной ошибки слежения за задержкой соответственно, при этом полагается, что систематическая ошибка слежения отсутствует ( $\delta x = \delta\tau = 0$ ).

На рис. 1 приведены результаты расчетов плотности распределения ошибки слежения за задержкой в соответствии с выражениями (5) и (6) при  $\sigma_x = 0,1$  и  $\delta x = 0$ . Кривая 1 соответствует нормальному закону распределения, кривая 2 — закону распределения Тихонова. В области существенных значений ошибки слежения за задержкой оба закона распределения практически совпадают. Близость к нормальному закону распределения ошибки слежения за задержкой подтверждается также результатами моделирования гибридной системы фазовой и тактовой синхронизации шумоподобных фазоманипулированных сигналов [21]. Поэтому при исследовании вероятности ошибочного приема информационного символа в РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП в условиях ошибок синхронизации по задержке использовался нормальный закон распределения (5) для нормированной ошиб-



■ Рис. 1. Плотности распределения нормального закона распределения 1 и закона распределения Тихонова 2 для нормированной ошибки слежения за задержкой

■ Fig. 1. Distribution density of normal distribution law 1 and the Tikhonov distribution law 2 for normalized error of tracking delay

ки слежения за задержкой. Значения параметров  $\sigma_x$  и  $\delta x$  могут быть связаны с параметрами системы слежения за задержкой и условиями приема сигналов [6, 12, 13, 22]. Это позволяет аналитически исследовать влияние характеристик системы синхронизации по задержке на вероятность ошибочного приема информационного символа  $p_0$  и определить условия достижения требуемых значений  $p_0$ , обуславливающих помехоустойчивость РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП.

С учетом введенных обозначений вероятность ошибочного приема информационного символа при наличии как систематических, так и случайных ошибок синхронизации по задержке рассчитывается в соответствии с выражением

$$p_0 = \frac{1}{2} \int_{-0,5}^{0,5} w(\Delta x) \times \left[ 1 - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{2q}) - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{2q(1-2|\Delta x|)}) \right] d\Delta x, \quad (7)$$

где  $w(\Delta x)$  — плотность распределения нормированных ошибок слежения за задержкой. Интегрирование по  $\Delta x$  в выражении (7) осуществляется в пределах, соответствующих учитываемому диапазону значений задержки  $-0,5\Delta t < \Delta t < 0,5\Delta t$ .

В рассматриваемом случае при  $\Delta = 2\Delta t$  максимальное учитываемое значение ошибки слежения за задержкой составляет половину от полуширины дискриминационной характеристики  $\Delta/2 = \Delta t$ . Отметим, что если бы рассматривался корреляционный приемник с шириной дискриминационной характеристики  $\Delta = \Delta t$ , то максимальное учитываемое значение ошибки слежения за задержкой составляло бы полуширину дискриминационной характеристики  $\Delta/2 = \Delta t/2$ . В обоих случаях учитываемый диапазон значений ошибок слежения за задержкой  $\Delta t$  лежит в пределах ширины дискриминационной характеристики  $\Delta$  системы слежения за задержкой. Это, с одной стороны, формально соответствует отсутствию срыва слежения, с другой стороны, исключает учет при расчете величины  $p_0$  ошибок слежения за задержкой  $\Delta t$ , выходящих за пределы дискриминационной характеристики системы слежения за задержкой и приводящих к срыву слежения, когда передача информации не осуществляется.

Учету ошибок слежения за задержкой принимаемого сигнала, лежащих в диапазоне  $0,5\Delta t < \Delta t < 0,5\Delta t$ , соответствует переход от плотности нормального закона распределения  $w(\Delta x)$  нормированных ошибок слежения за задержкой (5) к плотности распределения усеченного нормального закона распределения

$$w(\Delta x) = \frac{1}{j\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\Delta x - \delta x)^2}{2\sigma_x^2}\right], \quad -0,5 < \Delta x < 0,5, \quad (8)$$

где  $j = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_{-0,5}^{0,5} \exp\left[-\frac{(\Delta x - \delta x)^2}{2\sigma_x^2}\right] d\Delta x$  — норми-

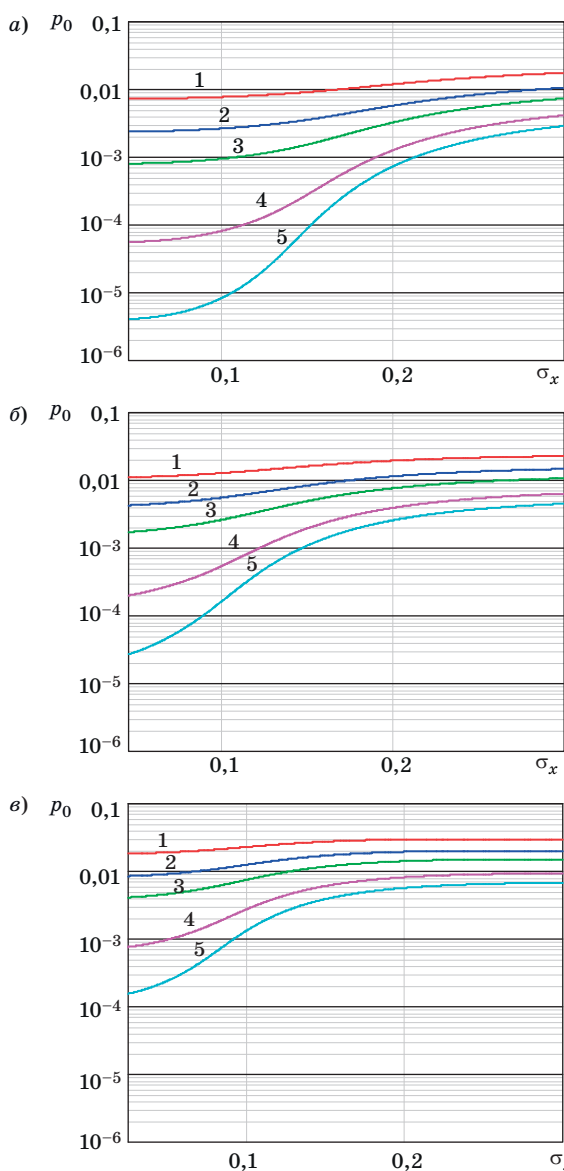
ровочный коэффициент усеченного нормального закона распределения и  $\delta x$  и  $\sigma_x$  — те же параметры, что и при использовании нормального закона распределения (5). Отметим, что в работе [17] также применялось выражение вида (7) для вероятности ошибочного приема информационного символа, однако диапазон значений задержки не ограничивался полушириной дискриминационной характеристики, и учитывалась только случайная составляющая ошибки слежения, а в работе [23] учет случайной составляющей ошибки слежения за задержкой приближенно учитывался сложением величины вероятности ошибки, определяемой выражением вида (1) со слагаемым, зависящим от  $\sigma_x$ .

### Результаты исследования помехоустойчивости РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами при наличии ошибок синхронизации по задержке

В соответствии с выражением (7) для вероятности ошибочного приема информационного символа  $p_0$  в условиях ошибок слежения за задержкой с использованием плотности распределения нормированных ошибок слежения за задержкой  $w(\Delta x)$ , определяемой выражением (8), на ЭВМ были рассчитаны семейства зависимостей вероятности ошибочного приема информационного символа  $p_0$  от ОСШ  $q$  и параметров следящей системы  $\sigma_x$  и  $\delta x$ . Результаты расчетов для широкого диапазона значений параметров  $\sigma_x$ ,  $\delta x$  и  $q$  при наличии и отсутствии ошибок слежения за задержкой приведены на рис. 2–5.

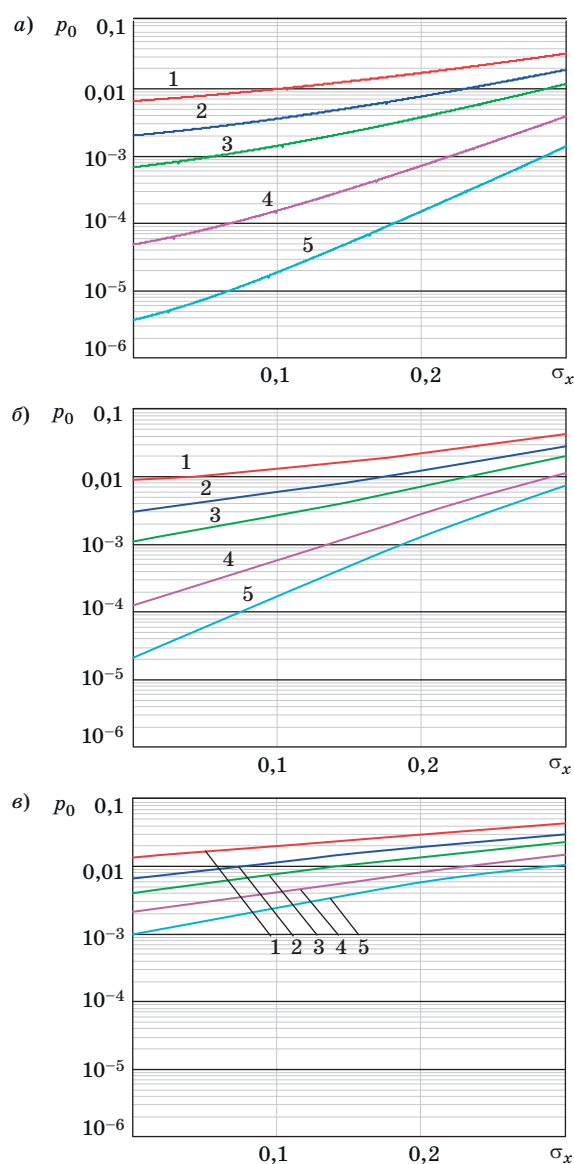
На рис. 2, а–в представлены графики расчетных зависимостей  $p_0$  от нормированной случайной составляющей ошибки слежения за задержкой  $\sigma_x$  для различных значений ОСШ  $q$  при нормированной систематической ошибке слежения за задержкой. Вероятность ошибочного приема информационного символа  $p_0$  уменьшается с увеличением  $q$  и с уменьшением  $\sigma_x$ , а при фиксированной величине  $\sigma_x = \text{const}$  определяющее влияние на величину  $p_0$  оказывают изменение ОСШ  $q$  и нормированная систематическая ошибка слежения за задержкой  $\delta x$ . Для всех зависимостей характерно резкое увеличение вероятности





■ **Рис. 2.** Зависимость вероятности ошибочного приема информационного символа от нормированной случайной ошибки слежения за задержкой  $\delta x = 0$  (а);  $\delta x = 0,1$  (б);  $\delta x = 0,2$  (в): 1 —  $q = 6$ ; 2 —  $q = 8$ ; 3 —  $q = 10$ ; 4 —  $q = 15$ ; 5 —  $q = 20$

■ **Fig. 2.** Dependences of probability of erroneous reception of information symbol on normalized random error tracking delay  $\delta x = 0$  (a);  $\delta x = 0,1$  (б);  $\delta x = 0,2$  (в): 1 —  $q = 6$ ; 2 —  $q = 8$ ; 3 —  $q = 10$ ; 4 —  $q = 15$ ; 5 —  $q = 20$



■ **Рис. 3.** Зависимость вероятности ошибочного приема информационного символа от нормированной систематической ошибки слежения за задержкой  $\delta x = 0$  (а);  $\delta x = 0,1$  (б);  $\delta x = 0,2$  (в): 1 —  $q = 6$ ; 2 —  $q = 8$ ; 3 —  $q = 10$ ; 4 —  $q = 15$ ; 5 —  $q = 20$

■ **Fig. 3.** Dependences of probability of erroneous reception of information symbol on normalized systematic error of tracking delay  $\delta x = 0$  (а);  $\delta x = 0,1$  (б);  $\delta x = 0,2$  (в): 1 —  $q = 6$ ; 2 —  $q = 8$ ; 3 —  $q = 10$ ; 4 —  $q = 15$ ; 5 —  $q = 20$

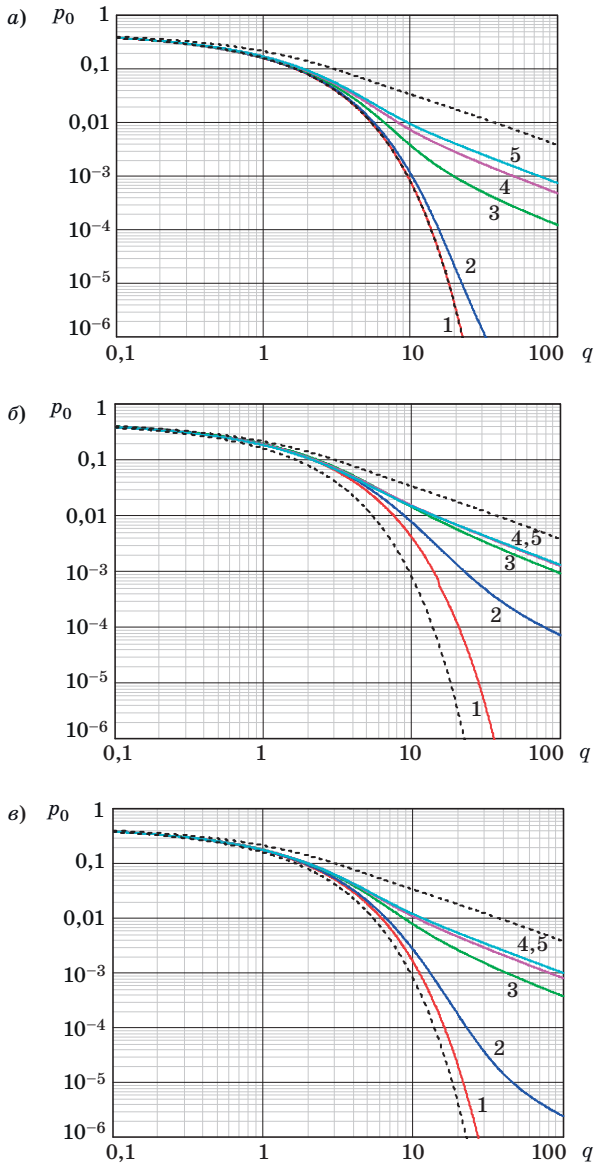
ошибочного приема информационного символа  $p_0$ , начиная с некоторого значения  $\sigma_x$ , а при дальнейшем увеличении  $\sigma_x$  при  $\delta x = \text{const}$  начинается более медленное увеличение величины  $p_0$ . В рассмотренных условиях величина  $p_0$  имеет максимальную динамику изменения в интервале значений нормированной случайной составляющей ошибки слежения за задержкой  $0,05 \leq \sigma_x \leq 0,15$ . При этом диапазон изменения величины  $p_0$  существенным образом зависит от величины  $q$ .

На рис. 3, а–в приведены графики расчетных зависимостей  $p_0$  от нормированной систематической составляющей ошибки слежения за задержкой  $\delta x$  для различных значений ОСШ  $q$  при нормированной случайной ошибке слежения за задержкой. Вероятность ошибочного приема информационного символа  $p_0$  уменьшается с увеличением  $q$  и с уменьшением  $\delta x$ , а при фиксированной величине  $\delta x = \text{const}$  определяющее влияние на величину  $p_0$  оказывают изменение ОСШ

$q$  и среднее квадратическое отклонение нормированной ошибки слежения за задержкой  $\sigma_x$ . На всех зависимостях имеет место близкое к монотонному уменьшение вероятности ошибочного приема информационного символа  $p_0$  при уменьшении  $\delta x$ .

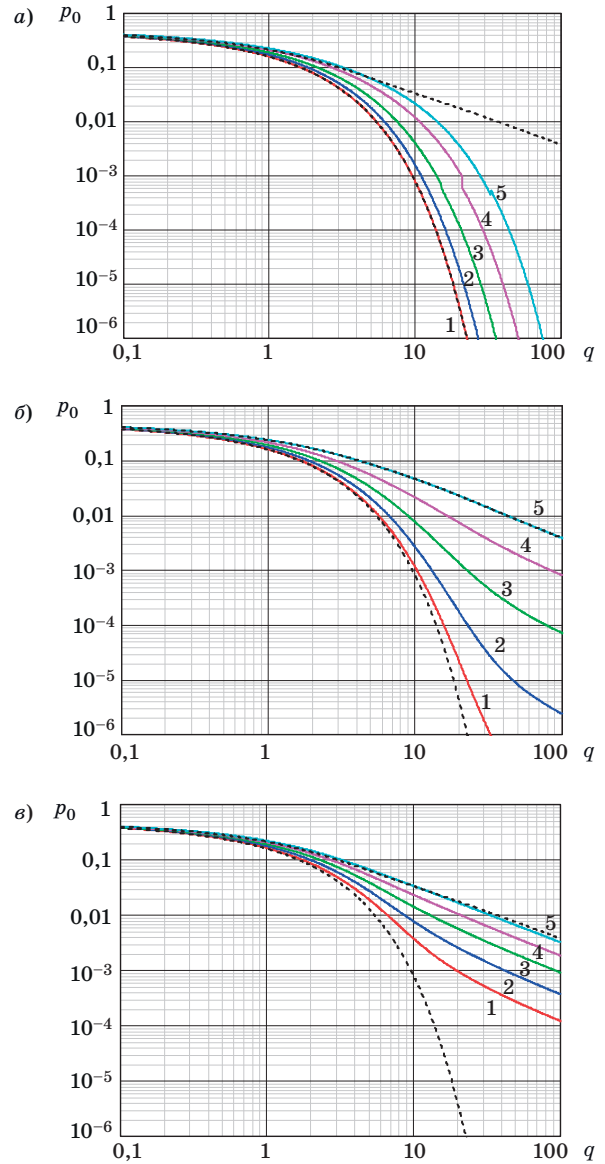
На рис. 4, а-в приведены графики расчетных зависимостей  $p_0$  от ОСШ  $q$  при различных значе-

ниях нормированной случайной составляющей ошибки слежения за задержкой  $\sigma_x$ . Вероятность ошибочного приема информационного символа  $p_0$  уменьшается с увеличением  $q$ , а при фиксированной величине  $q = \text{const}$  величина  $p_0$  уменьшается с уменьшением  $\sigma_x$  и  $\delta x$ . На всех зависимостях имеется область малых значений ОСШ  $q$ , в которой при  $\sigma_x = \text{const}$  имеет место медленное



■ **Рис. 4.** Зависимость вероятности ошибочного приема информационного символа от ОСШ при нормированной случайной составляющей ошибки слежения за задержкой  $\delta x = 0$  (а);  $\delta x = 0,1$  (б);  $\delta x = 0,2$  (в): 1 —  $\sigma_x = 0$ ; 2 —  $\sigma_x = 0,1$ ; 3 —  $\sigma_x = 0,2$ ; 4 —  $\sigma_x = 0,3$ ; 5 —  $\sigma_x = 0,4$

■ **Fig. 4.** Dependences of probability of erroneous reception of information symbol on signal-to-noise ratio for different values of normalized random component of delay tracking error  $\delta x = 0$  (a);  $\delta x = 0,1$  (б);  $\delta x = 0,2$  (в): 1 —  $\sigma_x = 0$ ; 2 —  $\sigma_x = 0,1$ ; 3 —  $\sigma_x = 0,2$ ; 4 —  $\sigma_x = 0,3$ ; 5 —  $\sigma_x = 0,4$



■ **Рис. 5.** Зависимости вероятности ошибочного приема информационного символа от ОСШ при нормированной систематической составляющей ошибки слежения за задержкой  $\delta x = 0$  (а);  $\delta x = 0,1$  (б);  $\delta x = 0,2$  (в): 1 —  $\sigma_x = 0$ ; 2 —  $\sigma_x = 0,1$ ; 3 —  $\sigma_x = 0,2$ ; 4 —  $\sigma_x = 0,3$ ; 5 —  $\sigma_x = 0,4$

■ **Fig. 5.** Dependence of probability of erroneous reception of information symbol from signal-to-noise ratio for different values of normalized systematic component of delay tracking error  $\delta x = 0$  (a);  $\delta x = 0,1$  (б);  $\delta x = 0,2$  (в): 1 —  $\sigma_x = 0$ ; 2 —  $\sigma_x = 0,1$ ; 3 —  $\sigma_x = 0,2$ ; 4 —  $\sigma_x = 0,3$ ; 5 —  $\sigma_x = 0,4$

уменьшение вероятности ошибочного приема информационного символа  $p_0$ , а при дальнейшем увеличении  $q$  начинается более резкое уменьшение величины  $p_0$ .

На рис. 5, а–в приведены графики расчетных зависимостей  $p_0$  от ОСШ  $q$  при различных значениях нормированной систематической составляющей ошибки слежения за задержкой  $\delta x$ . Вероятность ошибочного приема информационного символа  $p_0$  уменьшается с увеличением  $q$ , а при фиксированной величине  $q = \text{const}$  величина  $p_0$  уменьшается с уменьшением  $\sigma_x$  и  $\delta x$ . Как и в предыдущем случае, для всех зависимостей характерно медленное изменение величины  $p_0$  при  $\delta x = \text{const}$  в области малых значений ОСШ  $q$ , а при дальнейшем увеличении  $q$  начинается более резкое уменьшение величины  $p_0$ .

Показаны асимптоты зависимостей вероятности ошибочного приема информационного символа  $p_0$  от ОСШ  $q$  (см. рис. 4 и 5). Нижняя асимптота соответствует отсутствию ошибок слежения за задержкой, когда  $\delta x = 0$  и  $\sigma_x = 0$ , при этом плотность распределения нормированных ошибок слежения за задержкой (5) сводится к  $\delta$ -функции  $w(\Delta x) = \delta(\Delta x)$  и вероятность ошибочного приема информационного символа определяется выражением (1). Верхняя асимптота соответствует равномерному распределению ошибок слежения за задержкой в диапазоне  $-0,5\Delta t < \Delta t < 0,5\Delta t$  с плотностью распределения нормированной ошибки синхронизации

$$w(\Delta x) = \begin{cases} 1, & -0,5 < \Delta x < 0,5; \\ 0, & \Delta x < -0,5, \Delta x > 0,5. \end{cases} \quad (9)$$

Семейства зависимостей, представленные на рис. 2–5, позволяют проанализировать влияние параметров системы слежения за задержкой  $\sigma_x$ ,  $\delta t$  и  $q$  на вероятность ошибочного приема информационного символа  $p_0$  и сформулировать требования к указанным параметрам. В рассмотренных диапазонах значений нормированных параметров  $\sigma_x$  и  $\delta x$ , связанных с параметрами системы слежения за задержкой  $\sigma_t$  и  $\delta t$ , могут быть определены области, в которых имеет место слабое или существенное влияние ошибок синхронизации на помехоустойчивость РТС пе-

редачи информации. Во всех случаях диапазон изменения величины  $p_0$  существенным образом зависит от величины ОСШ  $q$ , а при наличии ошибок синхронизации для достижения требуемой величины  $p_0$  необходимо увеличение  $q$ . При этом с увеличением ошибок слежения за задержкой увеличение ОСШ  $q$ , требуемое для компенсации влияния ошибок синхронизации, существенно увеличивается.

При проведении расчетов использовались аналитические выражения, соответствующие приему сигналов в условиях белого гауссова шума, для которого определяется ОСШ  $q$ . Вместе с тем с учетом возможностей пересчета мощностей действующих шумовых (коррелированных) помех к эквивалентной мощности шумовой (некоррелированной) помехи [2, 3], а также декорреляции помех при цифровой обработке сигналов [24] полученные результаты могут быть приведены к различным условиям приема сигналов, характеризующимся воздействием как шумовых, так и нешумовых помех.

## Заключение

Проведенные исследования характеризуют влияние точности синхронизации по задержке на вероятность ошибочного приема информационного символа в РТС передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами на основе ПСП. Учитывая высокие требования к помехоустойчивости современных РТС передачи информации, работающих с воздушными и космическими объектами, и широкое использование в них шумоподобных фазоманипулированных сигналов на основе ПСП, полученные результаты могут быть использованы при анализе помехоустойчивости таких систем в широком диапазоне условий связи. В общем случае для обеспечения заданной вероятности ошибочного приема информационного символа в РТС передачи информации для ее системы синхронизации необходим совместный выбор параметров системы слежения за задержкой с учетом ограничений, накладываемых условиями функционирования РТС и особенностями технической реализации.

## Литература

1. Варакин Л. Е. *Системы связи с шумоподобными сигналами*. М., Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е., Шестопалов В. И. *Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью* / под ред. В. И. Борисова. М., РадиоСофт, 2011. 548 с.

3. Sklar В. *Digital Communication. Fundamentals and Application*. Prentice Hall PTR, 2001. 1079 p.
4. Карутин С. Н., Власов И. Б., Дворкин В. В. *Дифференциальная коррекция и мониторинг глобальных навигационных спутниковых систем*. М., Изд-во МГУ, 2014. 464 с.
5. Галантерник Ю. М., Гориш А. В., Калинин А. Ф. *Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами*. М., Радио и связь, 2008. 288 с.



- ми. М., Изд-во Московского государственного университета леса, 2003. 200 с.
6. **Бакитко Р. В., Болденков Е. Н., Булавский Н. Т.** и др. *ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования*/ под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М., Радиотехника, 2005. 688 с.
  7. *Handbook on Space Research Communication*. Geneva, Radiocommunication Bureau ITU, 2014. 30 p.
  8. *TC Synchronization and Channel Coding. Recommended Standard CCSDS 230.1-G-2*. Iss. 2. Green Book, Washington, DC, 2012. <http://mirperevodov.org/article/perevod-ucheniyh-stepeney> (дата обращения: 04.03.2019).
  9. *Pseudo-Noise Ranging Systems. Informational Report CCSDS 414.0-G-2*. Iss. 2. Green Book, Washington, DC, 2014. <http://mirperevodov.org/article/perevod-ucheniyh-stepeney> (дата обращения: 04.03.2019)
  10. **Alim A.** Spread spectrum modem for voice and data transmission. *Journal of Advances Information Technology*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 115–119.
  11. **Yixin Y., Xiaolei L., Xiaobing Z.** Design of spread-spectrum communication system based on FPGA. *Sensors & Transducers*, 2013, vol. 23, special issue, pp. 49–53.
  12. **Шахтарин Б. И.** *Анализ систем синхронизации при наличии помех*. М., ИПРЖР, 1996. 252 с.
  13. **Млечин В. В.** *Теория радиоэлектронного преодоления. Анализ воздействия помех на радиотехнические системы и устройства*. М., Радиотехника, 2009. 976 с.
  14. **Gang F., Ting Y., Guoxiang G.** Research on tracking of spread spectrum PN code signal. *Advances in Engineering*, 2017, vol. 126, pp. 506–509.
  15. **Mironov V. A., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Ershov A. Y.** Nonlinear methods of statistical analysis of dynamics of the tracking systems in radio receivers. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2018, vol. 11, no. 5, pp. 627–633.
  16. **Лукьянчиков В. Д., Ливенцев В. В., Сергиенко А. И.** Помехоустойчивость когерентного приема фазоманипулированных широкополосных сигналов с поляризационным кодированием при неидеальной временной и фазовой синхронизации. *Известия вузов России. Радиоэлектроника*, 2013, № 3, с. 3–10.
  17. **Ковальчук А. А.** Срыв синхронизации в системе слежения за задержкой псевдослучайного сигнала. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана*, 2012, № 12, с. 477–486. <http://mirperevodov.org/article/perevod-ucheniyh-stepeney> (дата обращения: 04.03.2019).
  18. **Болденков Е. Н.** Совместное слежение за задержкой и за несущей сигнала методами оптимальной траекторной фильтрации. *Радиотехника*, 2013, № 10, с. 103–106.
  19. **Шахтарин Б. И., Кульков И. А.** Анализ гибридной системы фазовой и тактовой синхронизации. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение»*, 2013, № 1, с. 40–50.
  20. **Rani L., Kikan S.** Adaptive synchronization and linear channel parameter estimation using adaptive filtering. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2013, vol. 2, no. 7, pp. 2875–2881.
  21. **Шахтарин Б. И., Сидоркина Ю. А., Кульков И. А.** Моделирование гибридной системы фазовой и тактовой синхронизации ФМ-сигналов. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение»*, 2014, № 4, с. 123–134.
  22. **Михайлов Н. В., Чистяков В. В.** *Приемники спутниковой навигации космического базирования: архитектура и первичная обработка сигналов*. Воронеж, Научная книга, 2014. 124 с.
  23. **Мирошникова Н. Е.** Влияние ошибок синхронизации на прием цифровых сигналов. *T\_Soft*, 2013, № 9, с. 112–114.
  24. **Мальцев Г. Н., Харченко А. В., Гарагуля А. С.** Границы повышения помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации при цифровой обработке сигналов с компенсацией помех. *Информационно-управляющие системы*, 2014, № 4, с. 111–116.

UDC 621.391.832.42

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

### Studying noise immunity of radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals and synchronization delay errors

G. N. Maltsev<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-6755-5700, georgy\_maltsev@mail.ruA. V. Evteev<sup>a</sup>, PhD, Tech., Research Fellow, orcid.org/0000-0002-4994-9220<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals based on pseudo-random sequences have potential noise immunity provided by accurately tracking the delay of the received signal in the correlation receiver. When working with moving objects, the delay of the received signal varies continuously, and the reception quality for noise-like phase-shifted signals highly depends on the synchronization system operation and on the accuracy of estimating the received signal delay by the tracking system. To ensure the required signal reception quality, it is necessary to provide an informed choice of tracking system parameters,

taking into account their effects, which are the random and systematic components of the delay tracking error, on the selected noise immunity indicator. **Purpose:** Analyzing how the errors in tracking the delay of a received phase-shift keyed signal based on a pseudo-random sequence by the synchronization system of a radio information transmission system can affect the probability of erroneous reception of an information symbol. **Results:** The calculation method was used to obtain families of dependencies of the probability of erroneous reception of an information symbol on the signal-noise ratio (SNR), and the values of the random and systematic components of the delay tracking error which are normalized to the capture band of the correlation receiver. It has been shown that at a fixed SNR, the values of the random and systematic components of the delay tracking error are critical for the erroneous reception probability. In all the cases discussed, all the dependencies are characterized by a slow change of the erroneous reception probability while the synchronization errors within the area of small SNR have fixed values. As the SNR value grows, the erroneous reception probability rapidly drops. To ensure the specified signal reception quality and the reliability of the selection of information symbols and messages in a radio information transmission system with noise-like phase-manipulated signals, its synchronization system requires a joint selection of the tracking system parameters, taking into account the limitations imposed by the operating conditions and technical implementation features. **Practical relevance:** The obtained results can be used in noise immunity analysis of radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals in a wide range of communication conditions, and in providing technical solutions for synchronization systems ensuring the required quality of signal reception.

**Keywords** — radio information transmission systems, noise-like phase-shift keyed signals, noise immunity, synchronization.

**For citation:** Maltsev G. N., Evteev A. V. Studying noise immunity of radio information transmission systems with noise-like phase-shift keyed signals and synchronization delay errors. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 105–113 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-105-113

## References

- Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 384 p. (In Russian).
- Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E., Shestopalov V. I. *Pomekhozashchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra pryamoj modulyatsiej psevdosluchajnoj posledovatel'nost'yu* [Immunity of radio communication systems with spreading of the spectrum by direct modulation with a pseudo-random sequence]. Ed. V. I. Borisov. Moscow, Radio-Soft Publ., 2011. 548 p. (In Russian).
- Sklar B. *Digital Communication. Fundamentals and Application*. Prentice Hall PTR, 2001. 1079 p.
- Karutin S. N., Vlasov I. B., Dvorkin V. V. *Differentsial'naya korrektsiya i monitoring global'nykh navigatsionnykh sputnikovyykh sistem* [Differential correction and monitoring of global navigation satellite systems]. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj universitet Publ., 2014. 464 p. (In Russian).
- Galanternik Yu. M., Gorish A. V., Kalinin A. F. *Komandno-izmeritel'nye sistemy i nazemnye kompleksy upravleniya kosmicheskimi apparatami* [Command and measuring systems and ground-based spacecraft control complexes]. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj universitet lesa Publ., 2003. 200 p. (In Russian).
- Bakitko R. V., Boldenkov E. N., Bulavsky N. T., et al. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and operation]. By ed. A. I. Perova, V. N. Harisova. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2005. 688 p. (In Russian).
- Handbook on Space Research Communication*. Geneva, Radiocommunication Bureau ITU, 2014. 30 p.
- TC Synchronization and Channel Coding. Recommended Standard CCSDS 230.1-G-2*. Iss. 2. Green Book, Washington, DC, 2012. Available at: <http://scbist.com/zh-d-stati/2012-statya-osnovnye-formy-poezdnoi-i-tehnicheskoi-dokumentacii.html> (accessed 04 March 2019).
- Pseudo-Noise Ranging Systems. Informational Report CCSDS 414.0-G-2*. Iss. 2. Green Book, Washington, DC, 2014. Available at: <http://scbist.com/zh-d-stati/2012-statya-osnovnye-formy-poezdnoi-i-tehnicheskoi-dokumentacii.html> (accessed 04 March 2019).
- Alim A. Spread spectrum mode for voice and data transmission. *Journal of Advances Information Technology*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 115–119.
- Yixin Y., Xiaolei L., Xiaobing Z. Design of spread-spectrum communication system based on FPGA. *Sensors & Transducers*, 2013, vol. 23, special issue, pp. 49–53.
- Shakhtarin B. I. *Analiz sistem sinkhronizatsii pri nalichii pomekh* [Analysis of synchronization systems in the presence of interference]. Moscow, IPRZHR Publ., 1996. 252 p. (In Russian).
- Mlechin V. V. *Teoriya radioelektronnogo preodoleniya. Analiz vozdeystviya pomekh na radiotekhnicheskie sistemy i ustrojstva* [Theory of electronic overcoming. Analysis of the impact of interference on radio systems and devices]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 976 p. (In Russian).
- Gang F., Ting Y., Guoxiang G. Research on tracking of spread spectrum PN code signal. *Advances in Engineering*, 2017, vol. 126, pp. 506–509.
- Mironov V. A., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Ershov A. Y. Nonlinear methods of statistical analysis of dynamics of the tracking systems in radio receivers. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2018, vol. 11, no. 5, pp. 627–633.
- Lukyanchikov V. D., Liventsev V. V., Sergienko A. I. Interference immunity of coherent reception of phase-shift keyed broadband signals with polarization coding with non-ideal time and phase synchronization. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2013, no. 3, pp. 3–10 (In Russian).
- Kovalchuk A. A. Disruption of synchronization in the tracking system for pseudo-noise signal delay. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. H. Baumana* [Science & Education: scientific edition of Bauman MSTU], 2012, no. 12, pp. 477–486. Available at: <http://scbist.com/zh-d-stati/2012-statya-osnovnye-formy-poezdnoi-i-tehnicheskoi-dokumentacii.html> (accessed 04 March 2019). (In Russian).
- Boldenkov E. N. Joint tracking of the delay and the carrier signal by methods of optimal trajectory filtering. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2013, no. 10, pp. 103–106 (In Russian).
- Shakhtarin B. I., Kulkov I. A. Analysis of the hybrid system of phase and clock synchronization. *Vestnik MGTU im. N. E. H. Baumana. Seriya "Priborostroenie"* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2013, no. 1, pp. 40–50 (In Russian).
- Rani L., Kikan S. Adaptive synchronization and linear channel parameter estimation using adaptive filtering. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2013, vol. 2, no. 7, pp. 2875–2881.
- Shakhtarin B. I., Sidorkina Yu. A., Kulkov I. A. Simulation of a hybrid system of phase and clock synchronization of FM signals. *Vestnik MGTU im. N. E. H. Baumana. Seriya "Priborostroenie"* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2014, no. 4, pp. 123–134 (In Russian).
- Mikhailov N. V., Chistyakov V. V. *Priemniki sputnikovoy navigatsii kosmicheskogo bazirovaniya: arkhitektura i pervichnaya obrabotka signalov* [Space-based satellite navigation receivers: architecture and primary signal processing]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2014. 124 p. (In Russian).
- Miroshnikova N. E. The impact of timing errors on the reception of digital signals. *T\_Comm*, 2013, no. 9, pp. 112–114 (In Russian).
- Maltsev G. N., Harchenko A. V., Garagulya A. S. Limits of radio data transmission noise immunity improvement in digital signal processing with noise compensation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 4, pp. 111–116 (In Russian).

УДК 616.8, 57.087, 577.31

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-114-120

## Анализ двигательной активности с использованием сигналов электромиограмм

В. С. Хорев<sup>а, б</sup>, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0001-6613-8940](https://orcid.org/0000-0001-6613-8940)

В. А. Максименко<sup>а</sup>, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-4632-6896](https://orcid.org/0000-0002-4632-6896)

Е. Н. Пицик<sup>а</sup>, младший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-1850-2394](https://orcid.org/0000-0003-1850-2394)

А. Е. Руннова<sup>а, в</sup>, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-2102-164X](https://orcid.org/0000-0002-2102-164X)

С. А. Куркин<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-3438-5717](https://orcid.org/0000-0002-3438-5717)

А. Е. Храмов<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-2787-2530](https://orcid.org/0000-0003-2787-2530), [hramovae@gmail.com](mailto:hramovae@gmail.com)

<sup>а</sup>Университет Иннополис, Университетская ул., 1, Иннополис, 420500, РФ

<sup>б</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет

им. Н. Г. Чернышевского, Астраханская ул., 83, Саратов, 410012, РФ

<sup>в</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского, Б. Казачья ул., 112, Саратов, 410012, РФ

**Постановка проблемы:** методы определения начала движения и моментов планирования движения являются актуальными задачами нейронауки, при этом отдельной проблемой является использование сигналов электрической активности мышц (электромиограмм) для точного определения момента движения руки ввиду сложности, нестационарности и зашумленности исходных сигналов. Особенно остро стоит вопрос для экспериментов с одновременной регистрацией электромиограммы и электроэнцефалограммы, когда требуется рассмотреть взаимодействие между структурами мозга. **Цель исследования:** разработка методики анализа электромиограмм сигналов и способов ее применения для детального исследования двигательной активности. **Методы:** используется метод пороговой детекции, основанный на фильтрации, сглаживании исходного сигнала с последующим вычислением производной. Такой подход позволяет относительно быстро и точно оценивать моменты начала движения даже по участку ряда. **Результаты:** разработана методика, позволяющая в автоматическом режиме определять момент движения. Обнаружено, что момент начала движения детектируется через некоторое время после сигнала в том случае, если движение начинается по определенному сигналу. Проведен расчет распределения задержки между предъявлением звукового сигнала и началом движения, оценены статистические свойства этого распределения. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть использованы для автоматического детектирования моментов начала движения в экспериментах с одновременной регистрацией электроэнцефалограмм и в дальнейшем применяться для решения практических задач, связанных с разработкой управляемых протезов для реабилитации людей с ограниченными возможностями.

**Ключевые слова** — анализ сигналов, двигательная активность, электромиограммы, фильтрация, автоматический поиск, распознавание паттернов.

**Для цитирования:** Хорев В. С., Максименко В. А., Пицик Е. Н., Руннова А. Е., Куркин С. А., Храмов А. Е. Анализ двигательной активности с использованием сигналов электромиограмм. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 3, с. 114–120. doi:10.31799/1684-8853-2019-3-114-120

**For citation:** Khorev V. S., Maksimenko V. A., Pitsik E. N., Runnova A. E., Kurkin S. A., Hramov A. E. Analysis of motor activity using electromyogram signals. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 114–120 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-114-120

### Введение

В настоящее время объектом большого научного интереса являются процессы, протекающие в организме человека, связанные с контролем двигательной активности [1–6]. Актуальность данного научного направления определяется возможностью применения результатов в таких областях, как реабилитация, протезирование, робототехника и др. Регистрация и анализ электроэнцефалограмм (ЭЭГ) является одним из наиболее объективных способов изучения работы головного мозга человека непосредственно во время совершения движения [7–9]. Однако применение ЭЭГ для анализа двигательной активности в основном подразумевает проведение эксперимента по заранее раз-

работанному плану, согласно которому движения выполняются по специальному сигналу. В данном случае возникает проблема точного определения момента начала движения [10]. Анализ электромиограмм (ЭМГ) — сигналов электрической активности, возбуждаемых непосредственно мышечными волокнами, — является перспективным для решения данной проблемы [11]. В свою очередь анализ таких сигналов затруднен ввиду низкой амплитуды потенциалов, сильной нестационарности, наличия различных артефактов и плохой структурированности исходных данных [12–14].

С учетом вышесказанного существует необходимость разработки методик анализа ЭМГ-сигналов и способов их применения для детального исследования двигательной активности.



## Данные эксперимента

В работе были использованы данные испытуемого, не имеющего патологий центральной нервной системы. Во время эксперимента проводилась одновременная регистрация ЭМГ и ЭЭГ в вертикальном положении тела. Продолжительность записи составила 150 мин. Во время регистрации сигналов дыхание было произвольным.

В ходе эксперимента регистрировались сигналы неинвазивной ЭМГ с локтевой мышцы. Испытуемый был проинструктирован выполнять сгиб (I) и последующий разгиб (II) руки с промежуточной фиксацией в верхнем положении по звуковому сигналу в соответствии со схемой, представленной на рис. 1, а. Регистрация сигналов осуществлялась с частотой 250 Гц при 12-разрядном разрешении при помощи многоканального электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03» модель 10 (НПКФ «Медиком-МТД», Россия) с комплектом стандартных датчиков. Для дополнительного контроля двигательной активности было использовано задающее устройство копирующего типа с обратной силомоментной связью, представляющее собой рычажную конструкцию из пластика и легких сплавов, выполненную аналогично скелетной схеме человека с совпадением положения осей подвижности и суставов. При этом рычажный механизм был идентичен кинематической схеме руки человека и содержал аналог предплечья, соединенного с плечом вращательной парой с одной степенью свободы, позволяющий получать данные о совершении сгиба локтевого сустава одновременно с записью ЭМГ.

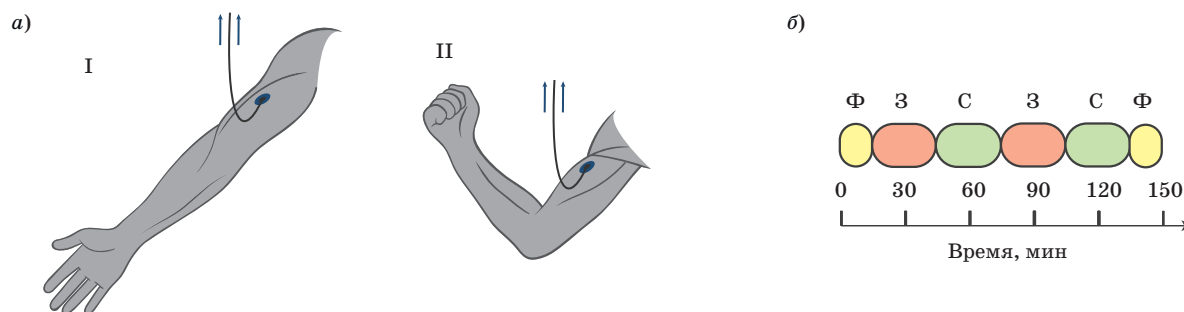
Основная структура эксперимента представлена на рис. 1, б. В общей сложности эксперимент состоял из шести сессий, включающих в себя предварительную регистрацию фоновой активности без выполнения испытуемым специальных инструкций в течение 15 мин, две получасовые

сессии с поднятием руки по звуковому сигналу, две сессии с произвольным поднятием руки, заключительную регистрацию фоновой активности без выполнения испытуемым специальных инструкций в течение 15 мин. Начало каждой сессии предварялось автоматическим аудиовизуальным предупреждением испытуемого о ее наступлении. Для сессий с поднятием руки по звуковому сигналу было запланировано 50 повторений движения, звуковые стимулы подавались в произвольные моменты времени, но предусматривали не менее 10 с покоя между каждыми двумя. Для сессии с произвольным поднятием руки звуковые стимулы не подавались, однако испытуемый был проинструктирован находиться в состоянии покоя также не менее 10 с после каждого периода двигательной активности. Эксперимент проводился в первой половине дня в специально оборудованной лаборатории, где доброволец находился в комфортных условиях, исключающих наличие мешающих факторов наподобие посторонних шумов и яркого света.

## Методы анализа данных

Для детектирования момента начала движения сигнал ЭМГ фильтровался в полосе частот 1–10 Гц, затем сглаживался скользящим окном длиной 2 с, после чего по сглаженному ряду находилась производная сигнала. Путем сопоставления исходного сигнала ЭМГ и полученной производной удалось обнаружить, что в моменты времени, соответствующие началу движения, значение производной превышало пороговое значение (0,5 от максимального значения ряда).

Таким образом, в результате сопоставления значения поступившего сигнала с пороговым значением в каждый отсчет времени были получены моменты, соответствующие временам начала движения.



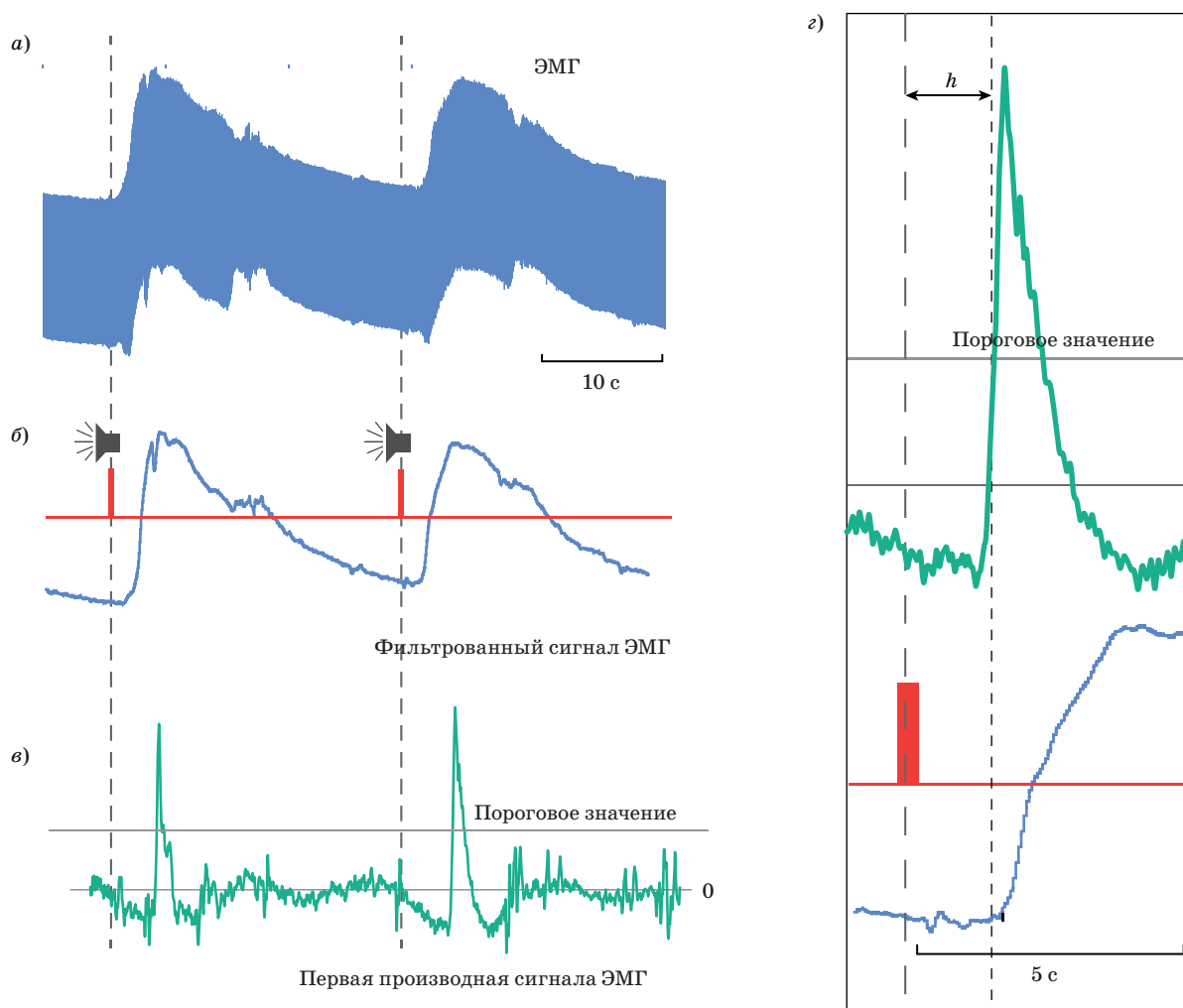
■ **Рис. 1.** Дизайн эксперимента (а): I, II — положение руки в момент начала сгиба и разгиба; временная структура экспериментальных сессий (б): Ф — периоды регистрации фоновой активности; З — периоды движений по звуковому стимулу; С — периоды движений без стимула

■ **Fig. 1.** The motion design experimental setup (а): I, II corresponds to flexing and to extension; the structure of experimental sessions (б): Ф, З and С define a single period of background activity, audio stimulated movement and free movement respectively



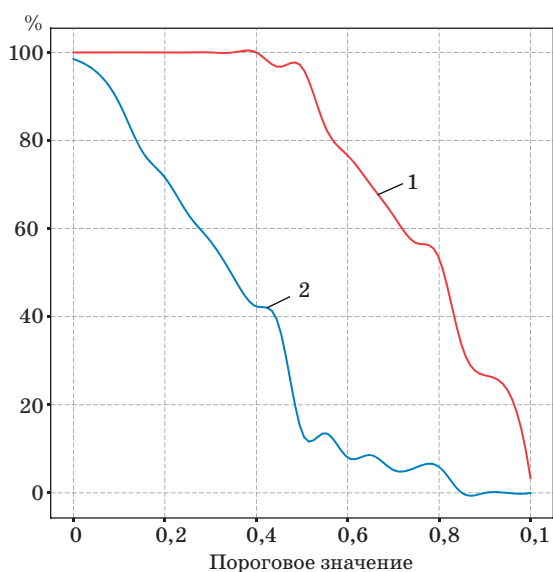
На рис. 2, а показан типичный фрагмент сигнала ЭМГ, регистрируемого с локтевой мышцы. Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты звуковых сигналов, соответствующих командам. Из рис. 2, а видно, что моментам выполнения движений соответствует резкое увеличение амплитуды регистрируемого сигнала. На рис. 2, б и в представлены соответственно сглаженный временной ряд ЭМГ и его производная. Пороговое значение используется для детектирования момента начала движения в автоматическом режиме.

Пороговое значение было выбрано в соответствии с оптимальным соотношением чувствительности и процента ложных выводов о наличии движения. На рис. 3 представлены зависимости чувствительности методики и процента ложных срабатываний от значения порога для детектирования. Пороговые значения перебирались в диапазоне от нуля до максимального значения ряда с шагом 0,05. Как легко видеть из графика, максимальная разность приходится на значение, соответствующее 0,5 от максимального значения ряда, которое в дальнейшем и было использовано



■ **Рис. 2.** Фрагмент исходного экспериментального сигнала ЭМГ (а) и сглаженного и фильтрованного в полосе 1–10 Гц сигнала ЭМГ (б); его производная (зеленая кривая) и линия порогового значения, используемая для определения момента начала движения (в) (моменты звуковых сигналов отмечены красными рисками и штриховыми линиями); увеличенный фрагмент фильтрованного сигнала ЭМГ и его производной, демонстрирующий наличие задержки  $h$  между моментом предъявления звукового сигнала (штриховая линия) и моментом начала движения (пунктирная линия) (г)

■ **Fig. 2.** Fragment of the original (raw) experimental EMG signal (а); smoothed and filtered EMG signal (blue curve) (б); its derivative (green curve) and the line of the threshold value used to determine the moments of the beginning of the movement (в). The moments of the sound signals are marked in red markers and vertical dash line; enlarged fragment of the filtered signal and its derivative, which demonstrates the delay  $h$  between the moment of presentation of the sound signal (dashed line) and the moment of beginning of the movement (dotted line) (г)



■ **Рис. 3.** Зависимость чувствительности 1 и процента ложных выводов 2 о начале движения от порогового значения

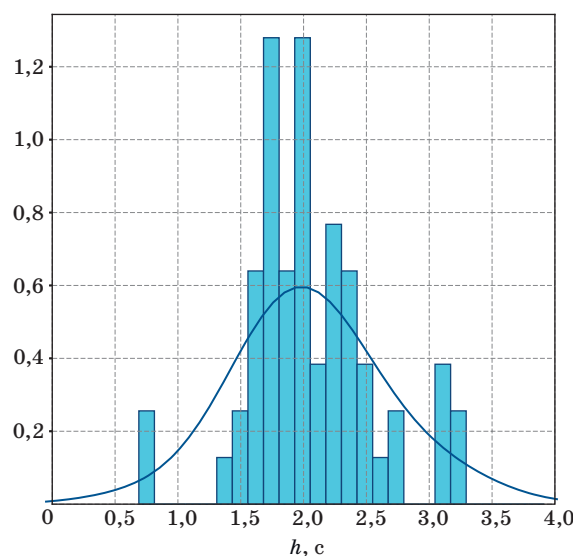
■ **Fig. 3.** The dependence of true positive 1 and the false positive 2 percentage of the movement onset from the threshold value

для расчета распределения задержек между временем предъявления звукового сигнала и моментом начала движения. Преимущество подхода состоит в его простоте и скорости по сравнению с более точными и сложными методами, требующими индивидуального обучения [15, 16].

## Результаты и обсуждение

Существует задержка по времени  $h$  между моментом предъявления звукового сигнала и детектированным моментом начала движения (см. рис. 2, б). Для определения характерного времени задержки на рис. 4 представлено статистическое распределение величины  $h$  во время выполнения эксперимента, построенное для оптимального порогового значения. Видно, что мода распределения приходится на время, соответствующее 1,6–1,8 с. Узость полученного распределения свидетельствует в пользу представления о том, что время подготовки к движению может быть оценено и далее учтено в эксперименте без предъявления звукового сигнала. Сплошной линией на рисунке представлена аппроксимация нормальным распределением.

Наличие задержки между моментом звукового стимула и моментом начала движения может ассоциироваться с процессами обработки стимула и с планированием движения. В данном контексте использование ЭМГ-сигналов дает большой потенциал для выявления различных фаз, связанных



■ **Рис. 4.** Распределение временных задержек между моментом предъявления звукового сигнала и моментом начала движения, рассчитанных по ряду производной сглаженного сигнала ЭМГ

■ **Fig. 4.** The distribution of time delays between the moment of presentation of the sound signal and the moment of the beginning of the movement, calculated via threshold of the smoothed EMG signal derivative

с реализацией двигательной активности человека. Современная концепция механизма замыкания условной связи [17] допускает, что ассоциация очагов возбуждений, соответствующих условному и безусловному раздражителям, может происходить как на уровне коры, так и на уровне подкорки: при продолжающемся поступлении по специфическим путям афферентных импульсов в определенный ограниченный корковый очаг возбуждения постепенно генерализованное возбуждение концентрируется в этом очаге, а затем уступает значительную часть своего влияния на построение движения нижележащим очагам возбуждения, имеющим то преимущество, что к ним продолжают притекать афферентные проприоцептивные импульсы.

Недавние исследования указывают на наличие задержек при активации сенсомоторной обработки в мозге человека. Сенсомоторная обработка включает в себя фазы формирования, распознавания стимула, категоризации-ответа, принятия решения, реакции афферентных нейронов. Длительность этих задержек сопоставима с полученной в данной работе, хотя и принимает меньшее значение в силу специфики эксперимента [17–19]. Следует отметить, что распределение, представленное на рис. 4, достаточно хорошо аппроксимируется распределением Гаусса. Временной интервал, требуемый для прохождения импульса от головного мозга к мышцам, в сумме с временным интервалом мышечной реакции принимает примерно постоянное значение

для всех повторений движения. Шумовая компонента, определяющая форму распределения времени задержки  $h$ , является следствием процессов, протекающих в головном мозге, отвечающих за обработку стимула и последующую генерацию управляющего сигнала. Эффект присутствия данной шумовой компоненты [20, 21] свидетельствует в пользу предположения о том, что исходное состояние мозга до начала момента движения различно и определяется процессами, протекающими в этот самый момент времени, чем и объясняется гауссоподобный вид распределения.

### Заключение

Таким образом, в работе предложен метод, позволяющий в автоматическом режиме опреде-

лять момент начала движения. Обнаружено, что в случае, когда движение начинается по определенному сигналу, момент начала движения детектируется через некоторое время после сигнала. Обсуждены возможные причины и предпосылки полученных результатов. Полученные результаты могут быть использованы для выделения фаз «планирования движения» и расширения понимания принципов функционирования головного мозга и сознания человека, что способствует решению ряда прикладных задач, связанных с улучшением качества жизни людей.

### Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-72-30003.

### Литература

1. Wood G., Kober S. E., Witte M., Neuper C. On the need to better specify the concept of “control” in brain-computer-interfaces/neurofeedback research. *Front Syst Neurosci*, 2014, vol. 8, pp. 171. doi:10.3389/fnsys.2014.00171
2. Hayashibe M., Guiraud D., Pons J. L., Farina D. Editorial: biosignal processing and computational methods to enhance sensory motor neuroprosthetics. *Front Syst Neurosci*, 2015, vol. 9, pp. 434. doi:10.3389/fnins.2015.00434
3. Mondini V., Mangia A. L., Cappella A. Single-session tDCS over the dominant hemisphere affects contralateral spectral EEG power, but does not enhance neurofeedback-guided event-related desynchronization of the non-dominant hemisphere’s sensorimotor rhythm. *PLoS One*, 2018, vol. 13, no. 3, e0193004. doi:10.1371/journal.pone.0193004
4. Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Khramova A. E., Pisarchik A. N. The study of evolution and depression of the alpha-rhythm in the human brain EEG by means of wavelet-based methods. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10337, pp. 1033713. doi:10.1117/12.2267699
5. Maksimenko V. A., van Heukelum S., Makarov V. V., Kelderhuis J., Lüttjohann A., Koronovskii A. A., Hramov A. E., van Luijtelea G. Absence seizure control by a brain computer interface. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, pp. 2487. doi:10.1038/s41598-017-02626-y
6. Maksimenko V. A., Kurkin S. A., Pitsik E. N., Musatov V. Yu., Runnova A. E., Efremova T. Yu., Hramov A. E., Pisarchik A. N. Artificial neural network classification of motor-related eeg: An increase in classification accuracy by reducing signal complexity. *Complexity*, 2018, 9385947. doi:10.1155/2018/9385947
7. Павлов А. Н., Руннова А. Е., Максименко В. А., Павлова О. Н., Гришина Д. С., Храмов А. Е. Распознавание движений руки по сигналам электроэнцефалограммы на основе флуктуационного анализа. *Письма в ЖТФ*, 2019, т. 45, № 4, с. 14–17. doi:10.21883/PJTF.2019.04.47327.17377
8. Pavlov A. N., Runnova A. E., Maksimenko V. A., Pavlova O. N., Grishina D. S., Hramov A. E. Detrended fluctuation analysis of EEG patterns associated with real and imaginary arm movements. *Physica A*, 2018, vol. 509, pp. 777–782. doi:https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.06.096
9. Maksimenko V. A., Pavlov A., Runnova A. E., Nedaivozov V., Grubov V., Koronovskii A., Pchelintseva S. V., Pitsik E., Pisarchik A. N., Hramov A. E. Nonlinear analysis of brain activity, associated with motor action and motor imaginary in untrained subjects. *Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 91, no. 4, pp. 2803–2817. doi: 10.1007/s11071-018-4047-y
10. Reis P. M. R., Hebenstreit F., Gabsteiger F., von Tscharnner V., Lochmann M. Methodological aspects of EEG and body dynamics measurements during motion. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, vol. 8, no. 156, pp. 1–19. doi:10.3389/fnhum.2014.00156
11. Rouillard J., Duprès A., Cabestainga F., Leclercq S., Bekaerta M., Piaua C., Vannobela J., Lecocq C. Hybrid BCI coupling EEG and EMG for severe motor disabilities. *Procedia Manufacturing*, 2015, vol. 3, pp. 29–36. doi:10.1016/j.promfg.2015.07.104
12. Basmajian J. V. *Muscle alive, their functions are revealed by electromyography*. Williams and Wilkins, 1979. 555 p.
13. De Luca C. J. Filtering the surface EMG signal: Movement artifact and baseline noise contamination. *Journal of Biomechanics*, 2010, vol. 43, pp. 1573–1579. doi:10.1016/j.jbiomech.2010.01.027
14. Kastalskiy I., Mironov V., Lobov S., Krilova N., Pimashkin A., Kazantsev V. A neuromuscular interface for robotic devices control. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2018, no. 8948145, pp. 1–8. doi:10.1155/2018/8948145

15. Al-Timemy A. H., Bugmann G., Escudero J. Adaptive windowing framework for surface electromyogram-based pattern recognition system for transradial amputees. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 8, pp. 2402. doi:10.3390/s18082402
16. Chen B., Grazi L., Lanotte F., Vitiello N., Crea S. A real-time lift detection strategy for a hip exoskeleton. *Frontiers in Neurorobotics*, 2018, vol. 12, pp. 17. doi:10.3389/fnbot.2018.00017
17. Hazy T. E., Frank M. J., O'Reilly R. C. Neural mechanisms supporting acquired phasic dopamine responses in learning: An integrative synthesis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2009, vol. 34, no. 5, pp. 701–720. doi:10.1016/j.neubiorev.2009.11.019
18. Melnik A., Hairston W. D., Ferris D. P., König P. EEG correlates of sensorimotor processing: independent components involved in sensory and motor processing. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, pp. 4461. doi:10.1038/s41598-017-04757-8
19. Asakawa T., Muramatsu A., Hayashi T., Urata T., Taya M., Mizuno-Matsumoto Y. Comparison of EEG propagation speeds under emotional stimuli on smartphone between the different anxiety states. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, vol. 8, pp. 1006. doi:10.3389/fnhum.2014.01006
20. Pisarchik A. N., Chholak P., Hramov A. E. Brain noise estimation from MEG response to flickering visual stimulation. *Chaos, Solitons & Fractals: X*, 2019, vol. 1, pp. 100005. doi: 10.1016/j.csfx.2019.100005
21. Runnova A. E., Hramov A. E., Grubov V. V., Koronovskii A. A., Kurovskaya M. K., Pisarchik A. N. Theoretical background and experimental measurements of human brain noise intensity in perception of ambiguous images. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2016, vol. 93, pp. 201–206. doi: 10.1016/j.chaos.2016.11.001

UDC 616.8, 57.087, 577.31

doi:10.31799/1684-8853-2019-3-114-120

**Analysis of motor activity using electromyogram signals**V. S. Khorev<sup>a,b</sup>, PhD, Phys.-Math. Senior Researcher, orcid.org/0000-0001-6613-8940V. A. Maksimenko<sup>a</sup>, PhD, Phys.-Math, Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-4632-6896E. N. Pitsik<sup>a</sup>, Junior Researcher, orcid.org/0000-0003-1850-2394A. E. Runnova<sup>a,c</sup>, PhD, Phys.-Math, Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-2102-164XS. A. Kurkin<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0002-3438-5717A. E. Hramov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0003-2787-2530, hramovae@gmail.com<sup>a</sup>Neuroscience and Cognitive Technology Lab, Innopolis University, 1, Universitetskaya St., 420500, Innopolis, Russian Federation<sup>b</sup>Saratov State University named after N. G. Chernyshevsky, 83, Astrakhanskaya St., 410012, Saratov, Russian Federation<sup>c</sup>Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, 112, Bolshaya Kazachia St., 410012, Saratov, Russian Federation

**Introduction:** Methods of detecting the start of a movement and moments of movement planning are important in neuroscience. Using the signals of electrical activity of muscles (electromyograms) in order to precisely detect the moment of movement is a special problem, because the initial signals are complex, non-stationary and affected by noise. It is especially important in experiments with simultaneous registration of an EEG and an electromyogram, when you have to analyze the interaction between brain structures. **Purpose:** Development of methods for electromyogram data analysis and techniques for their use in a detailed study of motor activity. **Methods:** We use the threshold detection method based on calculating the derivative of the original signal filtered and smoothed. Such an approach makes it possible to estimate the starting points of the onset of motion relatively quickly and accurately, even along a part of a time series. **Results:** We have developed a technique which allows you to automatically detect the precursor of a movement start, based on the analysis of electromyographic signals. We have calculated the distribution of the delay between the presentation of a sound signal and the beginning of a movement, and evaluated the statistical properties of this distribution. **Practical relevance:** The results of this research can be used to automatically detect starting points in experiments with simultaneous EEG recording, and later be applied to solve practical problems related to the development of controlled prostheses for the rehabilitation of people with disabilities.

**Keywords** — signal analysis, motor activity, electromyograms, filtering, automatic search, pattern recognition.

**For citation:** Khorev V. S., Maksimenko V. A., Pitsik E. N., Runnova A. E., Kurkin S. A., Hramov A. E. Analysis of motor activity using electromyogram signals. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 3, pp. 114–120 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-3-114-120

**References**

1. Wood G., Kober S. E., Witte M., Neuper C. On the need to better specify the concept of “control” in brain-computer-interfaces/neurofeedback research. *Front Syst Neurosci*, 2014, vol. 8, pp. 171. doi:10.3389/fnsys.2014.00171
2. Hayashibe M., Guiraud D., Pons J. L., Farina D. Editorial: biosignal processing and computational methods to enhance sensory motor neuroprosthetics. *Front Syst Neurosci*, 2015, vol. 9, pp. 434. doi:10.3389/fnins.2015.00434
3. Mondini V., Mangia A. L., Cappella A. Single-session tDCS over the dominant hemisphere affects contralateral spectral EEG power, but does not enhance neurofeedback-guided event-related desynchronization of the non-dominant hemi-



- sphere's sensorimotor rhythm. *PLoS One*, 2018, vol. 13, no. 3, e0193004. doi: 10.1371/journal.pone.0193004
4. Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Khramova A. E., Pisarchik A. N. The study of evolution and depression of the alpha-rhythm in the human brain EEG by means of wavelet-based methods. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10337, pp. 1033713. doi:10.1117/12.2267699
  5. Maksimenko V. A., van Heukelum S., Makarov V. V., Kelderhuis J., Lüttjohann A., Koronovskii A. A., Hramov A. E., van Luijckelaar G. Absence seizure control by a brain computer interface. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, pp. 2487. doi:10.1038/s41598-017-02626-y
  6. Maksimenko V. A., Kurkin S. A., Pitsik E. N., Musatov V. Yu., Runnova A. E., Efremova T. Yu., Hramov A. E., Pisarchik A. N. Artificial neural network classification of motor-related eeg: An increase in classification accuracy by reducing signal complexity. *Complexity*, 2018, 9385947. doi:10.1155/2018/9385947
  7. Pavlov A. N., Runnova A. E., Maksimenko V. A., Pavlova O. N., Grishina D. S., Hramov A. E. Recognizing arm motions by fluctuation analysis of EEG signals. *Tech. Phys. Lett.*, 2019, vol. 45, pp. 129–131. doi:10.21883/PJTf.2019.04.47327.17377
  8. Pavlov A. N., Runnova A. E., Maksimenko V. A., Pavlova O. N., Grishina D. S., Hramov A. E. Detrended fluctuation analysis of EEG patterns associated with real and imaginary arm movements. *Physica A*, 2018, vol. 509, pp. 777–782. doi:https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.06.096
  9. Maksimenko V. A., Pavlov A., Runnova A. E., Nedaivozov V., Grubov V., Koronovskii A., Pchelintseva S. V., Pitsik E., Pisarchik A. N., Hramov A. E. Nonlinear analysis of brain activity, associated with motor action and motor imaginary in untrained subjects. *Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 91, no. 4, pp. 2803–2817. doi:10.1007/s11071-018-4047-y
  10. Reis P. M. R., Hebenstreit F., Gabsteiger F., von Tscharnner V., Lochmann M. Methodological aspects of EEG and body dynamics measurements during motion. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, vol. 8, no. 156, pp. 1–19. doi:10.3389/fnhum.2014.00156
  11. Rouillard J., Duprésa A., Cabestaing F., Leclercq S., Beckaert M., Piaua C., Vannobela J., Lecocq C. Hybrid BCI coupling EEG and EMG for severe motor disabilities. *Procedia Manufacturing*, 2015, vol. 3, pp. 29–36. doi:10.1016/j.promfg.2015.07.104
  12. Basmajian J. V. *Muscle alive, their functions are revealed by electromyography*. Williams and Wilkins, 1979. 555 p.
  13. De Luca C. J. Filtering the surface EMG signal: Movement artifact and baseline noise contamination. *Journal of Biomechanics*, 2010, vol. 43, pp. 1573–1579. doi:10.1016/j.jbiomech.2010.01.027
  14. Kastalskiy I., Mironov V., Lobov S., Krilova N., Pimashkin A., Kazantsev V. A neuromuscular interface for robotic devices control. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2018, no. 8948145, pp. 1–8. doi:10.1155/2018/8948145
  15. Al-Timemy A. H., Bugmann G., Escudero J. Adaptive windowing framework for surface electromyogram-based pattern recognition system for transradial amputees. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 8, pp. 2402. doi:10.3390/s18082402
  16. Chen B., Grazi L., Lanotte F., Vitiello N., Crea S. A real-time lift detection strategy for a hip exoskeleton. *Frontiers in Neurobotics*, 2018, vol. 12, pp. 17. doi:10.3389/fnbot.2018.00017
  17. Hazy T. E., Frank M. J., O'Reilly R. C. Neural mechanisms supporting acquired phasic dopamine responses in learning: An integrative synthesis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2009, vol. 34, no. 5, pp. 701–720. doi:10.1016/j.neubiorev.2009.11.019
  18. Melnik A., Hairston W. D., Ferris D. P., König P. EEG correlates of sensorimotor processing: independent components involved in sensory and motor processing. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, pp. 4461. doi:10.1038/s41598-017-04757-8
  19. Asakawa T., Muramatsu A., Hayashi T., Urata T., Taya M., Mizuno-Matsumoto Y. Comparison of EEG propagation speeds under emotional stimuli on smartphone between the different anxiety states. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, vol. 8, pp. 1006. doi:10.3389/fnhum.2014.01006
  20. Pisarchik A. N., Chholak P., Hramov A. E. Brain noise estimation from MEG response to flickering visual stimulation. *Chaos, Solitons & Fractals: X*, 2019, vol. 1, pp. 100005. doi: 10.1016/j.csf.2019.100005
  21. Runnova A. E., Hramov A. E., Grubov V. V., Koronovskii A. A., Kurovskaya M. K., Pisarchik A. N. Theoretical background and experimental measurements of human brain noise intensity in perception of ambiguous images. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2016, vol. 93, pp. 201–206. doi: 10.1016/j.chaos.2016.11.001

## БАЛОНИН Николай Алексеевич



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — теория динамических систем, теория идентификации, теория операторов, теория матриц, вычислительные методы, интернет-робототехника, интернет-книжки с исполняемыми алгоритмами, научные социальные сети.

Эл. адрес: korbendfs@mail.ru

## БРОНФМАН Ирина



Ассистент инженерного колледжа Шамун, Ашдод, помощник преподавателя кафедры систем связи Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль.

В 2011 году окончила бакалавриат инженерного колледжа Шамун, Ашдод, Израиль, по специальности «Электротехника и электроника со специализацией в системах связи», в 2017 году — магистратуру инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль, по специальности «Системы связи».

Является автором семи научных публикаций.

Область научных интересов — беспроводная связь, маскирование ошибок при анализе и обработке изображений и видео, спутниковая связь.

Эл. адрес: irinamo@post.bgu.ac.il

## ДЖУВИЛЕР Ирит



Заведующая кафедрой электротехники и электроники, старший преподаватель Технического колледжа им. Сами Шамуна, Ашдод, Израиль.

В 1995 году окончила магистратуру Негевского университета им. Бен-Гуриона по специальности «Электротехника и вычислительная техника».

В 2004 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD) в области электротехники и физической электроники в Тель-Авивском университете.

Является автором 28 научных публикаций.

Область научных интересов — нелинейная оптика и нанофотоника.

Эл. почта: iritj@sce.ac.il

## БЛАУНШТЕЙН Натан Шаевич



Профессор-эмиритус кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль.

В 1972 году окончил Томский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника, включая квантовую».

В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором около 200 научных публикаций, в том числе 12 монографий, пяти патентов и трех изобретений.

Область научных интересов — радиофизика, системы проводной и беспроводной связи, радары, оптика и лидары.

Эл. адрес:

nathan.blaunstein@hotmail.com

## ДЖАЙН Лакхми



Адъюнкт-профессор Университета Канберры и Технологического университета Сиднея, Австралия, и Борнмутского университета, Великобритания.

Защитил диссертацию на соискание PhD (Electronic Engineering).

Является автором более 200 научных публикаций. Область научных интересов — парадигмы искусственного интеллекта и их применение в сложных системах безопасности, электронном образовании, электронном здравоохранении, беспилотных летательных аппаратах и интеллектуальных агентах.

Эл. почта: jainlakhmi@gmail.com

## ЕВТЕЕВ Андрей Владимирович



Научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2013 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы».

В 2018 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 15 научных публикаций.

Область научных интересов — радиоэлектронные системы коммунікационных комплексов, помехоустойчивость радиоканалов управления и передачи информации, математическое моделирование процессов формирования и приема шумоподобных сигналов в радиоэлектронных системах различного назначения.

Эл. адрес: evteev30@mail.ru

**КУРКИН**  
Семен  
Андреевич



Профессор лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники Университета Иннополис.

В 2003 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика и электроника».

В 2017 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 150 научных публикаций и более 20 патентов на изобретения и свидетельств на программное обеспечение.

Область научных интересов — нейронаука, применение искусственных нейронных сетей, исследование когнитивных процессов, Data Science, нелинейная динамика, электроника и др.

Эл. адрес: kurkinsa@gmail.com

**МАКСИМЕНКО**  
Владимир  
Александрович



Доцент Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А., старший научный сотрудник научно-образовательного центра «Нелинейная динамика сложных систем».

В 2012 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Физика открытых нелинейных систем».

В 2015 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук.

Является автором более 50 научных публикаций.

Область научных интересов — анализ устойчивости динамических режимов, реализующихся в пространственно-распределенных системах различной природы, и др.

Эл. адрес: maximenkovl@gmail.com

**НЕНАШЕВ**  
Вадим  
Александрович



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника».

В 2017 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 22 научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерное моделирование, системы навигации и радиолокации, статистический анализ, электродинамика.

Эл. адрес: granat89@mail.ru

**ЛЕВАШОВА**  
Татьяна  
Викторовна



Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1986 году окончила Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 2009 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — управление знаниями, инженерия онтологий, управление онтологиями, управление контекстом, социоконфигурационные системы.

Эл. адрес: tatiana.levashova@iias.spb.su

**МАЛЬЦЕВ**  
Георгий  
Николаевич



Профессор кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского.

В 1980 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиотехнические системы комплексов».

В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 300 научных публикаций и 27 патентов на изобретения.

Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах и др.

Эл. адрес: georgy\_maltsev@mail.ru

**ПИЦИК**  
Елена  
Николаевна



Младший научный сотрудник лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Университета Иннополис.

В 2017 году окончила Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Программная инженерия».

Область научных интересов — машинное обучение, искусственные нейронные сети, интерфейс мозг-компьютер, анализ ЭЭГ, постинсультная реабилитация, нелинейная динамика.

Эл. адрес: e.pitsik@innopolis.ru



**ПОЛЯХОВ  
Дмитрий  
Николаевич**



Доцент кафедры автоматов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

В 2000 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматизация и управление».

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 11 научных публикаций.

Область научных интересов — теория автоматического управления, экспертные системы и искусственный интеллект.

Эл. адрес: polakhov@mail.ru

**РУННОВА  
Анастасия  
Евгеньевна**



Докторант, доцент кафедры автоматизации, управления, механики Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А., старший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Нелинейная динамика сложных систем».

В 2005 году окончила Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Физика».

В 2008 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — теория динамических систем, нейрофизиология, методы обработки данных.

Эл. адрес: anefila@gmail.com

**СЕБЕРРИ  
Дженнифер  
Рома**



Профессор, директор Центра компьютерных исследований безопасности Австралийского государственного университета Вуллонгонг (Wollongong), основатель школы криптографии Австралии, Вуллонгонг, Австралия.

В 1966 году получила степень бакалавра в университете Нового Южного Уэльса, в 1969 году — магистра естественных наук в университете Ла Троб, Австралия.

В 1971 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD).

Является автором более 450 научных публикаций и шести монографий.

Область научных интересов — дискретная математика, комбинаторика, матрицы Адамара, безопасные криптоалгоритмы, передача информации.

Эл. адрес: jennie@uow.edu.au

**СЕРГЕЕВ  
Александр  
Михайлович**



Старший преподаватель кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

Является автором 35 научных публикаций.

Область научных интересов — численные методы, теория вычислительных процессов, проектирование специализированных процессоров.

Эл. адрес: asklab@mail.ru

**СЕРГЕЕВ  
Михаил  
Борисович**



Профессор, директор Института вычислительных систем и программирования, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1980 году окончил ЛЭТИ по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций и 14 патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления и др.

Эл. адрес: mbse@mail.ru

**СИНИЦИНА  
Ольга  
Игоревна**



Аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2008 году окончила Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».

Является автором одной научной публикации.

Область научных интересов — теория динамических систем, теория матриц, вычислительные методы.

Эл. адрес: libra18@yandex.ru



**СМИРНОВ  
Александр  
Викторович**



Профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 1979 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Системы автоматического управления». В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 350 научных публикаций. Область научных интересов — концептуальное моделирование, управление знаниями, управление контекстом, конфигурирование систем, системы поддержки принятия решений, социоконвергентные системы. Эл. адрес: smir@ias.spb.su

**ТОМЧИНА  
Ольга  
Петровна**



Доцент кафедры электроэнергетики и электротехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. В 1973 году окончила математико-механический факультет Ленинградского государственного университета по специальности «Математика». В 1984 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 120 научных публикаций. Область научных интересов — управление нелинейными системами, вибрационными установками. Эл. адрес: otomchina@mail.ru

**ФРАДКОВ  
Александр  
Львович**



Заведующий лабораторией управления сложными системами Института проблем машиноведения РАН, профессор Санкт-Петербургского государственного университета и Университета ИТМО. В 1971 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета. В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 600 научных публикаций, в том числе десяти патентов и 17 монографий. Область научных интересов — нелинейное и адаптивное управление в физико-технических системах, управление колебательными и хаотическими системами, математическое моделирование и др. Эл. адрес: fradkov@mail.ru

**ТОКАРЕВА  
Ольга  
Ивановна**



Преподаватель кафедры высшей математики Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург. В 1976 году окончила Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена по специальности «Математика и программирование». Является автором 22 научных публикаций. Область научных интересов — дифференциальные уравнения. Эл. адрес: ol.tokareva@icloud.com

**ФАВОРСКАЯ  
Маргарита  
Николаевна**



Профессор, заведующая кафедрой информатики и вычислительной техники Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск. В 1980 году окончила Рыбинский авиационный технологический институт по специальности «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры». В 2011 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором около 160 научных публикаций. Область научных интересов — распознавание образов, цифровая обработка изображений, кластерный анализ, интеллектуальные технологии обработки данных и др. Эл. адрес: favorskaya@sibsau.ru

**ХИМЕНКО  
Виталий  
Иванович**



Профессор, директор департамента развития НИО ЦИТ «Петрокомета», Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники. В 1969 году окончил Куйбышевский политехнический институт по специальности «Приборные устройства». В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — статистическая радиофизика, обработка информации в системах живой и неживой природы. Эл. адрес: vih.13@yandex.ru

**ХОРЕВ**  
Владимир  
Сергеевич



Доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского, член общества IEEE.

В 2011 году окончил магистратуру Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Биомедицинская инженерия».

В 2015 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором 20 научных публикаций.

Область научных интересов — математическое моделирование, динамика систем с запаздыванием, методы нелинейной динамики для анализа экспериментальных данных.

Эл. адрес:  
khorevvs@gmail.com

**ХРАМОВ**  
Александр  
Евгеньевич



Профессор, руководитель лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Университета Иннополис, член экспертного совета ВАК РФ по физике, член экспертного совета Российского научного фонда по научным проектам.

В 1996 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского.

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — нейронаука, теория сложных сетей, вейвлет-анализ и его приложения в нелинейной динамике и нейронауке, нейроинтерфейсы.

Эл. адрес:  
a.khramov@innopolis.ru

**ШОКИН**  
Юрий  
Иванович



Академик РАН, научный руководитель Института вычислительных технологий СО РАН.

В 1966 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Математика».

В 1981 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 500 научных публикаций, в том числе 50 монографий.

Область научных интересов — информационные и вычислительные технологии для поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации сложных технических систем и объектов, мониторинга окружающей среды, предсказания последствий катастроф природного и техногенного характера.

Эл. адрес: shokin@ict.nsc.ru

**ЮРЧЕНКО**  
Андрей  
Васильевич



Первый заместитель директора Института вычислительных технологий СО РАН.

В 2002 году окончил механико-математический факультет Новосибирского государственного университета по специальности «Математик».

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором 55 научных публикаций.

Область научных интересов — информационные технологии для поддержки научных исследований, математическое моделирование в механике композиционных материалов.

Эл. адрес: yurchenko@ict.nsc.ru

## Уважаемые авторы!

**При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.**

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID всех соавторов и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисуночные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуются публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени.

**Формулы** набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используйте векторные программы: Visio (\*.vsd, \*.vsdx); Coreldraw (\*.cdr); Excel (\*.xls); Word (\*.docx); Adobe Illustrator (\*.ai); AutoCad (\*.dxf); Matlab (\*.ps, \*.pdf или экспорт в формат \*.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат \*.ai, \*.esp, \*.wmf, \*.emf, \*.svg;

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисуночных подписей и названий таблиц на русском и английском языках обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

**В редакцию предоставляются:**

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Правила для авторов».

### Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)