

№ 3<sup>+0</sup>  
2024 [73]

# ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал  
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



Развитие российской науки – шаг вперед!  
Шаг вперед – шаг к Победе!



**В НОМЕРЕ**

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

**2 Нефедов М.В.**

Проблемные вопросы разработки, эксплуатации и метрологического обеспечения реверберационных экранированных камер для проведения испытаний радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость и решения измерительных задач

**8 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Пономарев Ю.А., Панков Б.Б.**

Рациональный способ организации обзора пространства информационно-измерительных систем в условиях нехватки их временного и энергетического ресурса

**12 Лоскутов С.А., Самбуров Н.В., Потапов А.В., Глебов С.А.**

Анализ методов антенных измерений и измерительных систем для их реализации

**РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

**16 Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Кургузов В.В., Наконечный А.Б.**

Помехоустойчивость релейских радиоканалов передачи данных с некоррелированными замираниями сигналов при пространственном разнесении приёмных антенн

**21 Алаторцев А.И., Подвигин С.В., Бакмаев С.М.-К.**

Резонаторная система квантового эмиттера на основе азотной вакансии в алмазе

**25 Мазин А.В., Лоскутов С.А., Потапов А.В.**

Алгоритм формирования согласованного фильтра

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**29 Оков И.А., Устинов А.А., Грибунин В.Г., Мурашко А.А.**

Анализ направлений развития способов стеганографической аутентификации изображений в канале передачи комплексов с БЛА

**39 Добкач Л.Я.**

Проблемы формального представления комплексных средств защиты информации

**43 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Казаков Р.Р., Пономарев Ю.А.**

Методика оценки эффективности отражения ударов БПЛА ПВО в условиях информационного воздействия

**48 Квашенников В.В.**

Некоторые механизмы распознавания образов в согласованных нейронных сетях

**55 Смуров С.В., Волков Г.Г.**

О протоколах спин-фотонной запутанности в создании удаленных квантовых сетей

**65 Тихонов А.М.**

Платформа для создания распределенной инфраструктуры ложных целей как часть эшелонированной системы защиты

**72 Бутрина Е.П., Олейников В.П.**

Экспертные модели оценки вероятности реализации события

**82 Руденко Э.М., Семикина Е.В.**

Методика расчета эйлеровых и гамильтоновых маршрутов для БПЛА с помощью редукции (окончание)

**СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА**

**88 Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В.**

Перспектива физиологических исследований в биофизическом психоанализе

**99 ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ**

**Ермаков А.М., Ермакова О.Н., Руднев Д.С.**

Нанопоровое секвенирование и искусственный интеллект. Как машинное обучение получает последовательности нуклеотидов от электрических токов белковых нанопор

**103 НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ • НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ • ОТЗЫВЫ**

**Емелин Н.М.**

Подход к анализу деятельности научно-производственных комплексов наукоградов

**107 AUTHORS**

**109 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

**110 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ**

Научно-технический журнал

**ИЗВЕСТИЯ**

**Института инженерной физики**

**№3 (73) 2024**

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

**ISSN 2073-8110**

Включен в «Перечень ВАК»

по научным специальностям:

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Относится к категории К-3 (в соответствии с распределением журналов Перечня ВАК)

Главный редактор,  
председатель редакционного совета  
и редакционной коллегии

**Алексей Николаевич Царьков**

Президент АНО «Институт инженерной физики»,

заслуженный деятель науки РФ,

доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

**Геннадий Иванович Азаров**

главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИИ МО РФ»

заслуженный деятель науки РФ, заслуженный

изобретатель РФ, лауреат Государственной

премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,

доктор технических наук, профессор

**Сергей Владимирович Дворянкин**

начальник департамента Государственной

корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ,

доктор технических наук, профессор

**Николай Михайлович Емелин**

главный научный сотрудник

ФГБУ НТИМИ,

заслуженный деятель науки и техники РФСФР,

доктор технических наук, профессор

**Валерий Иванович Николаев**

научный референт ОАО «Концерн «Созвездие»,

лауреат Государственной премии СССР,

лауреат премии Правительства РФ,

доктор технических наук, профессор

**Владимир Георгиевич Редько**

заместитель руководителя

Центра оптико-нейронных технологий

НИИ системных исследований РАН,

доктор физико-математических наук

**Юрий Александрович Романенко**

старший научный сотрудник

филиала ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)

заслуженный деятель науки РФ,

доктор технических наук, профессор

**Анатолий Васильевич Тодосийчук**

главный научный сотрудник Центра научно-

информационных исследований по науке,

образованию и технологиям Института научной

информации по общественным наукам РАН, почетный

работник науки и техники РФ, доктор экономических

наук, профессор

**Игорь Анатольевич Шеремет**

заместитель директора Российского фонда

фундаментальных исследований по науке,

академик РАН, доктор технических наук, профессор

#### Редакционная коллегия

**Олег Николаевич Андрух**

почетный работник науки и техники РФ,  
кандидат технических наук, доцент

**Борис Фёдорович Безродный**

доктор технических наук, профессор

**Сергей Борисович Беркович**

почетный геодезист РФ

доктор технических наук, профессор

**Владимир Эрнестович Бородай**

лауреат Государственной премии СССР,

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник

**Игорь Александрович Бугаков**

заслуженный изобретатель РФ,

почетный работник науки и техники РФ,

доктор технических наук, профессор

**Вадим Геннадьевич Грибунин**

почетный работник науки и техники РФ,

доктор технических наук, доцент

**Сергей Григорьевич Данилюк**

доктор технических наук, профессор

**Владимир Владимирович Зеленевский**

почетный работник науки и техники РФ,

доктор технических наук, профессор

**Николай Николаевич Казаков**

член Союза писателей России

выпускающий редактор

**Олег Павлович Кузнецов**

кандидат технических наук, доцент

**Александр Ильич Куприянов**

доктор технических наук, профессор

**Анатолий Викторович Мазин**

доктор технических наук, профессор

**Алексей Сергеевич Марков**

доктор технических наук,

старший научный сотрудник

**Дмитрий Геннадьевич Митрофанов**

заслуженный изобретатель РФ,

доктор технических наук, профессор

**Роман Леонидович Мусатов**

кандидат технических наук

заместитель главного редактора

**Игорь Николаевич Оков**

доктор технических наук, профессор

**Владимир Петрович Пашинцев**

заслуженный работник высшей школы РФ,

доктор технических наук, профессор

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**

почетный работник науки и техники РФ,

доктор технических наук, доцент

**Сергей Владимирович Смулов**

почетный работник науки и техники РФ,

доктор технических наук, профессор

**Валерий Николаевич Умников**

доктор технических наук, профессор

**Владимир Анатольевич Цимбал**

заслуженный деятель науки РФ,

доктор технических наук, профессор

**Сергей Николаевич Шиманов**

почетный работник высшего профессионального

образования РФ, почетный радист РФ,

доктор технических наук, профессор



#### Сергей Владимирович Смулов

Первый Вице-президент Института —  
Главный конструктор

почётный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, профессор

#### Уважаемые коллеги!

В июне случилось важное для научного сообщества событие – городскому округу Серпухов был присвоен статус наукограда Российской Федерации. Считаю, что это наша общая заслуга: ученые городов, входящих в Большой Серпухов, доказали своим трудом, вкладом в развитие науки, промышленности, образования региона и страны, что мы достойны такого статуса и будем с гордостью его нести, достигая все новых успехов в научно-исследовательской деятельности, в подготовке научных кадров, во внедрении в жизнь наших инновационных проектов.

Уверен, что для коллектива Института инженерной физики присвоение Серпухову статуса наукограда – прекрасный стимул продолжать развитие еще более высокими темпами, еще на более высоком уровне, с еще большей производительностью. Сегодня мы можем с гордостью говорить, что Институт на высочайшем уровне проводит опытно-конструкторские, научно-исследовательские работы, направленные на повышения обороноспособности нашего государства. Строится и расширяется Технопарк в сфере высоких технологий «ТехноИнноватика»: на сегодняшний день в Технопарке ведется строительство фармацевтического кластера, который не только будет производить инновационные лекарственные препараты, но и создаст новые рабочие места для жителей Серпухова. Это вклад нашего коллектива и наших партнеров в науку, производство, в развитие города, региона, страны.

Институт инженерной физики в своем стремлении к развитию не останавливается на достигнутом, мы будем продолжать работать ради процветания наукограда Большой Серпухов, ради развития российской науки.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.22.018.8

## ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕВЕРБАЦИОННЫХ ЭКРАНИРОВАННЫХ КАМЕР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ И РЕШЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ PROBLEMATIC ISSUES OF DEVELOPMENT, OPERATION AND METROLOGICAL SUPPORT OF REVERBERATION CHAMBERS FOR TESTING RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND SOLVING MEASUREMENT PROBLEMS

**Михаил Вадимович Нефедов**

*кандидат технических наук*

заместитель директора по науке

АО «ГЦМО ЭМС»

Адрес: 109316, Москва, Волгоградский проспект,

д. 42, к. 24

E-mail: m.nefedov@scemc.ru

### Аннотация

На основании практического опыта разработки реверберационных экранированных камер рассмотрены основные направления развития методических, нормативных, физических и технических аспектов производства и эксплуатации реверберационных экранированных камер для проведения испытаний радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость в Российской Федерации.

**Ключевые слова:** испытания, испытательное оборудование, реверберационная экранированная камера, напряженность электрического поля, электромагнитная совместимость, радиоэлектронные средства.

### Summary

Based on practical experience in the development of reverberation chambers, the main directions of progress of methodological, regulatory, physical and technical aspects of the production and operation of reverberation chambers for testing radio-electronic equipment for electromagnetic compatibility in the Russian Federation are considered.

**Keywords:** tests, test equipment, reverberation chamber, electric field tension, electromagnetic compatibility, radio-electronic equipment.

В настоящее время одним из основных технически и методически сложных моментов при проведении испытаний на электромагнитную совместимость (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения является воспроизведение в т.н. «рабочей зоне» – месте, где размещается испытуемое РЭС, электромагнитного поля большой напряженности в широком диапазоне частот.

Зачастую для решения этой задачи используют различные полеобразующие системы, состоящие из антенных систем различного частотного диапазона, а также ГТЕМ- и ТЕМ-камер, четырехпроводных линий, экранированных ячеек и т.д.

При этом одним из наиболее значимых частотных диапазонов при подобных испытаниях является диапазон частот от 100 МГц до 18 ГГц. Для воспроизведения электрического поля требуемой напряженности в данном частотном диапазоне, как правило, применяют набор широкополосных антенн с максимальным коэффициентом усиления в сочетании с набором усилителей мощности. В то же время стоимость усилителей для воспроизведения напряженности электрического поля (НЭП) с помощью излучающей антенны в экранированном помещении при проведении испытаний в соответствии с некоторыми стандартами [1], может значительно пре-

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

вышать суммарную стоимость всего остального оборудования.

В общем же, данный подход характеризуется ограниченным динамическим и частотным диапазоном воспроизведения единицы НЭП, небольшой рабочей зоной и габаритами испытуемых РЭС, высокой стоимостью модернизации или улучшения характеристик испытательного оборудования (ИО) для расширения круга выполняемых задач.

Альтернативой данным ИО является использование реверберационных экранированных камер (РЭК) – экранированных камер, внутри которых, с помощью вращающегося рассеивателя электромагнитных волн – тюнера (смесителя), воспроизводится равномерное электрическое поле большой напряженности в рабочем объеме РЭК.

Основными достоинствами этого подхода является возможность воспроизведения равномерного электрического поля с напряженностью от долей единиц до тысяч В/м в рабочей зоне камеры, в широком диапазоне частот, при небольших подводимых мощностях. Так, например, в *таблице 1* приведено сравнение мощности, подводимой к излучающей антенне, для воспроизведения требуемых значений НЭП при испытаниях в экранированной камере, на измерительном расстоянии 1 м и внутри рабочей зоны реверберационной камеры РЕВЕР 1000 (0,5 м x 0,5 м x 0,5 м).

Как видно из *таблицы 1*, при воспроизведении одинаковой НЭП применение РЭК дает очевидный выигрыш по сравнению с «классическими» методами в номинале применяемых усилителей. При этом подобное соотношение соблюдается практически во всем частотном диапазоне функционирования РЭК, который в случае РЕВЕР 1000 составляет от 1 до 18 ГГц.

В то же время публикации по теме РЭК в отечественной литературе в основном сфокусированы на теоретических аспектах создания и функционирования РЭК [2]. Поскольку, в

силу относительной новизны этого типа ИО в РФ, в настоящее время ими оснащены всего несколько предприятий, что значительно усложняет процесс сбора, систематизации и анализа результатов применения РЭК при испытаниях РЭС. При этом практически все эксплуатируемые в настоящее РЭК произведены за рубежом. В силу этого существуют пробелы в теоретических, нормативных и методических аспектах, что приводит к трудностям в технической реализации и последующем применении РЭК при испытаниях.

Поэтому существует необходимость в проведении комплекса работ по систематизации и анализу накопленного практического опыта создания РЭК с целью совершенствования теоретических, методических и практических подходов к созданию и эксплуатации РЭК в РФ.

В качестве материала для исследования использовался опыт создания и эксплуатации созданных в АО «ГЦМО ЭМС» [3] реверберационных экранированных камер следующих типов: РЕВЕР 200 (*рисунок 1*), РЕВЕР 400 и РЕВЕР 1000, разработанных в ходе опытно-конструкторской работы (ОКР), целью которой стало создание полноценных РЭК для испытаний РЭС на электромагнитную совместимость в автоматизированном режиме.

Они эксплуатируются в диапазоне частот от 200 МГц (РЕВЕР 200) до 18 ГГц и позволяют проводить испытания РЭС в соответствии с требованиями [1].

Указанные РЭК были созданы и прошли предварительные испытания в 2021-2022 гг. При этом, в процессе создания, проведения испытаний и последующей эксплуатации возник ряд проблемных вопросов, которые условно можно разделить на следующие, взаимосвязанные друг с другом группы:

- методические;
- нормативные;
- физические;
- технические.

**Таблица 1**

Сравнение зависимостей воспроизводимой НЭП от подводимой мощности на частоте 2 ГГц

Требуемая НЭП, В/м	Подводимая мощность, Вт	
	Антенна с КУ=23 дБ на расстоянии 1 м	РЕВЕР 1000
100	1,7	0,3
200	6,7	1
400	27	3
800	107	10
1600	428	32
3200	1711	100
6400	6845	320

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

К **методическим вопросам** относятся проблемы существующей методической базы для определения характеристик эксплуатируемых и вновь создаваемых РЭК, а также проведения с их помощью испытаний РЭС.

В настоящее время методики калибровки для подтверждения характеристик РЭК и методики проведения испытаний образцов РЭС различного назначения с применением РЭК описаны в большом перечне нормативных документов, таких как:

- КТ-160;
- MIL – 461G;
- IEC 61000-4-21;
- SAE J 1113/27;

- MIL-STD-1377 и другие.

При этом, как показано в *таблице 2*, перечень характеристик и методы их подтверждения и расчета часто отличаются друг от друга в различных нормативно-технических документах (НТД).

Как следует из *таблицы 2* по целому ряду характеристик, параметров и свойств РЭК наблюдается количественное и качественное различие, что приводит как к неоднозначности технических подходов, выбираемых при конструировании РЭК, так и к предъявлению разных требований к валидации результатов испытаний образцов РЭС с применением РЭК.

Для примера можно привести разное коли-



**Рис. 1А.** Общий вид камеры РЕВЕР 200



**Рис. 1Б.** Общий вид рабочей зоны камеры РЕВЕР 200

**Таблица 2**

Сравнение характеристик, свойств и параметров РЭК, приведенных в различных НТД

Характеристика, свойство, параметр РЭК	Документ 1	Документ 2
	Значение	Значение
Расстояние между границами рабочей зоны и поверхностями РЭК	MIL – 461G	КТ-160
	$\frac{\lambda}{5}$	$\frac{\lambda}{4}$
Количество пространственных точек для определения неоднородности НЭП в рабочей зоне РЭК	IEC 61000-4-21	КТ-160
	9	8
Подтверждаемые характеристики РЭК при калибровке	MIL – 461G	КТ-160
	- Принимаемая мощность; - Коэффициент калибровки РЭК.	- Нагрузочная способность; - Неоднородность НЭП в рабочей зоне РЭК; - Принимаемая мощность; - Коэффициент калибровки РЭК.
Расчёт минимального количества типов волн (N)	MIL – 461G	IEC 61000-4-21
	$\frac{8\pi}{3} \cdot V \cdot \frac{f^3}{c^3}$	$\frac{8\pi}{3} \cdot V \cdot \frac{f^3}{c^3} - (д + ш + в) \cdot \frac{f}{c} + \frac{1}{2}$

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

чество характеристик РЭК, определяемых при её калибровке согласно КТ-160 и MIL-461G, а также разное число пространственных точек для определения неоднородности воспроизводимой НЭП в рабочей зоне РЭК, согласно КТ-160 и ИЕС 61000-4-21. С одной стороны, уменьшение количества определяемых характеристик ощутимо снижает трудозатратность калибровки РЭК перед проведением испытаний, с другой стороны, становится непонятной степень достоверности получаемых результатов испытаний РЭС при отсутствии сведений о таких важных характеристиках РЭК как неоднородность поля в рабочей зоне РЭК.

В качестве другого примера, существенно влияющего на результаты испытаний, можно привести минимальное число положений тюнера при испытаниях РЭС. В некоторых отечественных нормативных документах определено, что регистрация изотропной НЭП при вращении тюнера во время калибровки и испытаний, должна происходить в минимальном количестве пространственных точек, которое зависит от частоты. Так для частоты выше 600 МГц минимальное количество пространственных точек должно быть принято равным 12.

Однако, практика показывает, что такое число недостаточно для корректного отображения, воспроизводимого в РЭК поля, воздействующего на испытываемое РЭС.

На *рисунке 2* показаны результаты воспроизведения НЭП в РЭК РЕВЕР 1000 при 12 и 60 положениях тюнера на частоте 6 ГГц.

Как видно из *рисунка 4*, положение и величина максимума изотропной НЭП, воспроизводимой при 12 положениях тюнера определяется

некорректно, что приводит к тому, что в реальности становится неизвестна максимальная величина НЭП, воздействующая на испытываемое устройство в процессе калибровки и испытаний.

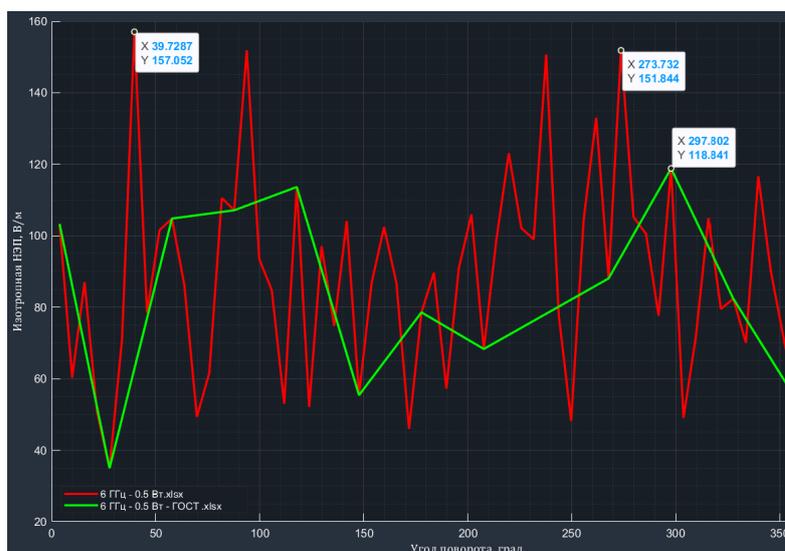
Таким образом, для корректного проведения испытаний образцов РЭС в РЭК, необходима единая методическая база для предъявления требований к качеству создаваемых РЭК, а также в процессе их эксплуатации.

К **нормативным вопросам** относятся проблемы законодательной базы при проведении аттестации РЭК в качестве испытательного оборудования. Поскольку первые отечественные образцы РЭК только начинают становиться доступными широкому потребителю, в настоящий момент не сформирован единый подход к оформлению программы и методик аттестации РЭК и проведению самой аттестации, который бы учитывал всю специфику данного типа ИО.

Также к данной группе проблемных вопросов можно условно отнести часть вопросов метрологического обеспечения, касающиеся СИ, используемых при создании и эксплуатации РЭК.

Так, например, важной проблемой является отсутствие в настоящее время в перечне средств измерений утвержденного типа современных измерителей напряженности электромагнитного поля (ИНП), которые являются одними из главных СИ в составе РЭК, с пределом измеряемой НЭП более 1500 В/м.

Что касается **«физических» вопросов** разработки и эксплуатации РЭК, то к ним относятся различные физические эффекты и свойства, определяющие направления дальнейшего улучшения характеристик РЭК для повышения



**Рис. 2.** Сравнение результатов определения максимума воспроизводимой НЭП при регистрации в 60 (красная линия) и 12 (зеленая линия) точках поворота тюнера на частоте 6 ГГц

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

эффективности испытаний РЭС на ЭМС. Данная группа вопросов сейчас является наиболее многочисленной, ввиду того, что теоретические разработки и модели, связанные с РЭК, редко получают практическое воплощение.

К таким вопросам относятся:

- оптимальная форма и количество смесителей (тюнеров);
- геометрическая форма РЭК;
- время калибровки;
- нагрузочная способность;
- влияние типа внутреннего покрытия;
- неоднозначность определения максимумов НЭП в рабочей зоне РЭК при различных углах поворота тюнера.

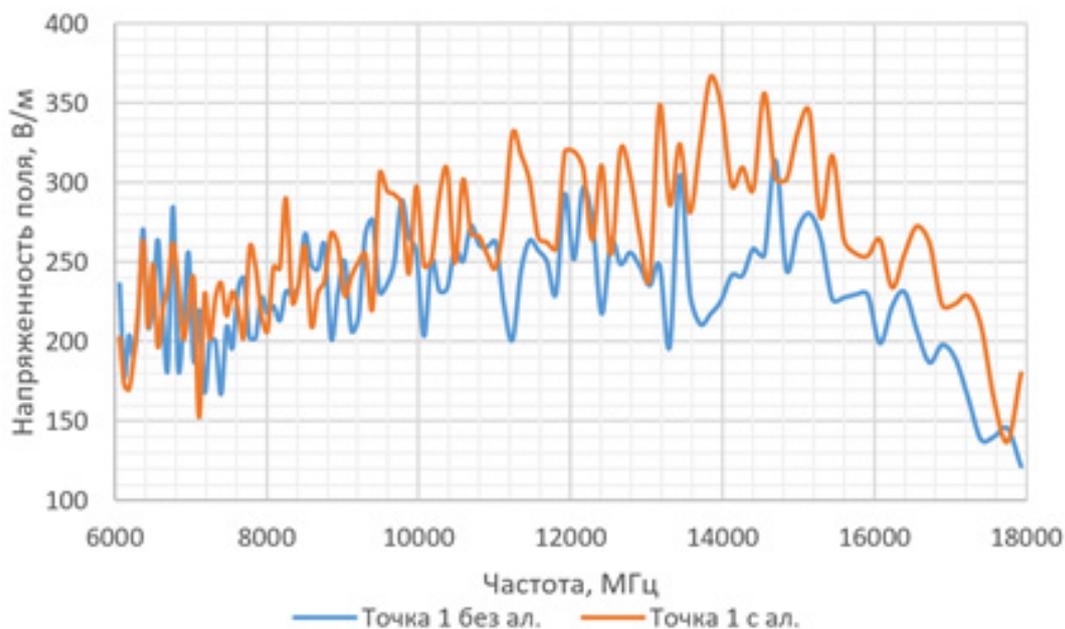
Так, например, в отечественных публика-

ях по тематике РЭК вопрос выбора внутреннего покрытия при разработке камеры никак не рассматривается. Между тем, проведенные при изготовлении РЕВЕР 1000 исследования показали, что изменение внутренней отделки камеры существенно влияет на характеристики РЭК.

На *рисунке 3* приведены результаты измерений изотропной НЭП в РЕВЕР 1000 в диапазоне частот от 6 до 18 ГГц центре рабочей зоны камеры без внутреннего покрытия стен и после покрытия стен камеры алюминием.

Как видно из графиков на *рисунке 5*, покрытие внутреннего объема камеры алюминием позволяет в ряде частотных точек увеличить величину воспроизводимой изотропной НЭП.

Другим примером может служить эффект не-



**Рис. 3.** Сравнение воспроизводимой НЭП в центре рабочей зоны РЭК РЕВЕР 1000 без внутреннего покрытия стен и с покрытием стен алюминием



**Рис. 4.** Результаты определения максимума изотропной НЭП в РЭК РЕВЕР 1000 при нескольких полных поворотах тюнера на частоте 1200 МГц

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

однозначности определения максимума воспроизводимой НЭП ввиду симметричной картины поля при полном повороте тюнера (*рисунки 2 и 4*).

Так на *рисунке 4* показано распределение воспроизводимой в РЕВЕР 1000 изотропной РЭК на частоте 1200 МГц, в зависимости от угла поворота тюнера, при нескольких его полных оборотах.

Как видно из графиков на *рисунках 2 и 4*, абсолютная разница между максимумами воспроизводимой НЭП при половине оборота тюнера, как правило, меньше погрешности измерения НЭП с помощью ИНП. Это приводит к трудностям при установке требуемой напряженности поля при проведении испытаний, поскольку может привести к неоднозначности выбора требуемой точки установки тюнера в автоматизированном режиме.

К **техническим вопросам** относятся проблемы практической реализации РЭК, их дальнейшей эксплуатации и связанные с этим многочисленные инженерные и технические задачи, такие как:

- разработка каркаса РЭК;
- обеспечение необходимой степени экранирования РЭК;
- разработка и опробование узлов конструкции смесителей;
- выбор материала корпуса, средств измерений и испытательного оборудования (в особенности усилителей мощности и ИНП), для обеспечения требуемых характеристик РЭК;
- выбор типа сервопривода для обеспечения требуемых режимов работы смесителя;
- разработка, отладка, тестирование и поддержка специального программного обеспечения (СПО).

Опыт разработки РЭК показал, что одним из самых важных вопросов в этой группе являются вопросы, связанные с программным обеспечением.

Поскольку на СПО возлагается не только задача управления всеми средствами измерений и испытательным оборудованием, в соответствии с многочисленными методиками и сценариями проведения испытаний с помощью РЭК, но и регистрация полученной измерительной информации, её обработка, хранение и обеспечение возможности анализа полученных результатов.

В рамках проведенной ОКР по разработке РЭК было создан ряд прототипов СПО на базе нескольких наиболее распространенных языков программирования (ЯП), функционал которых в наибольшей степени подходит для реализации автоматизированного режима работы РЭК.

Затем на основе полученных результатов тестирования прототипов была проведена оценка эффективности каждого из ЯП при решении поставленной задачи с помощью известного способа экспресс-оценки функционирования открытых сложных систем [4]. Оценка проводилась на основе следующих выделенных факторов:

- время разработки;
- стоимость разработки;
- функциональность разработанного СПО;
- быстродействие разработанного СПО.

Результаты проведенной оценки показаны в *таблице 3*.

Как видно из *таблицы 3*, реализация СПО для РЭК на каждом из рассмотренных ЯП имеет ряд преимуществ и недостатков. Однако, наиболее предпочтительным выбором в данном случае являются языки MATLAB и Python.

Таким образом, в ходе проведенных исследований было выделено несколько основных групп проблемных вопросов разработки, эксплуатации и метрологического обеспечения реверберационных камер. Также были показаны примеры влияния данных вопросов на результаты проведения испытаний на ЭМС различных РЭС.

### Литература

1. КТ-160G/14G. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы). М.: НИИАО, 2015.
2. Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. Обзор исследований в области разработки и применения реверберационных камер для испытаний на электромагнитную совместимость // Системы управления, связи и безопасности, 2018. №2. С.151-190.
3. <https://www.scemc.ru>
4. Захаров Е.Н. Экспресс-оценка функционирования открытых сложных систем // Управление риском, 2004. №4. С.7-15.

**Таблица 3**

Результаты оценки эффективности различных ЯП при разработке СПО для РЭК

Показатель	Python	C++	C#	Java	MATLAB
Время разработки	Среднее	Большое	Среднее	Большое	Небольшое
Стоимость разработки	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя
Функциональность	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая
Быстродействие	Среднее	Высокое	Высокое	Среднее	Среднее

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.391

## РАЦИОНАЛЬНЫЙ СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕХВАТКИ ИХ ВРЕМЕННОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА

## A RATIONAL WAY TO ORGANIZE A SPACE OVERVIEW OF INFORMATION- MEASUREMENT SYSTEMS IN CONDITIONS OF A SHORTAGE OF THEIR TIME AND ENERGY RESOURCES

**Владимир Леонидович Захаров**

доктор военных наук, профессор  
действительный член АВН  
профессор кафедры  
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)  
Адрес: 125993, Москва,  
Волоколамское шоссе, д. 4  
Тел.: +7 (905) 566-17-94  
E-mail: varahas@yandex.ru

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**

почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, доцент  
действительный член АИИ  
профессор кафедры  
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)  
Первый Вице-президент Института  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: dv\_smr@iifmail.ru

**Юрий Александрович Пономарев**

доктор военных наук, доцент  
доцент кафедры  
ВКА им. А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (931) 104-28-96  
E-mail: xoxlov1984@bk.ru

**Борис Борисович Панков**

кандидат технических наук  
старший преподаватель кафедры  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (911) 477-77-25  
E-mail: boris.pankoff@yandex.ru

### Аннотация

**Постановка проблемы.** В современных условиях насыщения космического пространства малоразмерными космическими аппаратами и связанного с этим усложнения фоно-целевой обстановки для информационно-измерительных систем возникает необходимость принятия дополнительных мер для обеспечения заданной пропускной способности при условии сохранения точности производимых измерений.

В данной статье рассматриваются многоканальные информационно-измерительные системы, одной из ключевых особенностей которых является возможность их адаптации к складывающейся фоно-целевой обстановке за счет изменения порядка организации обзора пространства. Это позволяет использовать дополнительные источники информации, такие как вероятность распределения объектов наблюдения в зоне обзора или значение отношения сигнал/шум в текущем измерении в качестве априорной для рационального использования временного и энергетического ресурса информационно-измерительной системы.

**Ключевые слова:** энергетический потенциал, обнаружение космических объектов, информационно-измерительная система, фазированная антенная решетка, адаптивное управление.

### Summary

**Problem statement.** In modern conditions of saturation of outer space with small-sized spacecraft and the associated complication of the background environment for information and measurement systems, there is a need to take additional measures to ensure a given launch capability, provided that the accuracy of the measurements is maintained.

This article discusses multi-channel information and measurement systems, one of the key features of which is the possibility of their adaptation to the emerging phono-target stop by changing the order of organization of the space survey. This makes it possible to use additional sources of information, such as the probability of distribution of observation objects in the viewing area or the value of the signal-to-noise ratio in the current measurement as an a priori for the rational use of the time and energy resource of the information and measurement system.

**Keywords:** energetic potential, space objects detection, information-measurement system, phased array antenna, adaptive control.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## Введение

Усложнение задач, решаемых информационно-измерительными системами (ИИС) приводит к необходимости поиска способов повышения их пропускной способности, в первую очередь, за счет максимальной реализации заложенных в них технических характеристик. Добиться этого возможно за счет сокращения временных затрат на выполнение соответствующих операций, то есть в конечном итоге – по максимизации пропускной способности при одновременном обслуживании нескольких объектов [1]. В современных ИИС в качестве антенной системы используются фазированные антенные решетки (ФАР), высокая эффективность которых обеспечивается лишь в том случае, если возможности безынерционного управления лучом полностью используется соответствующим способом организации обзора пространства и эффективной системой обработки получаемых данных, согласованным уровнем энергии и длительности сигнала с параметрами цели для получения максимума полезной информации в каждом измерении с минимальной энергией, выделяемой на каждое угломестное направление. Все это предопределяет сложность обработки радиолокационной информации и управления ИИС. В современных ИИС ни способ, ни параметры режимов работы не являются фиксированными, а зависят от ранее полученной и текущей информации, что позволяет адаптироваться к сложившейся ситуации.

## Виды и источники априорной информации для ИИС

Процесс радиолокационного обнаружения космических объектов (КО) условно можно разбить на три этапа [2]:

1. Радиолокационный поиск;
2. Обнаружение отраженных сигналов на фоне шума – формирование радиолокационных отметок и оценка их координат;
3. Объединение нескольких отметок – обнаружение траекторий.

В случае организации радиолокационного поиска в зоне обзора ИИС по заранее определенному алгоритму, не предусматривающему возможности адаптации к складывающейся фоно-целевой обстановке, в большинстве случаев происходит нерациональное расходование временного ресурса работы ИИС на зондирование «пустых» угломестных направлений. В то же время антенны с ФАР позволяют оперативно реагировать на изменения целевой обстановки, которая характеризуется, например, пространственным и временным распределением КО [3].

Для того, чтобы система могла адаптироваться к внешней среде, она должна получать о ней информацию, которая называется априорной. В зависимости от способа и источников получения априорной информации, а также от этапа функционирования ИИС эту информацию можно разделить по крайней мере на три группы.

К первой группе относится информация, включающая в себя сведения о характеристиках потока КО: об их эффективной площади рассеяния, интенсивности потока, пространственном положении относительно ИИС, дальностях, скоростях и ускорениях и т.п.

Априорная информация второй группы поступает от каких-либо внешних источников. Она может содержать в себе сведения о пространственно-временном распределении КО в реальном масштабе времени и носит вероятностный характер относительно возможных координат КО в данный момент времени, так как во-первых, они измеряются средствами получения априорной информации с большими погрешностями (иначе не нужна была бы ИИС), а во-вторых, за время передачи информации возможно перемещение КО. Таким образом, такая информация не может сразу использоваться оператором, но позволяет сократить временные затраты ИИС на поиск, так как сокращает размеры зоны поиска.

Априорная информация третьей группы получается в процессе функционирования самой ИИС с использованием априорной информации первого и второго порядка. Например, если известно, что КО сосредоточены в одной области, но расстояния между отдельными КО превышают разрешающую способность ИИС, то логично после первичного обнаружения продолжить поиск в области пространства, окружающей уже обнаруженный КО. Далее, из зоны поиска на определенное время могут исключаться области, цели в которых уже обнаружены (если, например, из источников априорной информации первого или второго порядка с той или иной степенью достоверности известно, что в течение какого-то времени новые цели в эти области поступить не могут или принципиально не могут находиться). Системы, использующие для адаптации априорную информацию третьего порядка, называются «системами с самообучением» [3].

Таким образом, адаптация поиска может базироваться на комплексном использовании всех возможных видов априорной информации.

Сведения о распределении целей  $p(\omega)$  в зоне поиска  $\Omega(\omega \in \Omega)$  позволяют организовать обзор пространства таким образом, чтобы максимизировать вероятность получения истинной отметки [4]:

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

$$Q_{и} = \int p(\omega)D(\omega)d\omega, \quad (1)$$

где  $D(\omega)$  в свою очередь является функцией отношения  $q^2(\omega)$  энергии сигнала к спектральной плотности шума и вероятности ложной тревоги  $a_r(\omega)$ :

$$D(\omega) = D[q^2(\omega), a_r(\omega)] \quad (2)$$

Конкретный вид функции (2) определяется моделью отраженного сигнала и используемым алгоритмом обнаружения. В данном случае зависимости  $q^2(\omega)$  и  $a_r(\omega)$  представляют собой те поисковые усилия, которые необходимо так распределить в области поиска  $\Omega$  при заданной плотности вероятностей  $p(\omega)$   $p(\omega)$ , чтобы обеспечить максимум (1). При этом в РЛС с ФАР оказывается удобным фиксировать  $a_r(\omega)$ , а оптимизировать распределение  $q^2(\omega)$ . При постоянной мощности излучения и частоте повторения зондирующих импульсов это достигается управлением временем пребывания луча антенны в соответствующем направлении  $\omega$ . При этом выигрыш оптимального метода поиска по сравнению с поиском по жесткой программе может быть оценен на основании сравнения результатов вычислений по (1) для обоих методов.

В простейшем случае оптимизация поиска состоит в концентрации поисковых усилий и их распределении в зоне обзора  $Q$ , вероятность наличия КО в которой выше заданного уровня  $D > D_{min}$ . Необходимо найти минимальные размеры этой области, при котором достигается минимум затрат временного и энергетического ресурса ИИС при условии выполнения критерия пригодности, описанного выше [5].

При определении оптимальных размеров области поиска  $\Omega_0$  полагают, что область  $Q$

возможного распределения поисковых усилий совпадает с положительной частью оси  $\omega$  и что  $p(\omega)$  является невозрастающей функцией [6]. Это предположение является вполне приемлемым для РЛС с ФАР, которая в силу безынерционного управления лучом способна сканировать область поиска в порядке убывания величины  $p(\omega)$ . В этом случае величина  $\Omega_0$  находится решением уравнения [7]:

$$\frac{d}{d\omega_1} \ln \int_0^{\omega_1} p(\omega)d\omega = -\frac{d}{d\omega_1} \ln D(\omega_1), \quad (3)$$

а интервал  $(0, \Omega_0)$  является областью оптимального в классе равномерных распределения поисковых усилий. Это значит, что сосредоточение поисковых усилий именно в этой области обеспечивает максимальное значение вероятности  $Q_{и}$  (1). Эта вероятность уменьшается, если сосредоточить усилия в более узкой области, поскольку возрастает опасность того, что цель окажется за пределами области поиска. Она уменьшается и при увеличении области поиска по сравнению с оптимальной, поскольку вероятность обнаружения сигнала  $D(\omega)$  уменьшается с ростом  $\omega$  быстрее, чем увеличивается вероятность наличия цели в зоне поиска (рисунк 1).

Для оценки эффективности предлагаемого подхода рассмотрим ИИС, которая осуществляет поиск медленно флуктуирующей по рэлеевскому закону цели в области, состоящей из  $M_r = 60$  элементов углового разрешения, Вероятность обнаружения сигнала с относительной энергией  $q^2(\omega)$  при выборе порогового уровня, обеспечивающего значение вероятности ложных тревог на один элемент углового разрешения  $a_r$ , определяется формулой [8]:

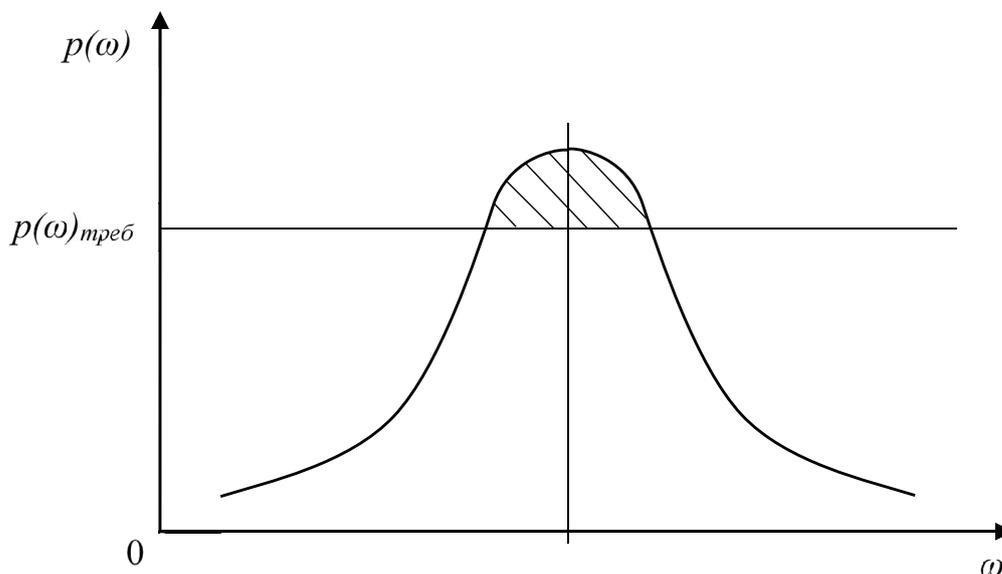


Рис. 1. Качественный характер зависимости вероятности обнаружения цели от размеров зоны поиска

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

$$D(\alpha_r, q^2) = \alpha_r \frac{1}{1+q^2(\omega)} \quad (4)$$

Для большей наглядности проиллюстрируем изложенное примером углового поиска.

Пусть максимальное значение вероятности ложной тревоги в зоне обзора  $\Omega$  составляет  $a=10^{-8}$ , полное значение отводимой на поиск энергии:

$$\mathcal{E} = \int_{\omega \in \Omega} q^2(\omega) d\omega = 600, \quad (5)$$

Априорная плотность вероятностей распределения целей в области поиска описывается экспоненциальным законом:

$$p(\omega) = 0,5 \exp(-0,5\omega) \quad (6)$$

Требуется определить энергетический временной выигрыш, даваемый оптимальным в классе равномерных распределением поисковых усилий по сравнению с последовательным поиском в секторе  $\Omega$  по жесткой программе.

Оптимальный размер области поиска  $\Omega_0$  при заданных выше условиях находится из уравнения [9]:

$$0,5 \exp(-0,5\omega_1) - \frac{1}{600 + \omega_1} - \frac{600(18,4 + \ln \omega_1)}{(600 + \omega_1)^2} = 0 \quad (7)$$

Решение этого уравнения дает  $\Omega_0 = 5,5$ . Это значит, что из полных 60 элементов углового разрешения поиск осуществляется только в 6 элементах, имеющих максимальную вероятность  $p(\omega)\Delta\Omega$  априорного пребывания целей в них. При этом полная энергия  $\mathcal{E}=600$  распределяется в них равномерно, т.е.  $q^2(\omega) = \mathcal{E}/6 = 100$ , вероятность ложных тревог на один элемент углового разрешения  $a_r = a/6 = 1,7 \cdot 10^{-9}$ . В соответствии с (4)  $D(\alpha_r, q^2) = 0,82$ , а по (1) получаем  $\Omega_H(\Omega_0) = 0,78$ .

Для того, чтобы получить такую же вероятность при поиске в секторе  $\omega \in \Omega$  без учета априорной информации при  $a_r = a/60 = 1,7 \cdot 10^{-10}$ , в соответствии с формулой (4) получим, что требуемое значение относительной энергии на один элемент углового разрешения  $q^2(\omega) = 89,5$ , а на весь сектор поиска  $\mathcal{E}(\Omega) = q^2(\omega)M_r = 5370$ . Таким образом, энергетический выигрыш данным случае равен  $5370/600 = 8,95$ .

## Заключение

Исходя из вышеизложенного очевиден следующий вывод: энергетический и временной выигрыш тем больше, чем точнее дается информация о распределении целей по сравнению с размерами пространства поиска. Дальнейшее повышение эффективности поиска возможно на основе согласования поисковых усилий с плотностью вероятностей  $p(\omega)$  и применения процедуры последовательного анализа для обнаружения сигнала в каждом положении луча. Распределение поисковых усилий в последнем случае регулируется соответствующим выбором порогов обнаружения исходя из значений  $a_r$  и  $D$  для каждого положения луча.

## Литература

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 552 с.
2. Леонов А.И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.
3. Шишов Ю.А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов. М.: Радио и связь. 1987. 144 с.
4. Шишов Ю.А. Управление диаграммой направленности радиолокационных фазированных антенных решеток // Зарубежная радиоэлектроника, 1980. №4. 256 с.
5. Ступин Д.Д. Исследование и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико-технических характеристик РЛС / Д.Д. Ступин, А.Ю. Перлов, А.В. Маврин // Известия ЮФУ. Технические науки, 2018. №3. 328 с.
6. Шишов Ю.А. Функционирование радиолокационных станций с фазированными антенными решетками / Ю.А. Шишов, В.А. Ворошилов // Зарубежная радиоэлектроника, 1982. №5. С.32-50.
7. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации. М.: Радио и связь. 1985. 216 с.
8. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
9. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1984. 312 с.



# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396.67+523.164

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ ANALYSIS OF ANTENNA MEASUREMENT METHODS AND MEASUREMENT SYSTEMS FOR THEIR IMPLEMENTATION

**Сергей Александрович Лоскутов**

*кандидат технических наук, доцент*

доцент

ФГБОУ ВО Калужский филиал

МГТУ имени Н.Э. Баумана

Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Тел.: +7 (960) 515-66-22

E-mail: sergel-75@ya.ru

**Николай Викторович Самбуров**

*начальник лаборатории СВЧ*

АО «Научно-производственное предприятие

«Калужский приборостроительный завод «Тайфун»

Адрес: 248035, г. Калуга,

Грабцевское шоссе, д. 174

Тел.: +7 (960) 518-14-06

E-mail: iuk6@bmstu.ru

**Алексей Вячеславович Потапов**

*кандидат технических наук*

доцент

ФГБОУ ВО Калужский филиал

МГТУ имени Н.Э. Баумана

Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Тел.: +7 (953) 467-02-46

E-mail: 2furius@gmail.com

**Сергей Александрович Глебов**

*кандидат технических наук*

доцент

ФГБОУ ВО Калужский филиал

МГТУ имени Н.Э. Баумана

Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Тел.: +7 (991) 328-92-01

E-mail: iuk6@bmstu.ru

### Аннотация

В статье проводится анализ методов повышения точности измерения характеристик и настройки антенных устройств, приводятся экспериментальные данные по результатам проведенных измерений. Делается вывод о применении предложенного метода и о целесообразности создания программно-аппаратного комплекса, реализующего предложенный метод.

**Ключевые слова:** амплитудно-фазовое распределение, антенное устройство, диаграмма направленности, антенный измерительный комплекс.

### Summary

The article analyzes methods for improving the accuracy of measuring the characteristics and settings of antenna devices, and provides experimental data on the results of measurements. The conclusion is made about the application of the proposed method and the expediency of creating a software and hardware complex implementing the proposed method.

**Keywords:** amplitude-phase distribution, antenna device, radiation pattern, antenna measuring complex.

В настоящее время существует множество методов антенных измерений. Их можно классифицировать по следующим категориям: для открытых полигонов; для компактных полигонов; для коллиматорных методов; для методов ближней зоны; для методов по излучению космических источников.

В данной работе рассматриваются методы измерений, реализуемые в условиях компактных полигонов. Основным достоинством антенных измерений в условиях компактных полигонов, является возможность проведение их в закрытом помещении – безэховой камере. Безэховая камера служит для проведения измерений ха-

рактеристик антенных систем в условиях полной изоляции от внешней среды, как по климатическим, так и по электрическим параметрам на сравнительно небольших территориях. Оно имеет важное значение для проведения испытаний и отработки изделий, характеристики которых должны быть скрыты от конкурентов и злоумышленников.

Практически все недостатки компактных полигонов в конечном счете, проявляются в неравномерности амплитудно-фазового распределения (АФР) облучающего электромагнитного поля, которое должно представлять собой поле плоской волны типа ТЕМ. Информация об этом

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

поле представляет собой набор дискретных значений амплитуды и фазы сигнала, то есть АФР.

При коллиматорном методе [1] уже на малом расстоянии от раскрыва коллиматора наблюдаются заметные осцилляции амплитуды и фазы поля, обусловленные дифракционными эффектами. Кроме того, облучающее поле искажают переотражения от стенок безэховой камеры и посторонних предметов, прямое излучение облучателя коллиматора в направлении испытуемой антенны и неточное расположение облучателя по отношению к фокусу коллиматора.

Возможность получения плоской волны ограничивается также ошибками изготовления отражателя коллиматора и различиями в поляризации облучающего поля и поля антенны.

Существует множество способов для повышения точности антенных измерений в условиях компактных полигонов. Часть из них связана с повышением технических и точностных параметров, составляющих полигона. Так в [2] с помощью комплексного подхода продемонстрирована возможность качественного повышения точности измерений параметров антенн. Однако для дальнейшего повышения характеристик экономически целесообразно использовать методы оперативного комплексного учёта параметров измерительной системы.

Условно все методы можно разделить на два типа: без учёта АФР и с использованием данных об АФР [3]. Большинство из этих методов недостаточно универсальны, поскольку позволяют определить погрешности измерения только определённых параметров антенного устройства (АУ), не восстанавливая саму диаграмму направленности (ДН), либо учитывают лишь

отдельные параметры компактного полигона и измерительной системы (ИС). Однако методы, использующие АФР облучающего поля более универсальны, поскольку неравномерность облучающего поля является следствием многих других источников погрешностей и тем самым объединяет их в себе.

Существуют принципиальные и технические ограничения, не позволяющие полностью устранить неоднородности облучающего поля при коллиматорном методе измерения параметров антенн. Эти неоднородности приводят к ограничению точности метода и необходимости использования больших коллиматоров. Погрешности измерения параметров антенн можно уменьшить, обрабатывая результаты измерения с учетом АФР облучающего поля в раскрыве испытуемой антенны. Для этого в состав ИС вводится планарный механический сканер.

Схема компактного полигона с системой съёма и обработки данных АФР облучающего поля приведена на рисунке 1.

### В состав предлагаемого полигона входят:

- 1) АУ – исследуемое антенное устройство;
- 2) КПУ – координатно-поворотное устройство, предназначенное для установки АУ по углу места и по азимуту;
- 3) СУКПУ – система управления КПУ;
- 4) ПМС – планарный механический сканер, предназначенный для съёма данных об АФР облучающего поля;
- 5) СУПМС – система управления ПМС;
- 6) Векторный анализатор цепей – устройство, предназначенное для съёма данных об амплитуде и фазе, а также, для подачи сигнала на облучатель;

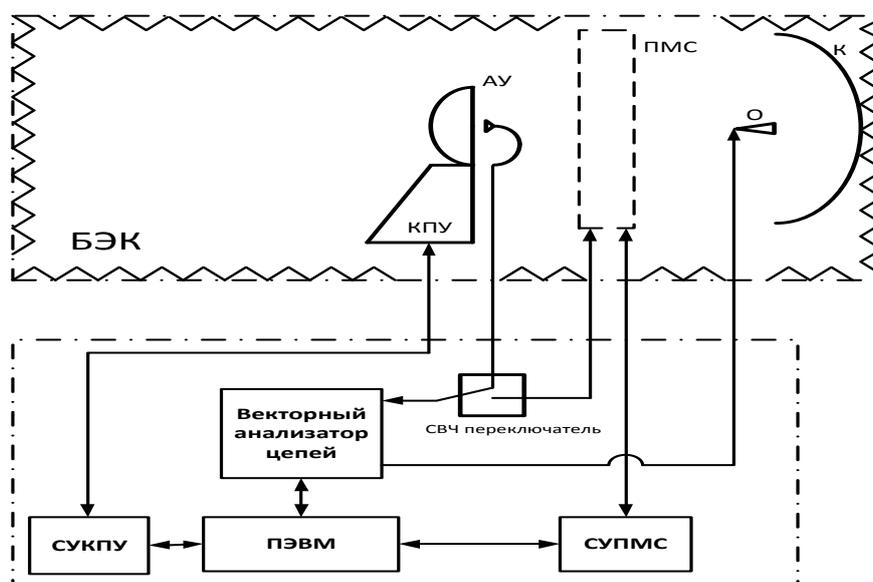


Рис. 1. Структурная схема компактного полигона с системой съёма и обработки данных АФР облучающего поля

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

7) ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина, для регистрации данных получаемых от АУ и от ПМС и управления работой СУКПУ, СУПМС;

8) К – коллиматор, коллиматорное зеркало, представляющее собой вырезку из параболической антенны;

9) О – облучатель, совместно с коллиматором предназначен для формирования поля плоской волны типа ТЕМ;

10) БЭК – безэховая экранированная камера, стены которой представляют собой радиопоглощающий материал.

Управление комплексом осуществляет ПЭВМ, которая управляет работой СУОПУ и СУПМС, а также производит обмен данными с векторным анализатором цепей. Данный анализатор принимает данные об амплитуде и фазе с исследуемого АУ и ПМС, а также формирует сигнал необходимой частоты и мощности для облучателя коллиматора.

ПМС осуществляет замеры АФР облучающего электромагнитного поля. В дальнейшем, информация об АФР используется для оценки точностных характеристик проводимых испытаний АУ, а также для корректировки результатов полученных в ходе этих испытаний.

Все полученные данные с АУ и ПМС сохраняются и обрабатываются на ПЭВМ. Специальное ПО осуществляет накопление получаемых данных в базе данных (БД) в виде массива данных значений амплитуды, фазы, угла места и азимута, что представляет собой ДН и диаграмму фазы и в виде массива значений амплитуды и фазы облучающего поля, то есть АФР.

По полученным данным производится построение ДН, диаграмм фазы и расчёт параметров АУ. Также, при использовании специальных методов и алгоритмов, на основе данных об АФР облучающего поля, в специальном программном обеспечении (СПО) производится корректировка полученных параметров исследуемого АУ и оценка погрешностей, с которыми эти параметры были получены.

Основными параметрами ИС АУ, которые влияют на точность измерений являются характеристики различных составляющих ИС влияющие на результаты измерений. До определенной степени повысить точностные характеристики ИС позволяет повышение качественных показателей, составляющих ИС. Для дальнейшего улучшения характеристик ИС необходимо использовать специальные методы и алгоритмы обработки информации об ИС и АУ.

**Основными параметрами ИС являются:**

1. Характеристики радиопоглощающего ма-

териала в БЭК;

2. Параметры облучателя коллиматора;

3. Геометрия коллиматорного зеркала;

4. Взаимное расположение антенны, облучателя и коллиматора;

5. Уровень кроссполяризации;

6. Характеристики измерительных приборов;

7. Характеристики линий связи;

8. Шаг позиционирования КПУ по углу места и азимуту;

9. Положение электрической оси исследуемой антенны (ИА).

**Соответственно основными источниками погрешностей в ИС являются:**

1. Переотражения от стенок безэховой экранированной камере (БЭК);

2. Паразитное излучение облучателя в сторону ИА и неравномерность облучения;

3. Отклонения в геометрии коллиматорного зеркала;

4. Не оптимальное расположение антенны, облучателя и коллиматора;

5. Погрешности измерительных приборов;

6. Затухание сигнала на линиях связи;

7. Кроссполяризация;

8. Неточность позиционирования КПУ;

9. Отклонения в положении электрической оси ИА.

Условно все методы можно разделить на два типа: без учёта АФР и с использованием данных об АФР [3].

**Методы измерения параметров антенн с учетом АФР:**

1. Компенсация неравномерности э/м поля в раскрыве антенны за счёт использования методов коррекции ДН на основе информации о характеристиках данного поля, уменьшение погрешностей;

2. Методика определения неравномерности амплитудного и фазового распределения поля для оценки погрешностей измерения уровня боковых лепестков (УБЛ) и КУ.

**Методы измерения параметров антенн без учета АФР:**

1. Коэффициент безэховости, как оценка уровня паразитных отражений в БЭК;

2. Метод определения УБЛ с повышенной точностью (движение эталонной/испытуемой антенны по электрической оси);

3. Модифицированный метод физической оптики для учета переотражений в БЭК;

4. Расчет оптимальных расстояний взаимного расположения ИА, коллиматора и облучателя;

5. Учет погрешности измерения характеристик за счет различия поляризации поля антенны и облучающего поля;

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

6. Учёт временных характеристик распространения волны от коллиматора и от посторонних объектов для селекции полезного сигнала и фильтрации помех, пространственная или временная селекция сигнала;

7. Использование высокоточной измерительной аппаратуры;

8. Использование линий передачи с высокими характеристиками;

9. Повышение точности позиционирования КПУ;

10. Юстировка положения электрической оси ИА.

**Выводы.** В результате, наиболее эффективные с точки зрения точностных характеристик и простоты реализации в ИС АУ, методы и алгоритмы, а также набор ТТ позволяют корректировать результаты измерения и настройки АУ,

повышая качество антенных измерений.

Комплексный подход и экспериментальные исследования продемонстрировали возможность качественного повышения точности измерения параметров антенн.

### Литература

1. Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Турчин В.И. и др. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. М.: Радио и связь, 1985. 368 с.

2. Самбуров Н.В. Юстировка электрической оси антенн на компактных антенных полигонах // Радиопромышленность, 2011. Вып. 1. С. 18-26.

3. Мазин А.В., Николаев П.В. Определение погрешностей при коллиматорном методе измерения антенных устройств на компактных антенных полигонах // Радиопромышленность, 2011. Вып. 1. С. 31-40.



ERROR

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЛЕЕВСКИХ РАДИОКАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С НЕКОРРЕЛИРОВАННЫМИ ЗАМИРАНИЯМИ СИГНАЛОВ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАЗНЕСЕНИИ ПРИЁМНЫХ АНТЕНН**  
**NOISE IMMUNITY OF RAYLEIGH RADIO DATA TRANSMISSION CHANNELS WITH UNCORRELATED SIGNAL FADING AT SPATIAL DIVERSITY OF RECEIVING ANTENNAS**

**Владимир Владимирович Зеленецкий**  
 почётный работник науки и техники РФ  
 доктор технических наук, профессор  
 профессор кафедры  
 филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
 (г. Серпухов)  
 Адрес: 142210, Московская обл.,  
 г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
 Тел.: 8 (905) 548-48-54  
 E-mail: Zelenevsky.Vladimir@gmail.com

**Юрий Владимирович Зеленецкий**  
 доктор технических наук, доцент  
 научный сотрудник  
 ВА РВСН им. Петра Великого  
 Адрес: 143900, Московская обл.,  
 г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8  
 Тел.: 8 (903) 721-12-61  
 E-mail: sys1434@mail.ru.

**Валерий Владимирович Кургузов**  
 преподаватель кафедры  
 филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)  
 Адрес: 142210, Московская обл.,  
 г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
 Тел.: 8 (915) 181-35-17  
 E-mail: valera\_arrow65@mail.ru

**Андрей Борисович Наконечный**  
 научный сотрудник  
 АНО «Институт инженерной физики»  
 Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
 Большой Ударный пер., д. 1а  
 Тел.: 8 (4967) 35-31-93

**Аннотация**

В статье представлены новые математические выражения для оценки помехоустойчивости релеевских радиоканалов передачи данных с некоррелированными замираниями сигналов при пространственном разнесении и воздействии гармонических и импульсных помех. Дан сравнительный анализ влияния гармонических и импульсных помех на вероятность битовой ошибки.

**Ключевые слова:** число ветвей разнесения,  $\chi^2$ -распределение, выходное битовое отношение сигнал/шум, отношение помеха/сигнал, база сигнала, скважность импульсной помехи, вероятность битовой ошибки, надёжность радиоканала по помехоустойчивости.

**Summary**

New mathematical expressions are presented in article for estimation of noise-immunity releevskih radio link data communication with for not correlation fadings signal under spatial carryings and influence harmonic and pulsed hindrances. Benchmark analysis of the influence harmonic and pulsed hindrances is Given on probability of the bit mistake.

**Keywords:** the number of the branches of the carryings,  $\chi^2$ - a distribution, output bit attitude signal/noise, attitude hindrance/signal, the base of the signal, attitude to duration to period pulsed hindrance, probability of the bit mistake, reliability of the radio link on noise-immunity.

Известно [1,2], что помехоустойчивость релеевских радиоканалов передачи данных можно повышать с помощью разнесенного в пространстве приёма радиосигналов несколькими антеннами. В этом случае можно обеспечить когерентный приём радиосигналов от отдельных антенн и выходное битовое отношение сигнал/шум равно

$$h_{\text{вых}}^2 = N \cdot h_e^2,$$

где  $N$  – число ветвей разнесения;  
 $h_e^2$  – битовое отношение сигнал/шум в отдельной ветви приёма.

Такой способ приёма радиосигналов можно использовать в тропосферных и декаметровых радиолиниях связи как гражданского, так и специального назначения.

Будем считать, что в различных ветвях разнесения помехи некоррелированные, а коэффици-

енты передачи полезного сигнала флуктуируют настолько медленно, что на интервале анализа их можно считать постоянными. В этом случае считают [1], что выходное отношение сигнал/шум  $h_{\text{вых}}^2$  имеет  $\chi$ -квадрат распределение

$$\omega(h_{\text{вых}}^2) = \frac{(h_g^2)^{N-1}}{(N-1)! \cdot (h_g^2)^N} \cdot e^{-\frac{h_{\text{вых}}^2}{h_g^2}} \quad (1)$$

В известных научных трудах [1,3,4] помехоустойчивость (вероятность битовой ошибки  $P_g$ ) релейских радиоканалов с некоррелированными замираниями радиосигналов определяется выражением:

$$P_g = \int_0^{\infty} \frac{r^{N-1} \cdot e^{-\frac{r}{h_g^2}}}{(N-1)! \cdot (h_g^2)^N} \cdot \int_{(r^{-1} + \frac{X}{B})^{-0.5}}^{\infty} e^{-t^2} dt dr, \quad (2)$$

где  $h_g^2$  - среднее отношение сигнал/шум на бит в индивидуальном канале приема;  
 $X$  - отношение мощностей узкополосной гармонической помехи и полезного сигнала с относительной фазовой манипуляцией;  
 $B$  - база сигнала.

В таблице 1 представлены оценки вероятности

сти  $P_g$ , полученные по выражению (2).

Анализ результатов, представленных в таблице 1, показывает:

- при отсутствии помех ( $X=0$ ) увеличение кратности разнесенного приема  $N$  вероятность битовой ошибки уменьшается (особенно это заметно при  $N=4$ , когда вероятность  $P_g < 10^{-4}$  обеспечивается для  $h_g^2 > 5,13$ ;
- при воздействии преднамеренной узкополосной помехи ( $X=1$ ) вероятность  $P_g$  сильно увеличивается и даже увеличение отношения  $h_g^2$  до  $10^3$  не позволяет её уменьшить (при  $h_g^2 > 40$  вероятность  $P_g = 0,079$ );
- увеличение кратности разноса приёмных антенн ( $N=8$ ) не улучшает помехоустойчивости (вероятность  $P_g = 0,079$ );
- увеличение базы сигнала ( $B \geq 7$ ) позволяет значительно повысить помехоустойчивость приема данных (при  $N=4$ ,  $B=31$  вероятность  $P_g = 2,687 \cdot 10^{-3}$  даже для  $x=5$ ; при  $N=8$ ,  $B=127$  вероятность  $P_g \leq 0,013$  для  $x=50$ ,  $h_g^2 \geq 10$ ).

Другими словами, воздействие преднамерен-

**Таблица 1**  
Оценки вероятности  $P_g = f(h_g^2)$  при  $N=var$

N=1 (X=0)	$h_g^2$	4	10,046	20,045	40	100	$10^3$
	$P_g$	0,0507	0,0232	0,01203	$6,317 \cdot 10^{-3}$	$2,476 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
N=2 (X=0)	$h_g^2$	4	10,046	20,045	40	100	$10^3$
	$P_g$	$8,04 \cdot 10^{-3}$	$1,586 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,87 \cdot 10^{-7}$
N=3 (X=0)	$h_g^2$	0,692	1,0	1,6406	4	10	40
	$P_g$	0,0439	0,0249	0,01	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$2,32 \cdot 10^{-6}$
N=4 (X=0)	$h_g^2$	0,692	1,047	4	5,13	10	40
	$P_g$	0,0233	0,01	$2,43 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$4,98 \cdot 10^{-8}$
N=4 (X=1; B=1)	$h_g^2$	1	4	10	40	100	$10^3$
	$P_g$	0,109	0,087	0,082	0,08	0,079	0,079
N=8 (X=1; B=1)	$h_g^2$	1	4	10	40	100	$10^3$
	$P_g$	0,093	0,082	0,08	0,079	0,079	0,079
N=3 (X=1; B=7)	$h_g^2$	1	4	10	40	100	$10^3$
	$P_g$	0,037	$4,64 \cdot 10^{-3}$	$10^{-3}$	$1,652 \cdot 10^{-4}$	$1,584 \cdot 10^{-4}$	$8,82 \cdot 10^{-4}$
N=4 (X=5; B=31)	$h_g^2$	1	4	10	40	100	248
	$P_g$	0,023	$2,687 \cdot 10^{-3}$	$7,817 \cdot 10^{-4}$	$1,809 \cdot 10^{-4}$	$4,81 \cdot 10^{-4}$	$2,032 \cdot 10^{-4}$
N=8 (X=50; B=127)	$h_g^2$	1	4	10	40	100	$10^3$
	$P_g$	0,027	0,015	0,013	0,012	0,012	0,012

ной узкополосной гармонической помехи крайне опасно и увеличение кратности разнесения не даёт положительно результата по повышению помехоустойчивости. К сожалению, это обстоятельство не нашло отражения в известных научных публикациях.

Кроме того, выражение (2) не позволяет оценить надёжность радиоканала передачи данных по помехоустойчивости, так как не содержит значений медианного отношения сигнал/шум  $h_{med}^2$ , по которому определяется требуемая мощность радиопередатчика в радиолинии с релейскими замираниями сигнала, и минимально допустимых значений отношения сигнал/шум на входе первой решающей схемы радиоприёмника  $h_{min}^2$ , по которому определяется вероятность битовой ошибки (помехоустойчивость).

В связи с этим, требуется отдельно исследовать надёжность релейских радиоканалов такого класса и оценить вклад надёжности в помехоустойчивость при наличии замираний.

Надёжность релейских радиоканалов с некоррелированными замираниями по помехоустойчивости будем определять выражением [3]:

$$P_u = \int_{h_{min}^2}^{\infty} \frac{r^{N-1} \cdot e^{-\frac{r}{h_{med}^2}}}{(N-1)! \cdot (h_{med}^2)^N} dr. \quad (3)$$

В таблице 2 представлены численные оценки надёжности  $P_u$ , как вероятности существования радиоканала передачи данных с  $N$ -кратным

пространственным разнесением для  $h_{med}^2 = const$  в зависимости от  $h_{min}^2$ .

Анализ результатов, представленных в таблице 2, позволяет сделать практические выводы:

- при отсутствии разнесения ( $N=1$ ) вероятность  $P_u \geq 0,951$  достигается только для  $h_{min}^2 = 1$ , однако в этом случае вероятность битовой ошибки (помехоустойчивость радиоканала) близка к 0,5 и радиоканал нельзя использовать для передачи данных;

- разнесённый приём ( $N \geq 2$ ) позволяет увеличить вероятность  $P_u > 0,9$  при  $h_{min}^2 \geq 10$ , что априорно повышает помехоустойчивость радиоканала;

- увеличение значения  $h_{med}^2$  (т.е. увеличение мощности радиопередатчика) значительно повышает надёжность радиоканала (при  $h_{med}^2 = 20$ ,  $N=2$ ,  $h_{min}^2 = 10$  значение  $P_u = 0,91$ , а при  $h_{med}^2 = 50$ ,  $N=2$ ,  $h_{min}^2 = 10$  значение  $P_u = 0,982$ , хотя помехоустойчивость радиоканала остаётся неизменной);

- при  $N=4$  достаточно создать  $h_{med}^2 \geq 20$  и для  $h_{min}^2 = 10$  будет обеспечиваться требуемая надёжность радиосвязи по помехоустойчивости;

- существует противоречие по определению  $h_{min}^2$  для удовлетворения требований по вероятностям  $P_s$  и  $P_u$  при  $h_{med}^2 = const$ , а именно, значение  $h_{min}^2$  следует выбирать достаточно большим для удовлетворения требований по вероятности  $P_s$  (в этом случае она будет низкой), а с другой стороны, при больших значениях  $h_{min}^2$  вероятность  $P_u$  будет уменьшаться.

**Таблица 2**

Оценки надёжности  $P_u = f(h_{min}^2)$

$h_{med}^2 = 20$	$N=1$	$h_{min}^2$	1	2,655	6,73	10	20
		$P_u$	0,951	0,876	0,714	0,607	0,368
	$N=2$	$h_{min}^2$	1	2,655	6,73	10	20
		$P_u$	0,999	0,992	0,955	0,91	0,736
	$N=4$	$h_{min}^2$	1	6,73	8,872	10	20
		$P_u$	1	1	0,999	0,998	0,981
$h_{med}^2 = 50$	$N=1$	$h_{min}^2$	1	2,655	4,7	6,73	8,872
		$P_u$	0,98	0,948	0,91	0,874	0,837
	$N=2$	$h_{min}^2$	1	2,655	2,77	8,872	10
		$P_u$	1	0,999	0,996	0,986	0,982
	$N=4$	$h_{min}^2$	2	20	30	40	50
		$P_u$	1	0,999	0,997	0,991	0,981

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Для того, чтобы оценить влияние надёжности радиоканала на помехоустойчивость, выражение для вероятности  $P_g$  с учётом некоррелированных замираний сигнала запишем в виде:

$$P_g = 1 - \int_{h_{\min}^2}^{\infty} \frac{r^{N-1} \cdot e^{-\frac{r}{h_{\text{med}}^2}}}{(N-1)! \cdot (h_{\text{med}}^2)^N} dr \left[ 1 - 0,5643 \cdot \int_{\left[ (N \cdot h_{\min}^2)^{-1} + \frac{X}{B} \right]^{-0,5}}^{\infty} e^{-t^2} dt \right]. \quad (4)$$

В таблице 3 представлены оценки вероятности  $P_g$ , полученные по выражению (4).

Анализ результатов, представленных в таблице 3, показывает:

- при  $h_{\text{med}}^2 = \text{const}$  во всех случаях существует оптимальное значение  $h_{\min}^2 = h_{\text{opt}}^2$ , при котором вероятность  $P_g$  достигает минимального значения;

- с увеличением  $N$  можно обеспечить  $P_g = \text{const}$  при меньших значениях  $h_{\text{med}}^2$  (меньшей мощности радиопередатчика);

- при  $N=8, X=50, B=127$  оценки вероятности

стей  $P_g$  в таблицах 2 и 3 практически совпадают, что свидетельствует о достоверности выкладок.

Известно [2-4], что импульсная помеха оказывает крайне опасное воздействие на помехоустойчивость радиоканалов передачи данных, использующих сигналы с ОФМ и расширением спектра по методу ПСП.

Применительно к системе радиосвязи с разнесенным приёмом и некоррелированными релеевскими замираниями сигнала в этом случае вероятность битовой ошибки будем определять по выражению:

$$P_g = 1 - \int_{h_{\min}^2}^{\infty} \frac{r^{N-1} \cdot e^{-\frac{r}{h_{\text{med}}^2}}}{(N-1)! \cdot (h_{\text{med}}^2)^N} dr \left[ 1 - 1,1286 \cdot \rho \cdot \int_{\left[ (N \cdot h_{\min}^2)^{-1} + \frac{X}{2\rho B} \right]^{-0,5}}^{\infty} e^{-t^2} dt \right], \quad (5)$$

где  $\rho$  – скважность импульсной помехи, равная  $\rho = \frac{\Delta F_{\text{ан}}}{\Delta F_c}$ ;

**Таблица 3**

Оценки вероятности  $P_g$  с учётом замираний сигнала

N=1; X=0 $h_{\text{med}}^2 = 100$	$h_{\min}^2$	1	2,83	10	20	100
	$P_g$	0,087	0,03634	0,0952	0,181	0,63
N=2; X=0 $h_{\text{med}}^2 = 100$	$h_{\min}^2$	1	1,355	3,404	10	14,86
	$P_g$	0,0228	$10^{-2}$	$6,913 \cdot 10^{-4}$	$4,68 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$
N=4; X=0 $h_{\text{med}}^2 = 50$	$h_{\min}^2$	0,373	0,824	1,74	6,03	11,3
	$P_g$	$5 \cdot 10^{-2}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$1,652 \cdot 10^{-5}$	$10^{-2}$
N=4; X=5 $h_{\text{med}}^2 = 50; B = 31$	$h_{\min}^2$	0,5	5,2	11,27	19,06	40,93
	$P_g$	0,0414	$10^{-3}$	$5,71 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$
N=4; X=5 $h_{\text{med}}^2 = 20; B = 31$	$h_{\min}^2$	1,37	4	6,08	10	16,29
	$P_g$	$10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$
N=8; X=50 $h_{\text{med}}^2 = 50; B = 127$	$h_{\min}^2$	0,5	4	10	50	100
	$P_g$	0,0389	0,015	0,01325	0,01	0,0133

**Таблица 4**

Помехоустойчивость  $P_g$  при импульсной помехе

$h_{\min}^2 = h_{\text{opt}}^2 = 6;$ $h_{\text{med}}^2 = 20;$ $N = 4; x = 5;$ $B = 31$	$\rho$	$10^{-3}$	0,0206	0,06	0,144	1
	$P_g$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,014	0,01	$3,184 \cdot 10^{-4}$
$h_{\min}^2 = h_{\text{opt}}^2 = 50;$ $h_{\text{med}}^2 = 50;$ $N = 8; x = 50;$ $B = 127$	$\rho$	$10^{-3}$	0,1	0,18664	0,552	1
	$P_g$	$10^{-3}$	0,0314	0,03385	$10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$

$\Delta F_{ин}$  – ширина частотного спектра помехи;

$\Delta F_c$  – ширина частотного спектра сигнала.

В таблице 4 представлены оценки вероятности  $P_e$ , полученные по выражению (5), отражающие влияние скважности импульсной помехи  $\rho$  на помехоустойчивость системы радиосвязи с разнесенным приёмом ( $N=4$ ,  $N=8$ ) для различных значений  $X$  и  $B$ , но при условии, что  $h_{min}^2 = h_{opt}^2$ .

Анализ таблицы 4 позволяет сделать важные выводы:

- существует оптимальная скважность импульсной помехи, при которой вероятность  $P_e$  максимальная (помеха наносит максимальный ущерб);

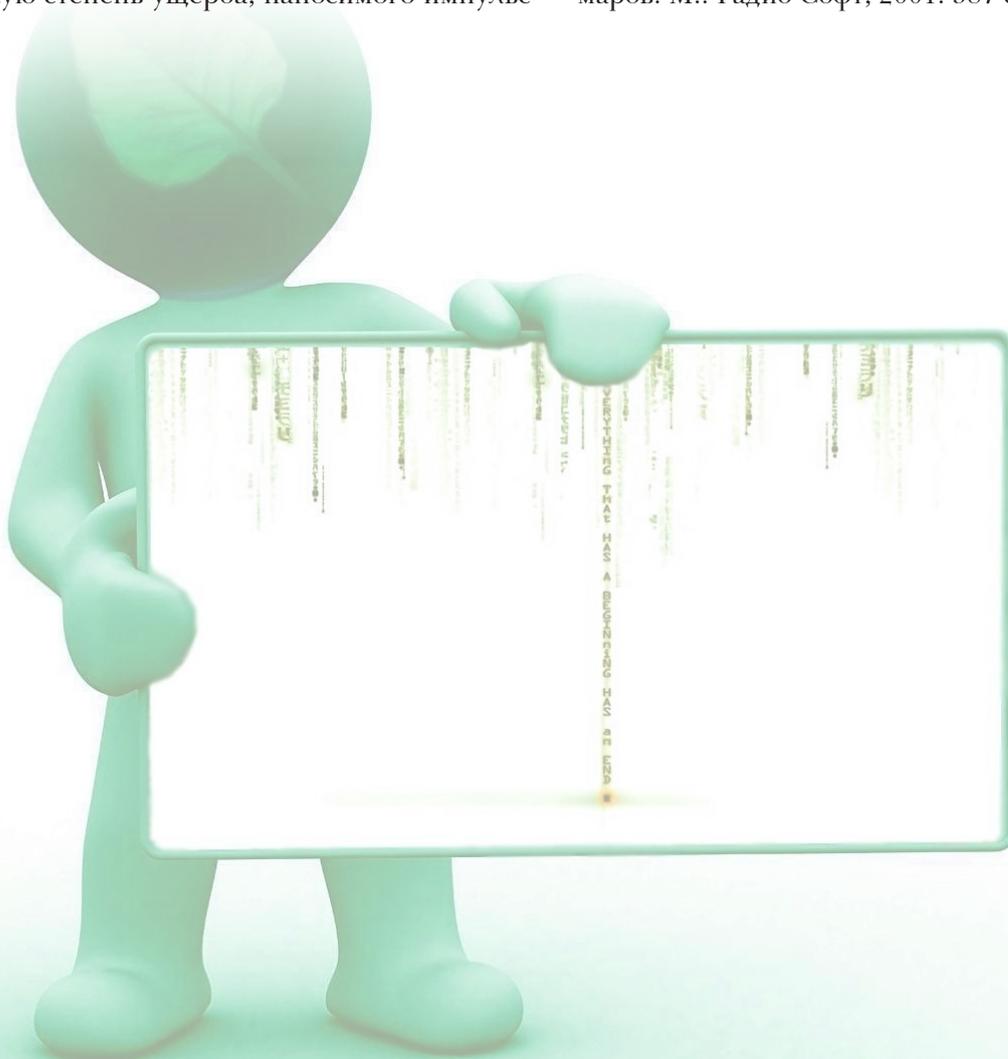
- увеличение значений  $X$  (мощности импульсной помехи по отношению к мощности сигнала) приводит к увеличению вероятности  $P_e$ , несмотря на увеличение базы сигнала и медианного отношения сигнал/шум;

- сравнение оценок вероятностей  $P_e$ , представленных в таблицах 3 и 4, показывает более высокую степень ущерба, наносимого импульс-

ной помехой по сравнению с узкополосной гармонической.

### Литература

1. Ермолаев В.Т., Флакман А.Т., Елохин А.В., Сорокин И.С. Пространственная обработка сигналов в ММО-системах сотовой связи. Уч. пособ. Нижний Новгород: НГУ, 2020. 134 с.
2. Кловский А.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
3. Зеленецкий В.В., Зеленецкий Ю.В., Егоров В.В., Наконечный А.Б. Методика оценки помехоустойчивости радиоканала с кодовым уплотнением данных и расширенным спектром при воздействии импульсной помехи // Известия Института инженерной физики, 2022. №4(66). С.28-34.
4. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с прямым расширением спектра сигналов по методу псевдослучайной последовательности / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимаров. М.: Радио Софт, 2001. 387 с.



УДК530.145+539.184+654.026

## РЕЗОНАТОРНАЯ СИСТЕМА КВАНТОВОГО ЭМИТТЕРА НА ОСНОВЕ АЗОТНОЙ ВАКАНСИИ В АЛМАЗЕ RESONATOR SYSTEM OF A QUANTUM EMITTER BASED ON A NITROGEN VACANCY IN DIAMOND

**Алексей Игоревич Алаторцев**

*доктор технических наук*  
начальник управления системных исследований  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (903) 183-94-86  
E-mail: alexalat@yandex.ru

**Сергей Владимирович Подвигин**

*кандидат технических наук, доцент*  
начальник лаборатории  
квантовых информационных технологий  
АНО «Институт инженерной физики»  
Тел.: +7 (929) 540-24-54  
E-mail: svp.r@bk.ru

**Сабир Магомед-Кадиевич Бакмаев**

*кандидат физико-математических наук*  
ведущий научный сотрудник  
АНО «Институт инженерной физики»  
Тел.: 8 (962) 908-48-42  
E-mail: sabir20021@yandex.ru

### Аннотация

В статье рассматривается схема резонаторного квантового эмиттера, на основе азотной вакансии в алмазе. Эффект охлаждения спинового ансамбля с помощью резонансной СВЧ моды диэлектрического резонатора, совместно с оптическим охлаждением, позволяет снизить тепловые флуктуации спинов и диссипацию квантовых состояний при комнатной температуре, что дает возможность увеличить в дальнейшем эмиссию детектируемых фотонов. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными по спиновому охлаждению, применительно к азотной вакансии в алмазе, демонстрирует эффект эквивалентный снижению окружающей температуры до 116 К. Предлагаемая резонаторная схема является перспективной для будущей реализации в квантовых сетях.

**Ключевые слова:** NV-центр, азотная вакансия, квантовый эмиттер, резонатор, квантовое состояние, спин, люминесценция.

### Summary

In this article we consider resonator quantum emitter model based on the nitrogen-vacancy center in diamond crystal. The cooling effect a spin ensemble makes possible to reduce thermal fluctuations of spin and dissipation of quantum states at room temperature. Proposal architecture should realize quantum information networks in future. This phenomenon makes possible to further increase the signal photon emission. Comparison of numerical simulation with experimental data demonstrates effect equivalent reducing the ambient temperature to 116 K. Proposal architecture should realize quantum information networks in future.

**Keywords:** NV-center, nitrogen vacancy, quantum emitter, resonator, quantum state, spin, luminescence.

Активно исследуемая в настоящее время азотная вакансия в алмазе является хорошим кандидатом для практического использования в перспективных системах связи на основе квантовых технологий. Одной из главных проблем реализации перспективных систем на основе азотной вакансии – квантовые сети, квантовые процессоры и сенсоры, функционирующие при комнатных температурах, является относительно малые значения полезного сигнала в излучаемом спектре. Также на квантовые состояния

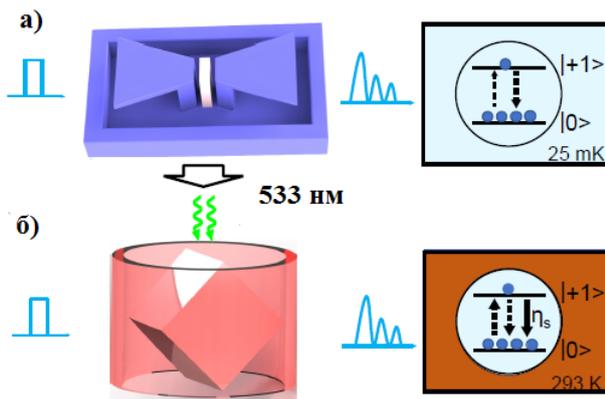
системы на основе азотной вакансии оказывают влияние множество факторов, таких как: тепловые флуктуации ионов окружающих азотную вакансию, воздействие электрических полей, вызванных внутренними механическими напряжениями внутри кристалла, воздействие магнитных полей, вызванные движением орбитальных электронов. Рассматриваемая далее азотная вакансия в алмазе (далее NV-центр) излучает полезный сигнал в виде бесфононной линии, ширина которой не превышает нескольких

процентов от всей величины спектра. Одним из перспективных вариантов усиления сигнальных фотонов является процесс взаимодействия квантового эмиттера с электромагнитным полем резонатора, описываемый квантовой электродинамикой (далее КЭД). На сегодняшний день существуют несколько концепций резонаторного стимулирования сигнальных фотонов. К ним относятся: двухуровневая схема Джейнса-Каммингса и схема Фабри-Перро с использованием плоско-вогнутых, обращенных друг к другу зеркал. Достоинство модели Джейнса-Каммингса является в первую очередь сравнительно простой способ ее практической реализации. Для реализации модели Фабри-Перро требуется прецизионное расположение плоско-вогнутых зеркал вокруг NV-центра, диаметрально обращенных друг к другу.

В простейшем случае модель Джейнса-Каммингса описывает двухуровневую систему, в которой фотоны внутри резонатора взаимодействуют с NV-центром на резонансной частоте  $\omega_{res}$ . Далее рассмотрим эту модель в общем виде.

Оператор Гамильтона, описывающий взаимодействие системы состоящей из NV-центра и окружающего его диэлектрического резонатора, состоит из трех вкладов включающих в себя компоненты, отвечающие за излучение атома, резонансную моду и взаимодействие между ними:

$$H = H_{rad} + H_{res} + H_{int} = \hbar\omega_{rad}a^+a + \hbar\omega_{res}b^+b + \hbar g\hat{E}\hat{S} = \hbar\omega_{rad}a^+a + \hbar\omega_{res}b^+b + \hbar g(a_{res} + a_{res}^+)(a_{rad} + a_{rad}^+). \quad (1)$$



**Рис. 1.** Резонаторная КЭД система со спиновым ансамблем NV-центра.

а) Демонстрация спиновых состояний NV-центра при криогенной среде. Спиновый ансамбль находится в равновесном состоянии с окружающей средой.

б) Взаимодействие диэлектрического резонатора с NV-центром.

Накачка лазерным импульсом в комбинации с модой резонатора позволяет достичь спинового охлаждения  $\eta_s$  при комнатной температуре

В данном уравнении:

$\hat{E} = (a_{res} + a_{res}^+)$  – оператор электрического поля;

$\hat{S} = (a_{rad} + a_{rad}^+)$  – поляризационный оператор;

$g$  – коэффициент взаимодействия эмитируемых фотонов;

$a^+/a$  и  $b^+/b$  – соответственно операторы рождения и аннигиляции резонаторных и эмитируемых фотонов.

Временную зависимость вклада можно представить в виде:

$$H_{int} = \hbar g(a_{res} \exp(i\omega_{res}t) + a_{res}^+ \exp(-i\omega_{res}t)) \cdot (a_{rad} \exp(i\omega_{rad}t) + a_{rad}^+ \exp(-i\omega_{rad}t)). \quad (2)$$

При условии  $g < \omega_{res}$  и медленном изменении величины  $\omega_{res} - \omega_{rad}$  по сравнению с быстро осциллирующей величиной  $\omega_{res} + \omega_{rad}$ , можно пренебречь малыми вкладами в  $H_{int}$ . В таком приближении гамильтониан Джейнса-Каммингса в Шредингеровском представлении можно записать в виде [1]:

$$H_{JC} = \hbar\omega_{res}a^+a + \hbar\omega_{rad}b^+b + \hbar g(a^+b + b^+a) \quad (3)$$

Оператор Гамильтона связывает только два состояния эмиттерного фотона: основное ( $gr$ ) и возбужденное ( $ex$ ), пока один из фотонов  $n$  или  $n+1$  фотонов находится в резонансной моде:

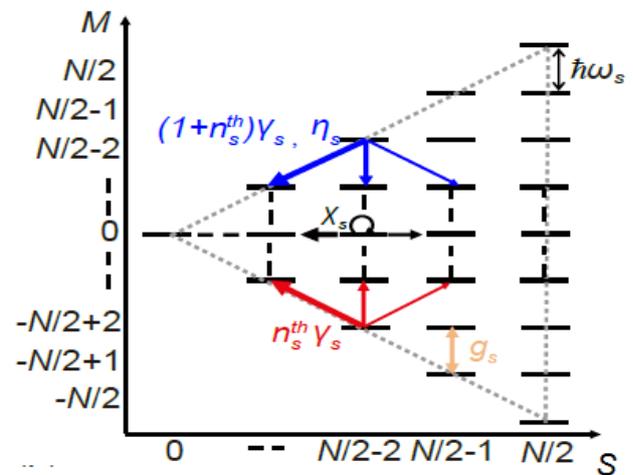
$$|gr, n+1\rangle \begin{matrix} b^+a \\ \rightleftharpoons \\ |ex, n\rangle \\ a^+b \end{matrix} \quad (4)$$

В итоге рассматриваемая двухуровневая система находится в двух основных состояниях:

$$|gr, n+1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad |ex, n\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

что дает возможность записать Гамильтониан Джейнса-Каммингса в матричной форме [3]:

$$H_{JC} = \hbar \begin{pmatrix} \omega_{rad} + n\omega_{res} & g\sqrt{n+1}e^{-\omega_{res}t} \\ g\sqrt{n+1}e^{-\omega_{res}t} & (n+1)\omega_{res} \end{pmatrix} \quad (6)$$



**Рис. 2.** Спиновый ансамбль в представлении Дике. Красные стрелки соответствуют переходам связанными с тепловыми возбуждениями. Синие стрелки соответствуют переходам стимулированным спиновым охлаждением. Черные стрелки соответствуют спинового сдвигу фаз

Уровни энергии этих состояний могут быть представлены в виде:

$$E_{\pm} = \frac{\hbar\omega_g}{2} + \omega_{res} \left( n + \frac{1}{2} \right) \pm \frac{1}{2} \hbar\Omega_n \quad (7)$$

где  $\Omega_n = \sqrt{4g^2(n+1) + \Delta^2}$  – частота Раби квантовой системы,

$\Delta = \omega_{rad} - \omega_{res}$  – расстройка частоты резонатора и фотона излучаемого атомом.

Теперь рассмотрим задачу применительно к NV-центру. Как один из предложенных вариантов – это NV-центр в диэлектрическом резонаторе цилиндрической формы (рисунки 1).

Коллективное взаимодействие ансамбля из полуцелых спинов можно описать в представлении Дике [4]. Полуцелые и целые значения  $S \leq S_0 = N/2$ , относятся к  $S(S+1)$  собственным значениям оператора коллективного спина  $\hat{S}^2$ , а число  $M$  в диапазоне  $-S < M < S$  описывает степень свободы спиновых возбуждений (рисунки 2).

На рисунке 2 обозначены квантовые переходы, вызванные тепловыми флуктуациями, приводящие к изменению величин  $S \rightarrow \pm 1, M \rightarrow 0, \pm 1$ . Через оптическую накачку лазером происходит «спиновое охлаждение», т.е. добавляется вклад  $\eta_s$  к начальному состоянию квантовой системы, что приводит ее к переходу на нижний энергетический уровень:

$$\gamma'_s = (1 + n_s^{th}) \gamma_s \quad (8)$$

где  $n_s^{th} = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega_s}{kT}} - 1}$ .

Здесь  $\hbar\omega_s$  – величина энергии соответствующая спиновому переходу, вызванного импульсом фотона частотой  $\omega_s$ ;

$T$  – абсолютная температура;  
 $k$  – постоянная Больцмана.

Основное уравнение квантового состояния,

включающее квантовые эффекты резонатора с учетом (1), примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = & -\frac{i}{\hbar} [\hat{H}_{NV} + \hat{H}_{res} + \hat{H}_s + \hat{H}_{NV-res}, \hat{\rho}] - \\ & -k_s [(1 + n_{res}^{th}) D(\hat{a}) \hat{\rho} + n_{res}^{th} D(\hat{a}) \hat{\rho}] - \\ & -\gamma_s \left[ (1 + n_{res}^{th}) \sum_j D(\hat{\sigma}_j^{12}) \hat{\rho} + n_{res}^{th} \sum_j D(\hat{\sigma}_j^{21}) \hat{\rho} \right] - \\ & -\eta_s \sum_j D(\hat{\sigma}_j^{12}) \hat{\rho} - 2\xi_s \sum_j D(\hat{\sigma}_j^{21}) \hat{\rho}, \quad (9) \end{aligned}$$

где  $\hat{\rho}$  – оператор матрицы плотности квантовых состояний спинового ансамбля;

$\hat{H}_{res} = \hbar\omega_{res} \hat{a}^+ \hat{a}$  – оператор Гамильтона, описывающий состояние резонатора с частотой  $\omega_{res}$ ;

$\hat{H}_{NV} = \hbar\omega_{NV} \sum_{k=1}^N \hat{\sigma}_k^{31} \hat{\sigma}_k^{13}$  – оператор перехода состояний между энергетическими уровнями  $|1_k\rangle, |3_k\rangle$  частотой  $\omega_{NV}$ ;

$\hat{\sigma}_k^{ij}$  – операторы проекции спина. Процесс обмена энергиями между NV-центром и СВЧ модами резонатора определяется вкладом

$$\hat{H}_{NV-res} = \hbar g_s (\hat{a}^+ \sum_j \hat{\sigma}_j^{12} + \sum_j \hat{\sigma}_j^{21} \hat{a});$$

где  $\hat{H}_s = \hbar\omega_s \sum_{j=1}^N \hat{\sigma}_j^{22}$  – спиновый гамильтониан;

$D[\hat{\sigma}] \hat{\rho} = 1/2 (\hat{\sigma}^+ \hat{\sigma} \hat{\rho} + \hat{\rho} \hat{\sigma} \hat{\sigma}^+) - \hat{\sigma} \hat{\rho} \hat{\sigma}^+$  – супероператор Линдблада. Остальные компоненты уравнения описывают тепловые процессы при взаимодействии NV-центра с СВЧ-модами резонатора [2], которые включают себя как фоновые флуктуации, так и его оптическое спиновое охлаждение.

Приближенным решением уравнения (9) методом самосогласованного поля в работе [5] получены средние значения квантовых состояний Дике:

$$\begin{aligned} M &= (\langle \hat{\sigma}_1^{22} \rangle - 1/2) \\ S &= \sqrt{\frac{3}{4} N + N(N+1) (\langle \hat{\sigma}_1^{12} \hat{\sigma}_1^{21} \rangle + \langle \hat{\sigma}_1^{22} \hat{\sigma}_2^{22} \rangle - \langle \hat{\sigma}_1^{22} \rangle + \frac{1}{4})}. \quad (10) \end{aligned}$$

В процессе лазерной накачки NV-центра импульсом 532 нм населенность спинового уровня

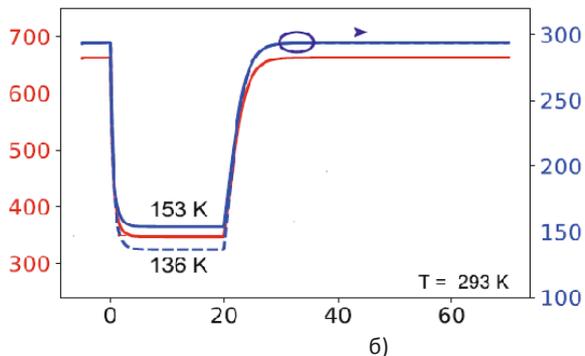
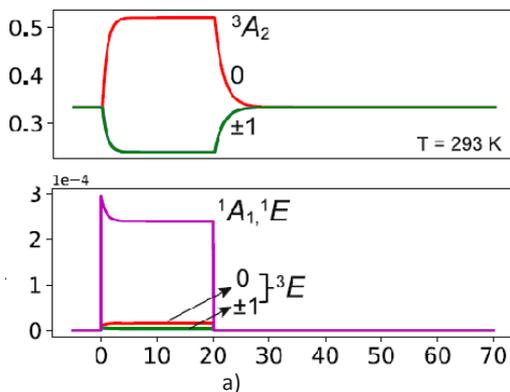


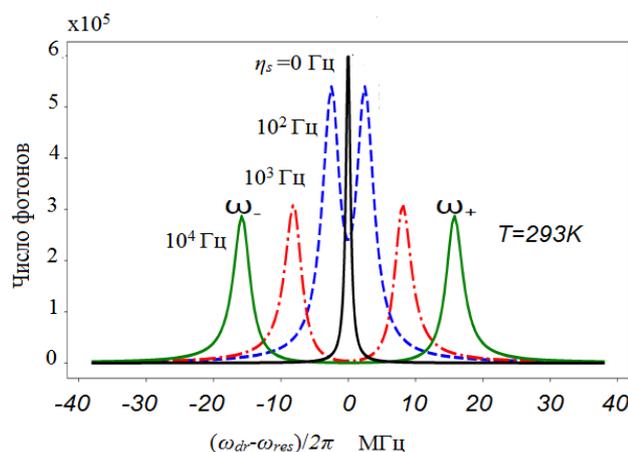
Рис. 3. Динамика охлаждения спинового ансамбля центра.

- а) Населенность спиновых уровней в основном триплетном состоянии и возбужденном синглетном состоянии.  
 б) Измеренное число фотонов внутри резонатора (красная линия) и численная оценка модели Джейнса-Каммингса (синяя линия) и соответствующая им эффективная температура

основного состояния  $s = 0$  быстро возрастает, а населенность спинового уровня  $s = \pm 1$  соответственно снижается. При этом спиновый ансамбль переходит в метастабильное синглетное состояние продолжительностью 20 мкс, после чего он постепенно возвращается в исходное состояние (рисунк 3а).

Вследствие этого эффекта число эмитируемых фотонов снижается в несколько раз, что эквивалентно охлаждению квантовой системы до температуры  $\sim 136$  К. После прекращения действия лазерного импульса, число эмитируемых фотонов возрастает до первоначальных значений (рисунк 3б). Следующий шаг это взаимодействие охлажденного спинового ансамбля с микроволновой модой резонатора. При воздействии частотой  $\omega_{dr} = 9.22$  ГГц и длительностью импульса 1 мкс наблюдалось когерентное расщепление уровней на частоте резонатора. При экспериментальной проверке численных результатов [6] было обнаружено как возрастание, так и снижение числа эмитируемых фотонов в зависимости от величин оптического  $\eta_s$  спинового охлаждения и расстройки частоты  $\omega_{dr} - \omega_{res}$  (рисунк 4). Минимальное значение эмитируемых фотонов соответствовало эквивалентной температуре охлаждения 116 К.

Таким образом, микроволновое охлаждение спинового ансамбля NV-центра в диэлектри-



**Рис. 4.** Зависимость численности фотонов как функции расстройки частоты  $(\omega_{dr} - \omega_{res})/2\pi$  при различных значениях величины спинового охлаждения  $\eta_s$

ческом резонаторе, в дополнение с оптическим охлаждением, позволит существенно нивелировать негативное воздействие тепловых фотонов и, тем самым, увеличить контрастность и эмиссию сигнальных фотонов. Представленная в работе система квантового эмиттера на основе NV-центра в алмазе может быть использована в защищенных квантовых сетях.

## Заключение

Рассмотренная в данной работе модель взаимодействия спиновых состояний NV-центра с фотонными модами СВЧ-резонатора позволяет снизить негативные воздействия ионов и полей окружающих NV-центр при комнатных температурах. Многоуровневая модель Джейнса-Каммингса описывает с удовлетворительной точностью охлаждение спинового ансамбля, включающего в себя как спин NV-центра, так и спин фотона осциллирующей моды СВЧ-резонатора. Этот эффект позволяет стимулировать люминесценцию фотонов NV-центра, что является важным для практического применения в будущих квантовых системах.

## Литература

1. E. del Valle, F.P. Laussy, C. Tejedor. Luminescence spectra of quantum dots in microcavities. II. Fermions, *Physical Review B* 79, 235326 (2009).
2. L. Greuter, S. Starosielec, A.V. Kuhlmann, R.J. Warburton. Towards high-cooperativity strong coupling of a quantum dot in a tunable microcavity, *Physical Review B* 92, 045302 (2015).
3. Y. Zhang, et.al. Microwave cooling and cavity quantum electrodynamics effects at room temperature with optically cooled nitrogen-vacancy center spins, *Nature*, 125, (2022).
4. Y. Zhang et.al. Ultranarrow superradiant lasing by dark atom-photon dressed states. *Phys. Rev. Lett.* 126(12) 123602 (2021).
5. D. Plankensteiner et.al. Quantum cumulants. Julia Framework for generalized mean-field equations in open quantum systems, arXiv: 2105.01657 (2021).
6. Y. Zhang et.al. Cavity quantum electrodynamics Effects with nitrogen vacancy center spins and microwave resonators at room temperature, *Phys. Rev. Lett.* 128, 253601 (2022).

УДК 621.396.67:523

## АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ СОГЛАСОВАННОГО ФИЛЬТРА THE ALGORITHM FOR FORMING A CONSISTENT FILTER

**Анатолий Викторович Мазин**

доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой  
ФГБОУ ВО Калужский филиал  
МГТУ имени Н.Э. Баумана  
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2  
Тел.: +7 (910) 915-58-25  
E-mail: mazinav@yandex.ru

**Сергей Александрович Лоскутов**

кандидат технических наук, доцент  
доцент  
ФГБОУ ВО Калужский филиал  
МГТУ имени Н.Э. Баумана  
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2  
Тел.: +7 (960) 515-66-22  
E-mail: sergel-75@ya.ru

**Алексей Вячеславович Потапов**

кандидат технических наук  
доцент  
ФГБОУ ВО Калужский филиал  
МГТУ имени Н.Э. Баумана  
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2  
Тел.: +7 (953) 467-02-46  
E-mail: 2furius@gmail.com

### Аннотация

В работе предложен алгоритм формирования согласованного фильтра и приведен пример синтеза согласованного фильтра в Матлаб. Приведены результаты проведения моделирования и последовательность его создания.

**Ключевые слова:** согласованный фильтр, обработка сигналов, моделирование, Матлаб.

### Summary

The paper proposes an algorithm for the formation of a matched filter and provides an example of the synthesis of a matched filter in Matlab. The results of the simulation are presented, and the sequence of creating a consistent one.

**Keywords:** matched filter, signal processing, modeling, Matlab.

Согласованный фильтр создается для квадратурного сигнала с нулевой ПЧ. При синтезе фильтра автоматически определяется его порядок, исходя из длительности сигнала и частоты дискретизации.

Результаты моделирования позволяют оценить, при каком соотношении сигнал-шум будет обеспечиваться возможность выделения сигнала, а также сложность создания согласованного фильтра при заданных ограничениях. В модели частота дискретизации и порядок фильтра выбираются из требований теоремы Котельникова для ЛЧМ сигнала, и с двух кратным запасом по сравнению с теоремой Котельникова для ФКМ [1]. Для решения этой задачи предлагается следующий алгоритм.

**Постановка задачи.** Пусть есть сигнал  $s(t)$ , конечной длительности, который может быть представлен в виде набора отсчетов  $s_i, i=1, \dots, N$ , с частотой дискретизации  $F_s$ , отвечающей усло-

виям теоремы Котельникова или взятый с некоторым запасом.

**Требуется** определить значения отсчетов импульсной характеристики цифрового фильтра, согласованного с данным сигналом.

В качестве примера рассмотрим синтез согласованного фильтра для сигнала с линейной частотной модуляцией.

**Решение.** Цифровой согласованный фильтр наиболее целесообразно синтезировать на нулевой промежуточной частоте для двух квадратурных компонент сигнала. Это позволяет использовать два АЦП, с частотой дискретизации каждого из них равной ширине спектра входного сигнала. [2]

Для анализа сигнала и синтеза фильтра требуется знать диапазон частот входного сигнала.

В простейшем случае справедливо что  $f_{\min} = 0$ ,  $f_{\max} = \Delta F$ , где  $\Delta F$  – ширина спектра сигнала. Приведенные ниже рассуждения справедливы и для

случая, когда что  $f_{\min} = f_1, f_{\max} = f_2$ , где  $\Delta F = f_2 - f_1$  – ширина спектра сигнала.

Тогда средняя частота сигнала равна  $f_0 = (f_2 + f_1)/2$ .

Зная среднюю частоту сигнала можно выполнить перенос спектра сигнала на нулевую ПЧ, как показано на *рисунке 1*.

Перенос спектра сигнала по частоте осуществляется с помощью умножения сигнала на вектора

$$v_i = \sin(2\pi f_0 t) \text{ и } v_q = \cos(2\pi f_0 t),$$

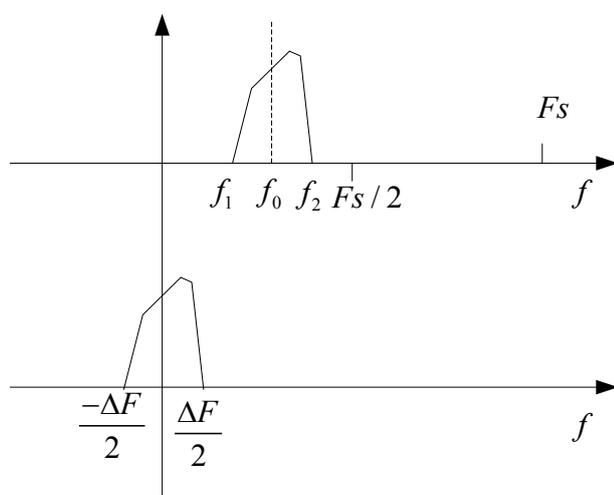
где  $t = 0, dt, 2dt, \dots, Ndt, dt = 1/Fs$ .

В результате формируется два вектора квадратур:

$$\begin{aligned} I &= s(t) \sin(2\pi f_0 t), \\ Q &= s(t) \cos(2\pi f_0 t). \end{aligned}$$

Полученные вектора содержат как сигнал на разностной частоте, так и на суммарной, поэтому требуется выполнить фильтрацию сигнала фильтром нижних частот, с полосой пропускания равной  $\Delta F$ .

Операция фильтрации может выполняться как в цифровом, так и в аналоговом виде. При цифровой фильтрации необходимо выполнить свертку отсчетов цифрового сигнала с импульс-



**Рис. 1.** Перенос спектра сигнала на нулевую ПЧ

ной характеристикой фильтра. Отсчеты импульсной характеристики формируются с помощью специальных программ синтеза цифровых фильтров по заданным параметрам, например, в средствах MATLAB. Операция дискретной свертки сигнала и импульсной характеристики вычисляется по следующей формуле:

$$out(i) = \sum_{j=0}^i y(j)h(i-j).$$

Суть операции свертки показана на *рисунке 2*.

В результате на каждом шаге фильтрации вычисляется скалярное произведение перекрывающихся областей сигнала, проходящего через фильтр, и импульсной характеристики фильтра.

Если индексы в формулах оказываются меньше нуля или больше максимального определенного значения массива, то в таком случае элемент массива с такими индексами считается равным нулю.

В результате фильтрации формируются два сигнала квадратур

$$\begin{aligned} I_1 &= s(t) \sin(2\pi f_0 t) * h_{\text{ФНЧ}}(t), \\ Q_1 &= s(t) \cos(2\pi f_0 t) * h_{\text{ФНЧ}}(t), \end{aligned}$$

где знаком \* обозначена операция свертки сигнала.

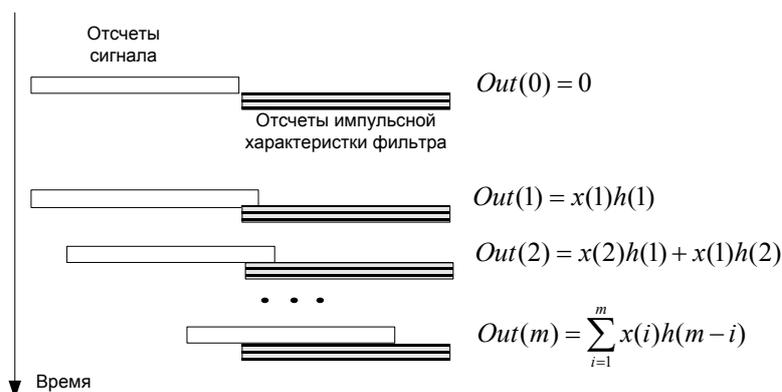
После фильтрации проводится операция децимации, то есть понижение частоты дискретизации сигнала путем прореживания отсчетов. Операция децимации позволяет не выполнять лишние вычисления.

После проведения децимации частота дискретизации для каждой из квадратур задается равной ширине полосы частот, занимаемой сигналом. Сформированные сигналы переворачиваются во времени, то есть формируются два вектора:

$$Hre(i) = I_1(N-i+1)$$

$$Him(i) = Q_1(N-i+1), i = 1, \dots, N.$$

В результате формируется комплексный вектор  $H = Hre + jHim$ , который является искомой импульсной характеристикой цифрового фильтра, согласованного с сигналом.



**Рис. 2.** Дискретная свертка сигнала

Фильтрация осуществляется так же в полосе нулевой ПЧ. Для выполнения фильтрации входной сигнал умножается на квадратурные компоненты несущей частоты, после чего выполняется свертка комплексных отсчетов входного сигнала с комплексными отсчетами импульсной характеристики согласованного фильтра [3].

Рассмотрим пример синтеза согласованной фильтрации средствами MATLAB [4]. Для этого синтезируем согласованный фильтр для ЛЧМ сигнала с шириной спектра 1 кГц и длительностью 0.5 с.

Далее жирным шрифтом показан код программы на языке MATLAB.

```
Задание переменных:
dF=1000; % Гц – Ширина спектра сигнала;
Fs=8*dF; % частота дискретизации;
f1=0; % начальная частота сигнала;
T=0.5; % длительность сигнала;
%% формирование одиночного импульса;
t=0/Fs:1/Fs:T; % вектор отсчетов времени, соответствующих сигналу;
y=sin(2*pi*(t*f1+t.*t*dF));
% вычисления отсчетов ЛЧМ импульса.
```

В результате формируется сигнал в полосе частот от 0 до 1 кГц (рисунк 3).

Для наглядности фильтрации сформируем входной сигнал с защитными интервалами перед и после импульса:

```
yp=[zeros(1,length(y)*2) y zeros(1,length(y)*2) ];
% после чего сформируем две квадратурных компоненты, умножив сигнал на синус и косинус средней частоты сигнала:
```

```
I1=y.*sin(2*pi*0.5*dF*t);
Q1=y.*cos(2*pi*0.5*dF*t).
```

Выполним фильтрацию нижних частот с помощью цифрового фильтра. Синтез фильтра осуществляется средствами MATLAB функцией **firpm** которая вычисляет коэффициенты фильтра нижних частот. В модели использовался фильтр 100 порядка, частотная характеристика

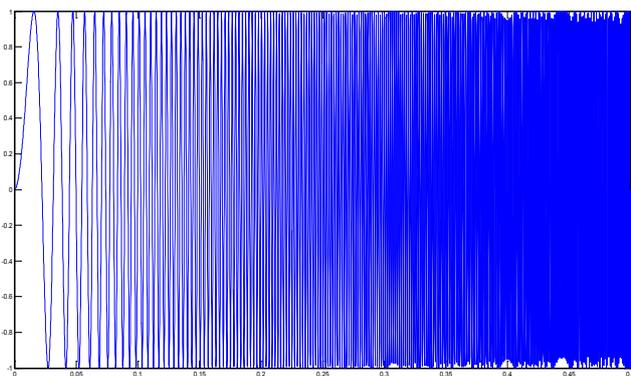


Рис. 3. Зависимость сигнала от времени

в относительном масштабе частот приведена на рисунке 4.

Импульсная характеристика фильтра нижних частот (рисунк 5):

% синтез фильтра нижних частот выполняется стандартной функцией

```
B=firpm(100,[0 dF/(Fs/2) dF/(Fs/2)+
+0.1 .5]*2,[1 1 1e-9 1e-9]);
```

Фильтрация осуществляется с помощью стандартной функции MATLAB **filter**, которая выполняет дискретную свертку входного сигнала и импульсной характеристики фильтра:

```
I1=filter(B,1,I1);
Q1=filter(B,1,Q1);
% децимации
```

В результате выполнения децимации отбрасываются лишние отсчеты, не несущие информацию. За счет этого обеспечивается понижение частоты дискретизации для значения **dF** – ширины спектра сигнала.

```
I1=resample(I1,1,Fs/dF);
Q1=resample(Q1,1,Fs/dF);
% преобразования в комплексный вид.
```

Результаты фильтрации преобразуются в комплексный вектор импульсной характеристики, который переворачивается во времени.

```
j=sqrt(-1);
H=I1+j*Q1;
H=rot90(H)';
```

Синтезированный вектор **H** – искомые коэффициенты импульсной характеристики фильтра, согласованного с входным сигналом.

Отсчеты реальной и мнимой части импульсной характеристики согласованного фильтра приведены на рисунке 6.

После синтеза фильтра можно выполнить фильтрацию входного сигнала. Для этого выполним преобразование частоты сигнала, затем

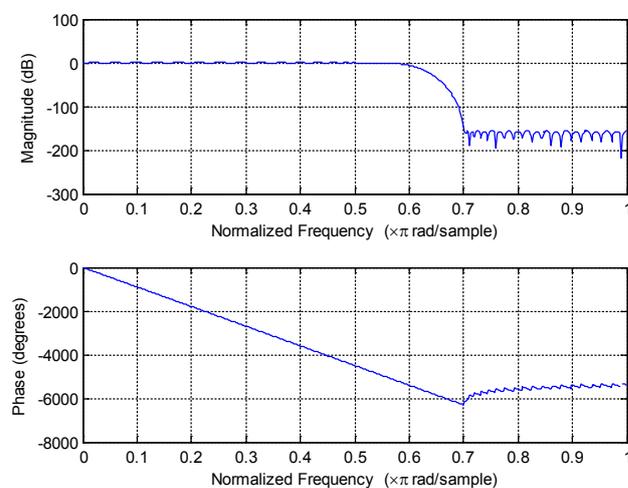


Рис. 4. Частотная характеристика фильтра относительно половины частоты дискретизации

фильтрацию нижних частот и представим результат фильтрации в виде комплексного сигнала, после чего выполним децимацию:

```

tp=(1:length(yp))/Fs;
Ip=yp.*sin(2*pi*0.5*dF*tp);
% умножение на несущую частоту
Qp=yp.*cos(2*pi*0.5*dF*tp);
% синтез ФНЧ фильтра
B=firpm(100,[0 dF/(Fs/2) dF/(Fs/2)+
+0.1 .5]*2,[1 1 1e-9 1e-9]);
% фильтрации нижних частот
Ip1=filter(B,1,Ip);
Qp1=filter(B,1,Qp);
% децимация сигнала
Ipd1=resample(Ip1,1,Fs/dF);
Qpd1=resample(Qp1,1,Fs/dF);
% преобразования в комплексный вид
j=sqrt(-1);
Skom=Ipd1+j*Qpd1;

```

Для согласованной фильтрации выполним дискретную свертку комплексного входного

сигнала с синтезированной ранее комплексной импульсной характеристикой согласованного фильтра:

```

% согласованной фильтрации
outfil=filter(H,1,Skom);
figure
plot(abs(outfil))
% полученного результата

```

Отклик согласованного фильтра приведен на рисунке 7.

**Выводы.** Показано, что в результате проведения моделирования можно оценить, при каком соотношении сигнал-шум будет обеспечиваться возможность выделения сигнала, а также последовательность создания согласованного фильтра при заданных ограничениях.

## Литература

1. Троценков А.И. Теорема Котельникова-Шеннона и практическое использование целых функций для представления сигнала на приемной стороне // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018. №1. С. 81-85.
2. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Р.М. Юсупов, Г.Б. Петухов, В.Н. Сидоров и др. Под ред. проф. Р.М. Юсупова. Министерство обороны СССР, 1984. 563 с.
3. Бердышев В.П., Гарин Е.Н., Фомин А.Н. и др. Радиолокационные системы: учеб. Под общ. ред. В.П. Бердышева. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 400 с.
4. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.

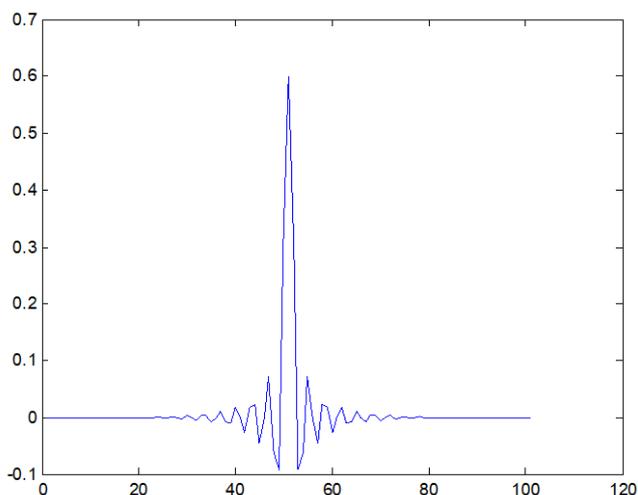


Рис. 5. Импульсная характеристика ФНЧ фильтра

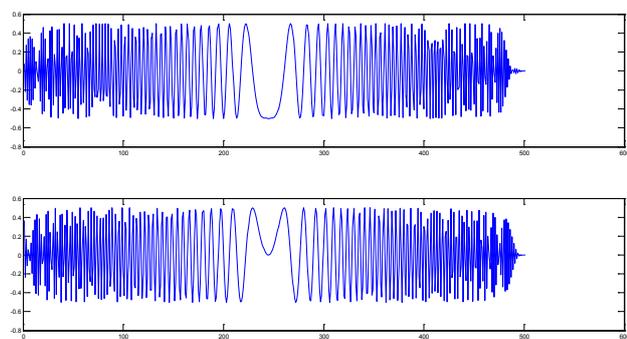


Рис. 6. Отсчеты реальной и мнимой части импульсной характеристики согласованного фильтра

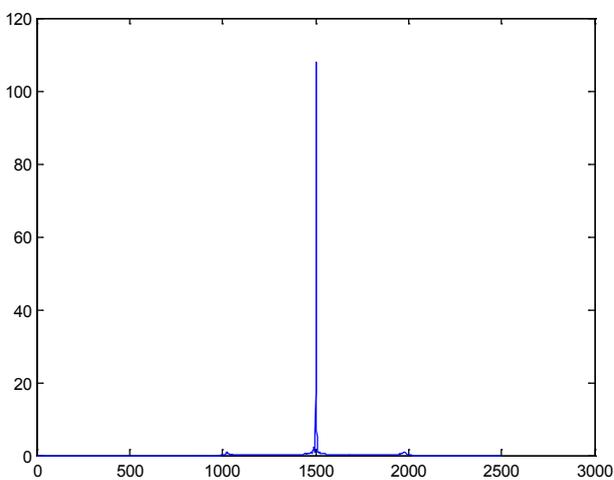


Рис. 7. Отклик согласованного фильтра

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056.5

## АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СПОСОБОВ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ КОМПЛЕКСОВ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ ANALYSIS OF DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF METHODS FOR STEGANOGRAPHIC AUTHENTICATION OF IMAGES IN TRANSMISSION CHANNELS OF COMPLEXES WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES

### Игорь Анатольевич Оков

доктор технических наук, профессор  
ведущий научный сотрудник  
филиал АО «Концерн радиостроения «Вега»  
Адрес: 197376, Санкт-Петербург,  
ул. Академика Павлова, д. 14 А  
Тел.: +7 (812) 234-76-53

### Андрей Александрович Устинов

доктор технических наук, профессор  
ведущий научный сотрудник  
ФГУП «ГосНИИИПП»  
Адрес: 191167, Санкт-Петербург,  
набережная Обводного канала, д. 29  
Тел.: +7 (812) 274-31-56

### Вадим Геннадьевич Грибунин

доктор технических наук, доцент  
главный научный сотрудник  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (4967) 35-31-93  
E-mail: wavelet2@mail.ru

### Александр Анатольевич Мурашко

кандидат технических наук  
старший научный сотрудник  
отдела сопровождения научно-конструкторских работ  
научно-методического управления  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1А, стр. 1  
Тел. +7 (4967) 35-31-93

#### Аннотация

В статье рассмотрены проблемы обеспечения безопасности видеоинформации, передаваемой по каналам связи с ошибками. Аргументированы преимущества применения стеганографических способов внедрения цифровых водяных знаков. Рассмотрены известные подходы и их недостатки. Представлены предложения о перспективном методе защиты.

**Ключевые слова:** изображение, видео, аутентификация, стеганография, цифровой водяной знак, помехоустойчивость, арифметическое кодирование, вейвлет-преобразование.

#### Summary

The article discusses the problems of ensuring the security of video information transmitted through communication channels with errors. The advantages of using steganographic methods of introducing digital watermarks are argued. The known approaches and their disadvantages are considered. Proposals on a promising method of protection are presented.

**Keywords:** image, video, authentication, steganography, digital watermark, noise immunity, arithmetic coding, wavelet transform.

Робототехнические технологии, особенно комплексы с беспилотными летательными аппаратами (БЛА), являются одной из наиболее бурно развивающейся отраслью современной науки и техники. БЛА широко используются в самых различных отраслях и решают самые разные задачи. При этом сложной задачей является одновременное обеспечение информационной безопасности и помехоустойчивости передачи данных по радиоканалам в комплексах с БЛА, в которых основная информационная нагрузка

падает на передачу электронных изображений (ЭИ), как неподвижных, так и видео последовательностей.

Определим основные задачи защиты передаваемых в каналах комплексов с БЛА изображений:

- обеспечение конфиденциальности;
- контроль подлинности и целостности передаваемых изображений;
- аутентификация источника сообщений;
- защита авторских и имущественных прав на

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

формируемые и передаваемые изображения;

- обеспечение неотказуемости от переданного сообщения источником (формирователем) изображения;

- обеспечение высокой помехоустойчивости в условиях воздействия широкого спектра случайных и преднамеренных помех;

- безопасное использование передаваемых изображений многими получателями с разными правами пользования.

Если ранее контроль подлинности изображений, передаваемых с борта БЛА, касался только безопасности информации, то при развивающихся методах навигации летательного аппарата по наблюдаемой поверхности земли и в БЛА класса FPV (First Person View), в которых оператор в режиме реального времени управляет аппаратом по изображениям с его борта, задача обеспечения контроля подлинности видеoinформации стала жизненно важной для безопасности самого летательного аппарата и окружающей его среды.

В современных комплексах с БЛА большинство перечисленных выше задач должно решаться, как правило, одновременно [1]. Особенно большие проблемы вызывает задача обеспечения подлинности передаваемых изображений при передаче по радиоканалам с высоким уровнем помех. К классическим методам контроля подлинности и авторства информации является формирование на передающей стороне имитозащищенных вставок (имитовставок или, иначе говоря, криптографических кодов аутентификации, криптографических хэш-кодов), а также электронных цифровых подписей, и их проверка на приемной стороне. Эти криптографические методы защиты подлинности являются хорошо проработанными и обеспечивают высокий уровень защищенности от навязывания нарушителем ложной информации. Однако они по своей природе обладают низкой помехоустойчивостью и при воздействии любой ошибки канала передачи приводят к отказу от принятой информации как оцениваемой неподлинной. Отказ от использования принятой информации происходит при искажении любой части заверенного изображения или в любом бите заверяющего его кода аутентификации. В частности, при использовании имитовставок в соответствии с действующим стандартом [2] устойчивая передача имитозащищенных изображений без использования дополнительных мер помехозащиты невозможна при вероятности ошибок в канале передачи  $10^{-4}$ ... $10^{-5}$  и более. Но использование мощных помехоустойчивых кодов существенно уменьшает возможную скорость передачи по ра-

диоканалу БЛА в условиях ограниченной энергии радиопередатчика на борту и требуемой большой дальности связи при типовой скорости формирования видеопотока на борту порядка единиц-десятков Мбит/с.

Для преодоления этого противоречия целесообразно учесть особенности объекта защиты подлинности и авторства: элементы изображений имеют различную информационную значимость, и их искажение (или изменение) в разной степени влияет на подлинность всего изображения, и при этом во многих случаях допустимы стирания ряда элементов изображения, не воспринимаемых зрением человека и не существенных для распознающих образы нейронных сетей, что используется в современных стандартах сжатия изображений и видео данных. Криптографические же методы защиты подлинности ориентированы на контроль подлинности избыточных данных, в которых недопустимо изменение, искажение или стирание любых элементов заверяемых данных.

Однако известны и стеганографические методы защиты подлинности, предназначенные для контроля подлинности и авторства существенно избыточных по их природе сообщений, таких как речевые и аудио сигналы, неподвижные изображения и видео. Такой класс стеганографических методов, называемый аутентифицирующими цифровыми водяными знаками (ЦВЗ), использует полухрупкие аутентификаторы, которые вычисляются из существенных для подлинности элементов изображения и встраиваются в это же изображение, не увеличивая существенно его объем. Подобные коды аутентификации называются полухрупкими, потому что они должны быть устойчивыми к непреднамеренным изменениям заверяемого объекта и в ряде случаев к изменениям самого встроенного кода аутентификации, пока эти изменения не приводят к изменению содержащейся в изображении зрительно воспринимаемой или машиночитаемой информации, но при искажении смысла изображения изменение кода аутентификации должно указать на факт недопустимых искажений верифицируемого изображения [3].

Дополнительные проблемы для обеспечения подлинности изображений, воспринимаемых системами технического зрения, возникли при появлении состязательных атак на электронные изображения [4], в которых путем небольшого изменения изображения, незаметного для зрения человека, достигается целенаправленное ошибочное решение классифицирующей нейронной сети при реализации атаки навязывания ложных машиночитаемых образов.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Отметим, что если криптографические методы защиты подлинности обеспечивают и подлинность и целостность всех частей заверенного изображения, то стеганографические методы – подлинность и целостность воспринимаемых зрением человека и системами технического зрения частей заверенного изображения: при допустимости изменения некоторых элементов изображения обеспечение целостности заверенного изображения, понимаемой как сохранение «бит в бит», не выполняется.

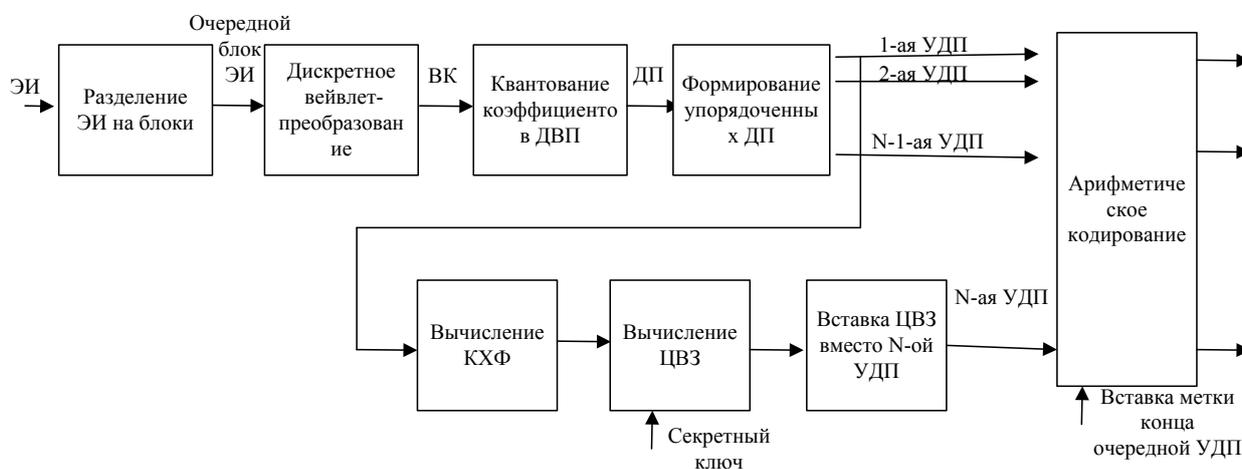
Также учтем, что криптографические коды аутентификации являются присоединенными к заверяемому изображению, что потенциально позволяет их удалить, разрушить или изменить без воздействия на само изображение. А аутентифицирующие ЦВЗ являются по сути встроенными аутентификаторами, что существенно усложняет попытки нарушителя их удалить или разрушить без изменения самого изображения. Новыми интересными возможностями стеганографических методов являются возможность независимой защиты разных фрагментов изображения и регулируемая характеристиками изображения степень защищенности подлинности его составных частей, а также определенные возможности выполнения обработки изображений законными пользователями без снятия и изменения встроенных аутентификаторов, например, операции над всем изображением или его фрагментами вида масштабирования, линейной фильтрации и т.п.

Современные алгоритмы аутентифицирующих ЦВЗ изображений разрабатываются применительно к широко распространенным технологиям сжатия неподвижных изображений и видеопоследовательностей типа JPEG, JPEG2000, H.264, H.265 и т.п., использующих дискретное косинусное преобразование (ДКП), дискретное

вейвлет-преобразование (ДВП), квантование коэффициентов ДВП (ДКП), адаптивное арифметическое кодирование (АК) квантованных частотных коэффициентов, процедуры выделения информационно важных элементов изображения и стирания малоценных элементов, не влияющих на восприятие зрением и распознавание образов нейронными сетями.

Для обеспечения высокой защищенности подлинности и авторства от атак нарушителей в методах ЦВЗ широко используются криптографические примитивы, такие как криптографические хэш-функции, алгоритмы шифрования, алгоритмы формирования и проверки имитоставок, алгоритмы формирования конфиденциальных ключей и протоколы их безопасного распределения, что позволяет им сохранить многие положительные свойства криптографических методов и при этом избавиться от некоторых их недостатков. В общем случае защищенность от навязывания ложной информации для систем аутентифицирующих ЦВЗ должна быть не ниже защищенности для криптографических систем контроля подлинности, но при этом возможно достичь более высокой помехоустойчивости передаваемой заверенной информации. Неизбежной платой за дополнительные возможности являются более высокая сложность стеганографических методов и потеря при этом универсальности метода защиты: методы аутентифицирующих ЦВЗ разрабатываются для конкретного вида защищаемой информации (речевые и акустические сигналы, изображения, видео, ...) и используемые технологии их сжатия, обработки и передачи.

Исследуем существующие подходы к построению способов стеганографической аутентификации изображений в радиоканалах передачи комплексов с БЛА.



**Рис. 1.** Структурная схема формирования аутентифицированного изображения в соответствии с патентом US7313696

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

В определенном смысле «канонический» способ аутентификации электронного изображения (ЭИ) был предложен в патенте США US7313696 [5], основные принципы которого прослеживаются в большинстве последующих технических решений. Способ заключается в том, что аутентификация осуществляется за счет формирования ЦВЗ на передающей стороне от существенных элементов изображения, его встраивания вместо наименее информативных элементов этого ЭИ, передачи заверенного изображения по каналу передачи в условиях возможного воздействия нарушителя, на приемной стороне извлечения из ЭИ принятого ЦВЗ, контрольного формирования ЦВЗ от существенных элементов принятого изображения и побитного сличения извлеченной и сформированной ЦВЗ. При их совпадении принятое изображение считается подлинным. Структурная схема формирования аутентифицированного изображения по данному способу показана на *рисунке 1*.

Предварительно на передающей стороне (борт БЛА) и приемной стороне (наземная станция управления БЛА) согласуют общий секретный ключ (СК), и договариваются о применяемых криптографической функции хэширования (КФХ) и функции шифрования. У отправителя разделяют ЭИ на  $M \geq 2$  блоков каждый размером  $n_1 \times n_2$  пикселей, над каждым очередным блоком ЭИ выполняют дискретное вейвлет-преобразование, полученные в результате преобразования вейвлет-коэффициенты (ВК) частотных областей квантуют и записывают в двоичные последовательности (ДП) вейвлет коэффициентов очередного блока ЭИ, которые преобразуют в  $N \geq 2$  упорядоченные двоичные последовательности (УДП) вейвлет-коэффициентов этого блока. Упорядочивание заключается в последовательной записи битов ДП ВК в соответствии с их ожидаемой информационной значимостью: в первую УДП последовательно записываются первые биты двоичных последовательностей вейвлет-коэффициентов и т.д. Для первых  $N-1$  упорядоченных последовательностей блока вычисляют его хэширующую последовательность (ХП) с помощью бесключевой криптографической функции хэширования. Затем хэширующую последовательность очередного блока ЭИ шифруют с помощью функции шифрования по секретному ключу СК, формируя тем самым цифровой водяной знак этого блока ЭИ. Шифрование должно обеспечивать защищенность от атак навязывания ложных изображений нарушителем, не знающего СК. Для обеспечения аутентификации очередного блока ЭИ сформированный ЦВЗ встраивают на место  $N$ -ой УДП

ВК, при этом менее значимая часть информации этого блока изображения в виде  $N$ -ой УДП ВК стирается.

Сформированные УДП ВК с встроенным ЦВЗ блока сжимают с использованием арифметического кодирования в кодированные последовательности (КП) этого блока, включающие метки конца очередной УДП, повторяя описанные действия для каждого блока аутентифицируемого изображения. Из сжатых АК кодированных последовательностей формируется цифровой поток изображения, снабженный стандартным блоком служебных данных.

По каналу связи передают заверенное ЭИ получателю, на стороне которого для проверки подлинности очередного принятого блока выполняют арифметическое декодирование, из первых  $N-1$  декодированных УДП принятого блока вычисляют его принятую хэширующую последовательность, дешифруют ее с использованием этого же СК и полученный таким образом декодированный ЦВЗ побитно сравнивают с ЦВЗ, извлеченным из  $N$ -ой декодированной УДП. При их совпадении очередной принятый блок ЭИ считают подлинным. Принятое ЭИ считают подлинным, если подлинными оказываются все принятые блоки ЭИ.

Данный способ аутентификации может быть использован в существующих технологиях сжатия и передачи визуальной информации, использующих ДВП и АК. В многопользовательском режиме при использовании стандарта JPEG2000 [6] подобный способ позволяет предоставлять пользователям с разными правами доступа разные части видеоданных или изображение с разным качеством и различными уровнями защиты. Это обеспечивается за счет возможности разделения заверяемого изображения на различное число частотных областей вейвлет-преобразования и использования для предоставления разным пользователям переменного числа  $N$  УДП ВК. В роевых технологиях применения комплексов БЛА это позволит оперативно предоставлять взаимодействующим корреспондентам текущее изображения с ограниченным разрешением (с небольшим числом  $N$  УДП ВК и не для всех частотных полос) с любого БЛА, а при возникновении реальной потребности в этих данных с высоким разрешением соответствующему корреспонденту досылаются с контролем подлинности дополнительные УДП ВК. Также оператору для управления полетом БЛА зачастую требуется получение только части наблюдаемой с борта обстановки, что позволяет повысить оперативность цикла управления и уменьшить требуемую скорость передачи данных по

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

радио каналу, а оператору оптико-электронного оборудования БЛА для детального дешифрования изображений заинтересовавших объектов возможно с некоторой задержкой передавать дополнительные данные, повышающие детальность наблюдаемой обстановки.

Однако в рассматриваемом способе аутентификации передаваемых в каналах комплексов с БЛА изображений [5] имеется и ряд недостатков.

1. Низкая помехоустойчивость при воздействии случайных или преднамеренных помех – при любой ошибке в радиоканале при передаче данных очередного блока этот блок ЭИ будет оценен как неподлинный, причем несущественно, исказился ли сам встроенный ЦВЗ или заверяемые им значения коэффициентов ДВП.

2. Бесключевые криптографические функции хэширования для обеспечения типовой допустимой вероятности необнаружения навязывания ложной информации не более  $10^{-9}$  должны иметь длину хэш-кода порядка сотен бит, что вызывает необходимость встраивать в каждый блок заверяемого изображения ЦВЗ большого размера, что заставляет увеличивать требуемую скорость передачи по радиоканалу.

3. Формирование ЦВЗ с использованием шифрования исключает возможность его последующего сжатия при арифметическом кодировании: современные алгоритмы АК при входной оценке поступающих последовательностей

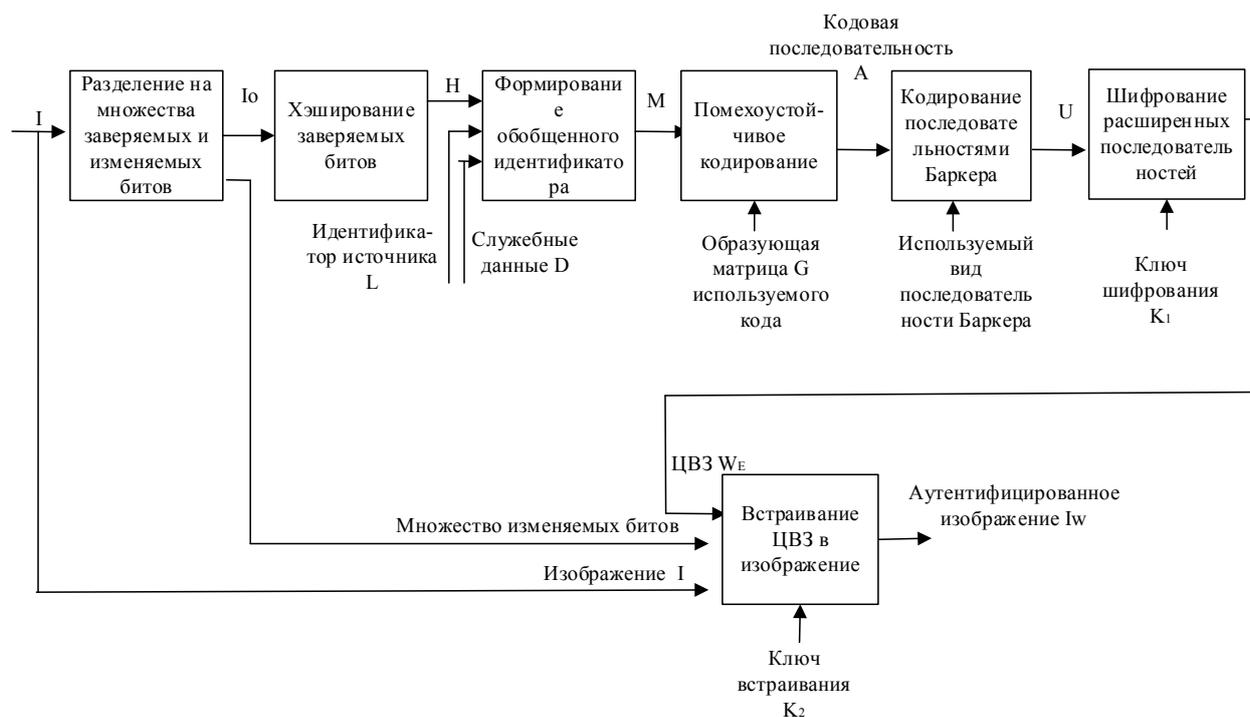
определяют невозможность сжатия входных безизбыточных данных и передают N-ую УДП ВК без сжатия.

4. Встраивание ЦВЗ на место N-ой УДП ВК каждого блока изображения, хотя и приводит к потере менее значимой части информации, приводит к небольшому ухудшению качества изображения и с юридической точки зрения оценивается как изменение исходной информации, что может затруднить использование защищенной информации в судебных процедурах.

5. Отсутствует адаптация выполняемой аутентификации к текущей вероятности ошибок канала передачи и нет гибкости в настройке требуемого уровня защищенности.

Также известен способ обеспечения аутентификации изображений на основании использования ЦВЗ [7], в котором для повышения защищенности встраиваемого ЦВЗ от воздействия помех применяется расширение спектра сигнала передаваемого сообщения с помощью широкополосных ортогональных сигналов. Недостатком описанного в статье способа является необходимость кратного расширения ЦВЗ при повышении уровня помех в канале связи и, как следствие, низкая емкость встроенного сообщения, а также отсутствие зависимости встроенного ЦВЗ от передаваемых изображений.

Ряд перечисленных недостатков устранен в способе стеганографической аутентификации изображений с комплексным использованием



**Рис. 2.** Формирование на передающей стороне аутентифицированного электронного изображения в соответствии с патентом RU 2785832

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

помехоустойчивого кодирования и последовательностей Баркера [8]. На передающей стороне защищаемое изображение  $I$ , представленное в пространственной области, разделяют на множество заверяемых битов  $I_o$ , описывающих информационно значимое содержание изображение, и на множество менее значимых битов  $I_p$ , которые можно менять при встраивании ЦВЗ, как показано на *рисунке 2*.

На передающей стороне (борт БЛА) от множества заверяемых битов  $I_o$  вычисляют сигнатуру изображения  $H$  с использованием бесключевой криптографической хэш-функции. Далее путем конкатенации битовых последовательностей сигнатуры  $H$ , идентификатора источника изображения  $L$  и служебной информации  $D$  (дата, время, координаты полета и т.п.) формируют битовую последовательность обобщенного идентификатора  $M$ , которую последовательно разделяют на информационные слова заданной длины и кодируют с использованием выбираемого помехоустойчивого кода с образующей матрицей  $G$

$$A = M \times G, \quad (1)$$

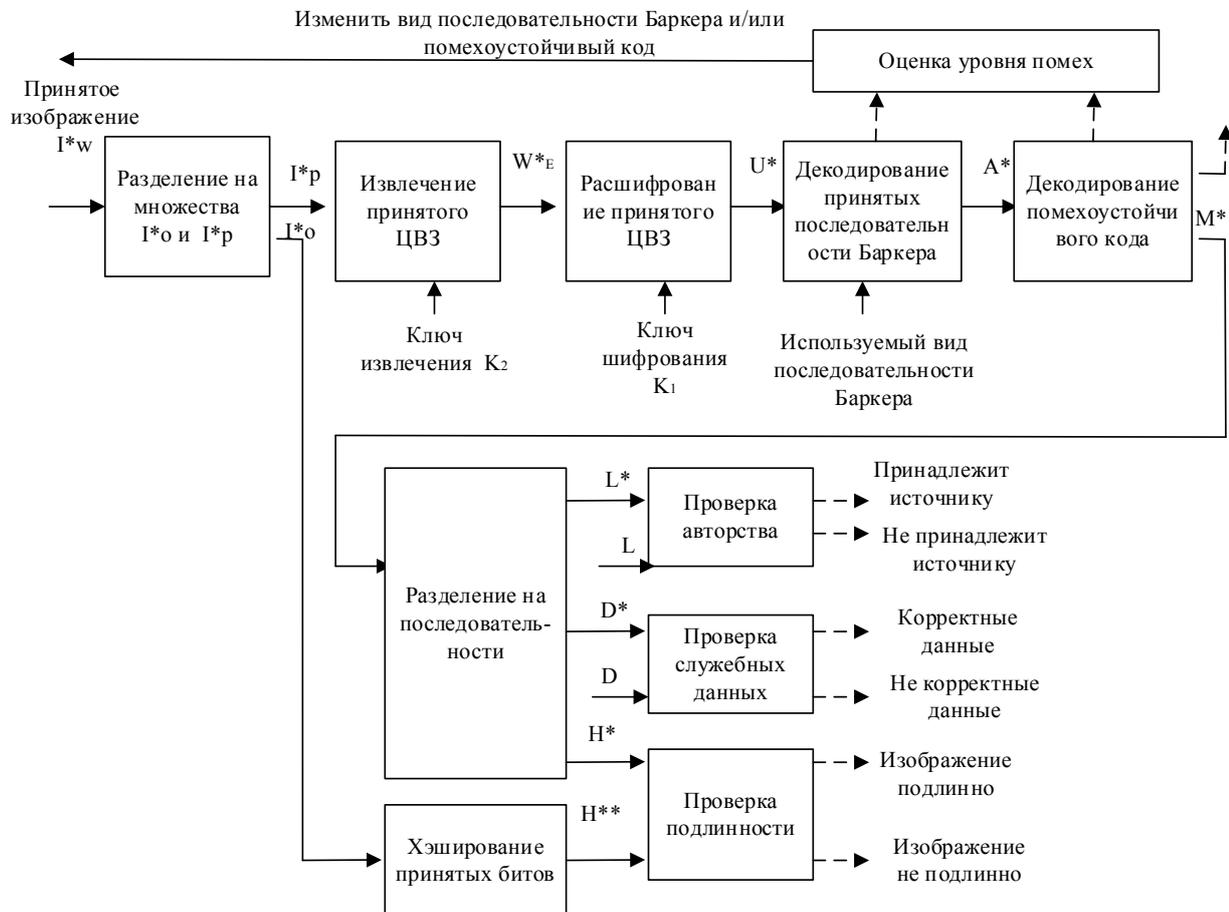
где в качестве помехоустойчивых кодов могут использоваться в соответствии с текущей интенсивностью ошибок канала передачи коды с различной обнаруживающей и исправляющей ошибки способностью.

Сформированную таким образом очередную кодовую комбинацию  $A$  побитно расширяют с помощью последовательностей Баркера  $b$ , для чего очередной двоичный символ  $A$  в зависимости от его значения 1 или 0 заменяют на прямую или инверсную последовательность Баркера  $b_{(L)}$  длины  $L$ , возможных видов

$$b_{(4)} = [1 -1 1 1], b_{(5)} = [1 1 1 -1 1], b_{(7)} = [1 1 1 -1 -1 1 -1], \dots$$

Используемый в текущий момент вид последовательности Баркера выбирают в зависимости от требуемой помехозащищенности передачи по радиоканалу связи.

Так как последовательности Баркера имеют явно различимую детерминированную структуру, то для повышения защищенности передачи аутентифицированных изображений от нарушителя сформированные расширенные последовательности  $U$  шифруют с использованием алго-



**Рис. 3.** Проверка на приеме подлинности и авторства принятого электронного изображения в соответствии с патентом RU 2785832

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ритма шифрования  $E_{\text{cript}}$  и ключа шифрования  $K_1$

$$W_E = E_{\text{cript}}(U, K_1). \quad (2)$$

Сформированный таким образом цифровой водяной знак  $W_E$  встраивается в это же изображение во множество менее значимых битов  $I_p$  по ключу встраивания  $K_2$ . Алгоритм встраивания  $F$  может быть различным, описанным, например, в [3], но при этом встраивание не должно изменять множество заверяемых битов изображения  $I_o$ .

$$I_w = F(I, W_E, K_2). \quad (3)$$

Аутентифицированное изображение  $I_w$  передается по каналу связи, на приемной стороне декодируется и проверяется его подлинность и авторство, как показано на *рисунке 3*.

Принятое изображение  $I_w^*$  по согласованным с отправителем правилам разделяют на принятые множество информационно значимых битов  $I_o^*$  и множество менее значимых битов  $I_p^*$ . Из значимых битов  $I_o^*$  по ключу извлечения  $K_2$ , соответствующему ключу встраивания, извлекают принятый ЦВЗ  $W_E^*$ , расшифровывают его с использованием ключа  $K_1$ , и принятые расширенные последовательности  $U^*$  декодируют с использованием последовательностей Баркера заданного вида, и далее выполняют декодирование последовательностей помехоустойчивого кода с использованием проверочной матрицы кода  $S$ , обратной к образующей матрице  $G$ . По результатам декодирования последовательностей Баркера (степени отличия принятой последовательности от канонического вида последовательности Баркера) и декодируемых последовательностей помехоустойчивого кода (по виду синдрома декодирования) выполняется оценка текущего уровня помех в передающем канале и подбираются подходящие последовательности Баркера и помехоустойчивый код с адекватной интенсивности помех исправляющей (обнаруживающей) способностью, о чем по обратному каналу сообщается передающей стороне.

Декодированный обобщенный идентификатор  $M^*$  разделяют на принятые битовые последовательности  $N^*$ , идентификатора источника изображения  $L^*$  и служебной информации  $D^*$ . Принятый идентификатор  $L^*$  побитно сравнивают с ожидаемым идентификатором источника изображения  $L$  и при полном совпадении выносят решение о принадлежности принятого изображения заявленному источнику. В этой атаке предполагается, что законный отправитель не обманывает получателя исходящей от него информации (возможны атаки только со стороны внешнего нарушителя через радиоканал). Внешний нарушитель не может необнаруживаемым образом изменить идентификатор источника изображения, так как без знания ключа шиф-

рования  $K_1$  не способен корректно сформировать цифровой водяной знак  $W_E$ . Аналогичным образом выполняется проверка корректности полученной служебной информации  $D^*$ .

От принятых информационно значимых битов  $I_o^*$  заново вычисляют сигнатуру принятого изображения  $N^{**}$  с использованием бесключевой криптографической хэш-функции, и вычисленную сигнатуру сравнивают с принятой битовой последовательностью  $N^*$ . При совпадении сравниваемых последовательностей принимается решение о подлинности принятого изображения.

К очевидным достоинствам данного способа относится высокая помехоустойчивость передачи защищаемых изображений в радиоканалах комплексов с БЛА и возможность адаптивно подстраиваться под текущее состояние канала, выбирая вид последовательности Баркера и используемого помехоустойчивого кода. Способ также может быть использован при преобразовании пиксельного представления изображения в частотные коэффициенты ДКП или ДВП.

Однако этот способ не полностью вписывается в существующие технологии сжатия и удаления избыточности передаваемой визуальной информации, так как после хэширования заверяемых частей изображения и последующего шифрования избыточность встраиваемого ЦВЗ уже неудаляема методами сжатия.

Также оказывается, что встроенный ЦВЗ является более помехозащищенным, чем заверяемое им изображение, и при воздействии случайных или преднамеренных помех канала передачи с большей вероятностью, чем сам ЦВЗ, искажаются принятые информационно значимые биты  $I_o^*$ , и при любой ошибке вычисленная из них сигнатура  $N^{**}$  не совпадает с извлеченной  $N^*$  с неминуемым отказом от принятого изображения как неподлинного. Однако эта особенность полезна в системах ЦВЗ защиты авторских и имущественных прав формирователя заверенного изображения, где более важным является обеспечение высокой устойчивости встроенной авторской метки правообладателя от случайных помех и преднамеренных действий нарушителя, чем помехоустойчивости самого контейнерного изображения.

Также известно другое направление развития способов стеганографической аутентификации изображений. В способе аутентификации со встраиванием ЦВЗ в сжимаемое арифметическим кодированием изображение [9] обеспечивается равная помехозащищенность заверяемой и заверяющей информации в передаваемом изображении, с возможностью сжатия встраиваемо-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

го ЦВЗ. Как и в способе аутентификации патента US7313696, у отправителя разделяют ЭИ на  $M \geq 2$  блоков каждый размером  $n_1 \times n_2$  пикселей, над каждым очередным блоком ЭИ выполняют дискретное вейвлет-преобразование, полученные в результате преобразования ВК частотных областей квантуют и записывают в ДП вейвлет-коэффициентов очередного блока ЭИ, которые так же преобразуют в  $N \geq 2$  УДП вейвлет коэффициентов этого блока.

Структурная схема данного способа аутентификации изображения показана на *рисунке 4*.

Из очередной упорядоченной дискретной последовательности блока ЭИ вычисляют ее аутентификатор по ключевой криптографической функции хэширования с использованием секретного ключа. В частности, может быть использован алгоритм формирования имитовставки, рекомендованный в [2]. Использование в ЦВЗ ключевой функции хэширования выгодно отличается тем, что для обеспечения типового значения допустимой вероятности необнаружения навязывания ложной информации не более  $10^{-9}$  требуемая длина аутентификатора составляет всего 32 бита, против 256...512 бит при использовании бесключевой функции хэширования.

Параллельно очередную УДП сжимают с использованием встраивающего ЦВЗ адаптивного арифметического кодирования, для чего используют следующую особенность этого кодирования. В любом арифметическом кодере после обработки последнего бита сжимаемой входной последовательности в выходную последовательность требуется дописать конечные биты, необходимые для корректного декодирования сжатой последовательности в арифме-

тическом декодере. В качестве конечных бит может использоваться любая двоичная последовательность в пределах от нижней до верхней границы финального интервала кодирования АК с длиной, равной разрядности вычисления параметров АК.

На *рисунке 5* иллюстрирован пример работы предлагаемого адаптивного арифметического кодирования при сжатии очередной УДП вида «011111» со встраиванием ЦВЗ. При использовании, например, 16-битового процессора, начальный интервал кодирования в момент времени  $t=0$  простирается от нижней границы арифметического кодирования  $L[0]=0$  до верхней границы кодирования  $H[0]=65535$  в десятичном представлении (111...11111 длиной 16 бит в двоичном представлении), начальные вероятности появления входных нулевых и единичных символов равны:  $p_0=1/2$  и  $p_1=1/2$ , что описывает начальное состояние АК при сжатии очередной УДП в однопроходном режиме арифметического кодирования. В ходе сжатия текущий интервал кодирования в зависимости от вероятности появления входных нулевых и единичных символов перераспределяется, как показано на рисунке. Если старший двоичный разряд (слева в данной записи) представления текущих верхней и нижней границ кодирования совпадает, то он считывается на выход АК в виде очередного бита сжатой последовательности и стирается из последовательностей текущих верхней и нижней границ кодирования, а двоичное представление этих границ дописывается очередным единичным битом в освободившийся младший разряд (справа в записи), что называется нормализацией текущего состояния АК. После сжатия последнего шестого по



**Рис. 4.** Структурная схема формирования аутентифицированного электронного изображения в соответствии с патентом RU 2589849

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

счету бита данной УДП финальный интервал кодирования находится в пределах от нижней границы  $L[6]=40555$  (1001111001101011 в двоичном виде) до верхней границы  $H[6]=6552035$  (111...10000). Для правильного декодирования на приеме после формирования сжатой последовательности вида «01111» в данном примере требуется передать любую двоичную последовательность в пределах от нижней до верхней границы финального интервала кодирования.

В данном способе аутентификации предлагается определить число  $M$  двоичных символов различия представлений верхней и нижней границ финального интервала кодирования очередной УДП, начиная слева со стороны старших символов. В указанном примере сравниваются двоичные последовательности

«111111111110000» и «1001111001101011».

Начиная со второго бита границы финального интервала кодирования различаются, следовательно, число  $M=16-1=15$ . В качестве концевых бит кодирования записываются совпадающие биты границ финального интервала кодирования и  $M-1$  двоичных символов вычисленного аутентификатора очередной упорядоченной дискретной последовательности, остальные биты аутентификатора исходной длины 32 бита стираются. Последовательность длиной  $M$  бит является ЦВЗ очередной УДП, используемым для контроля подлинности принятой УДП, и одновременно является концевыми битами для

арифметического декодирования этой УДП. Поэтому на выход АК считываются совпавшие биты границ кодирования и  $M$  бит из вычисленного по ключевой функции хэширования аутентификатора данной УДП. Например, при использовании секретного ключа  $K$  в алгоритме формирования имитовставки из данной УДП вида «011111» сформирован 32-битовый аутентификатор вида

«01011110011010011100101100100011».

Выбранное, например, слева, из этого аутентификатора требуемое число  $M=15$  бит составляет встроенный ЦВЗ этой УДП вида

«010111100110100»,

как показано на рисунке 5.

Для каждой очередной УДП процесс ее аутентификации выполняется независимо от других УДП, при этом длина очередного встраиваемого ЦВЗ меняется в зависимости от статистических характеристик сжимаемых последовательностей.

В данном техническом решении встраивание ЦВЗ не приводит к изменению любой части защищаемого изображения, и при этом при встраивании практически не увеличивается длина сжатого аутентифицированного изображения по сравнению с просто сжатым, и, соответственно, не уменьшается достигаемый коэффициент сжатия АК.

На приемной стороне арифметически декодируется очередная принятая сжатая после-

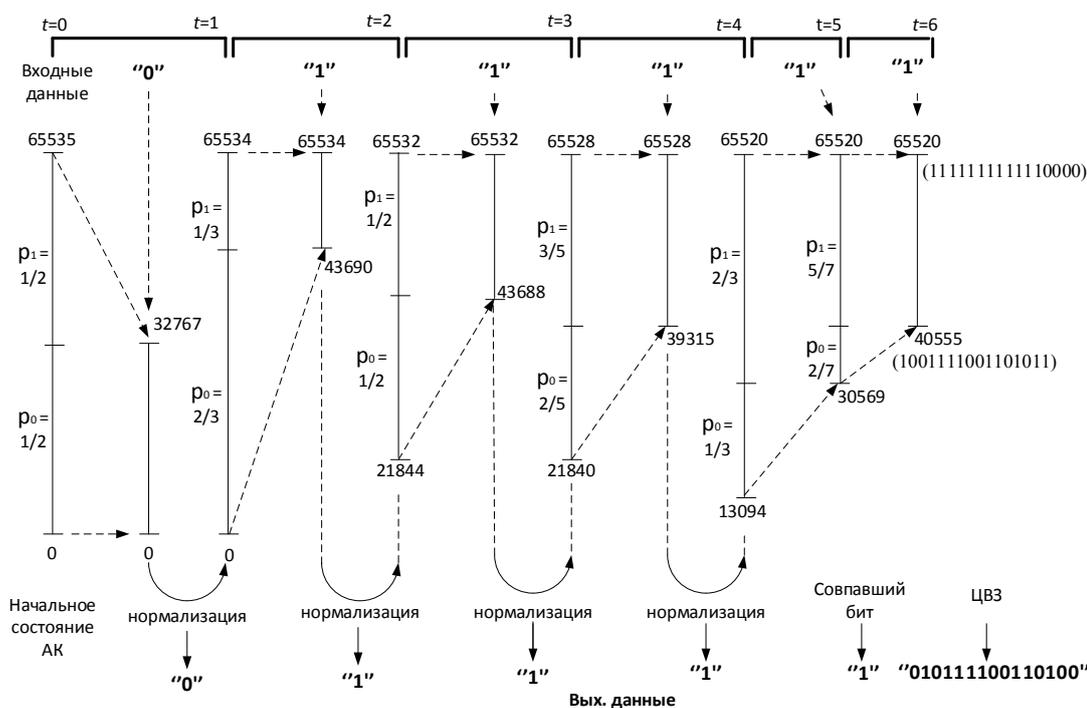


Рис. 5. Пример адаптивного арифметического кодирования при сжатии очередной УДП со встраиванием ЦВЗ вида «010111100110100»

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

довательность, из очередной декодированной УДП, как и на передаче, вычисляют аутентификатор по ключевой функции хэширования с тем же ключом  $K$ , и таким же образом определяют число  $M^*$  двоичных символов различия нижней и верхней границы финального интервала декодирования очередной декодированной УДП. Затем извлеченный ЦВЗ сравнивают с вычисленным на приеме ЦВЗ. При их полном совпадении, включая выполнение условия  $M=M^*$ , очередная декодированная УДП частотной области изображения является подлинной с вероятностью необнаружения навязывания ложной информации не более  $2^{-M^*}$ . Для очередного блока пикселей изображения вероятность необнаружения подделки оценивается не более  $2^{-\sum M^*}$ , где суммирование выполняется по всем декодированным УДП всех частотных областей, в которых выполняются требуемые совпадения. С учетом числа УДП всех частотных областей используемых уровней вейвлет преобразования реально достигаемая вероятность необнаружения навязывания ложных изображений существенно меньше типовых значений допустимой вероятности.

При выявлении несовпадений в некоторых декодированных УДП некоторых частотных областей ДВП, такие принятые данные могут стираться с восстановлением принятого блока пикселей изображения по данным с подтвержденной подлинностью. Несовпадения появляются при искажении ошибками в канале передачи очередной сжатой УДП со встраиванием ЦВЗ, при этом размножение ошибок при арифметическом декодировании гарантированно обеспечивает обнаружение факта искажения данной декодируемой УДП и корректно использовать принятые с подтвержденной подлинностью данные для восстановления изображения. По числу выявляемых несовпадений оценивается интенсивность ошибок в канале передачи и однозначно различаются случаи с воздействием случайных ошибок в радиоканале от случая навязывания нарушителем ложных изображений. Если во всех декодированных УДП не подтверждена их подлинность, фиксируется факт имитонавязывания ложной видеoinформации. Если у части декодированных УДП подтверждена их подлинность, речь идет о воздействии ошибок передачи.

Однако в рассматриваемом способе аутентификации со встраиванием ЦВЗ в сжимаемое арифметическим кодированием изображение [9] не обеспечивается требуемая высокая помехоустойчивость передачи информации в радиоканалах. Этот недостаток целесообразно устранить

с использованием механизмов помехозащиты, в частности, может быть применено комплексное использование ранее рассмотренного помехоустойчивого кодирования и последовательностей Баркера [8] для повышения помехоустойчивости передаваемых очередных сжатых УДП со встраиванием ЦВЗ.

Таким образом, одновременное обеспечение информационной безопасности и помехоустойчивости передачи видео информации в современных робототехнических комплексах является нетривиальной задачей и требует комплексного использования различных механизмов защиты. В этом плане большие перспективы имеют способы стеганографической аутентификации изображений в радиоканалах комплексов с БЛА.

### Литература

1. Верба В.С., Оков И.Н., Устинов А.А. и др. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. М.: Издательство Радиотехника, 2016. Книга 2. С.443-507.
2. ГОСТ Р 34.13-2018. Межгосударственный стандарт. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Режимы работы блочных шифров. М., 2018.
3. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. М.: Издательство СОЛОН-Пресс, 2002.. 262 с.
4. Безопасность систем машинного обучения. Защищаемые активы, уязвимости, модель нарушителя и угроз, таксономия атак / В. Г. Грибунин, Р. А. Гришаненко, А. П. Лабазников, А. А. Тимонов // Известия Института инженерной физики. – 2021. – № 3(61). – С. 65-71.
5. Способ аутентификации электронного изображения. Патент США № 7313696. Приоритет от 25.12.2007 г.
6. Information technology - JPEG 2000 image coding system. Part 8: Secure JPEG 2000. SO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1. Secretariat JISC, 2004.
7. Грибунин В.Г., Токарев Д.А. О методах помехоустойчивого внедрения цифровых водяных знаков в изображения // Известия Института инженерной физики, 2015. № 4(38). С.95-101.
8. Антонов А.А., Финько О.А., Шпырня И.В., Рябинин Ю.Е., Балюк А.А. Патент РФ № 2785832. Способ обеспечения робастности цифрового водяного знака, встраиваемого в статическое изображение, передаваемое по каналу связи с помехами. Опубликовано 14.12.2022 г. Бюл. №35.
9. Агеева Н.С., Дворников С.В., Оков И.Н., Устинов А.А. Патент РФ №2589849. Способ аутентификации электронного изображения. Опубликовано 10.07.2016 г. Бюл. №19.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056

## ПРОБЛЕМЫ ФОРМАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ PROBLEMS OF FORMAL REPRESENTATION OF COMPLEX INFORMATION SECURITY TOOLS

Леонид Яковлевич Добкач

главный специалист

АО «Центр эксплуатации объектов  
космической наземной инфраструктуры»

Адрес: 105318, Москва, ул. Ткацкая, д. 7

Тел.: +7 (965) 410-44-38

E-mail: dobkachleo@mail.ru



### Аннотация

Развитие информационных технологий привело к росту угроз, которые осуществляются посредством информационных систем и сетей. Для защиты ценных активов были изобретены средства защиты информации. Наиболее ранние из них основывались на методах, известных за десятилетия до программно-технического воплощения. Дальнейшие события определили стремительную эволюцию этих средств, позволяя строить всё более сложные, эшелонированные системы безопасности. Однако далеко не сразу теперь подводится полноценная теоретическая база к новым комплексным средствам защиты информации, что в конечном счёте позволяет недобросовестным производителям и недостаточно компетентным пользователям внедрять решения с низкой или неизвестной эффективностью. Настоящая статья призвана подчеркнуть данные проблемы и предлагает вариант формализованной архитектуры одного из новейших комплексных средств – системы расширенного обнаружения и реагирования на атаки.

**Ключевые слова:** средства защиты информации, комплексные средства, система безопасности, обнаружение вторжений, межсетевые экраны.

### Summary

Advances in information technologies have led to the growth of threats that are carried out through information systems and networks. Information security tools have been invented to protect valuable assets. The earliest of them were based on methods known decades before their software and hardware implementation. Subsequent events determined the rapid evolution of these tools, making it possible to build increasingly complex, layered security systems. However, it is not immediately possible to provide a full-fledged theoretical basis for new complex information security tools. It ultimately allows unscrupulous manufacturers and incompetent users to implement solutions with low or unknown efficiency. This article is intended to highlight these problems and proposes a version of the formal architecture for one of the newest complex tools which is extended detection and response system.

**Keywords:** information security tools, complex means, security system, intrusion detection, firewalls.

### Введение

Существуют десятки средств защиты информации (СЗИ), отличающихся по функционалу, области действия, сложности реализации и распространению. Со временем стало ясно, что одного конкретного СЗИ недостаточно, чтобы обеспечить полноценную защиту информационных ресурсов. Возникла потребность в построении эшелонированных систем защиты, которые могут противодействовать как внешним, так и внутренним нарушителям.

Заметное распространение в информационных системах и сетях получили средства антивирусной защиты (САВЗ) и межсетевые экраны (МЭ). Системы обнаружения вторжений также занимают заметную нишу в вопросе защиты информации. Для физической защиты периметра, где располагается защищаемый сегмент информационной сети, используются системы контроля управления доступом (СКУД) и т.д.

Если раньше требовалось множество администраторов различных средств защиты инфор-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

мации, которые лишь изредка должны были сообщать друг другу и вышестоящему руководству о выявленных аномалиях, либо эту задачу поручали одному человеку, который физически мог не справиться с множеством потоков разнообразных сведений о состоянии сети, то теперь несколько администраторов могут видеть эти же данные в одном интерфейсе.

### Примеры комплексных СЗИ

Среди современных комплексных систем можно назвать следующие: NGFW (Next-generation firewall, межсетевой экран следующего поколения), TI, или TIP (Threat Intelligence Platform, платформа киберразведки); SIEM (Security Information and Event Management, система управления событиями информационной безопасности), IRP (Incident Response Platform, платформа реагирования на инциденты), SOAR (Security Orchestration, Automation and Response, система координации и автоматизации процессов реагирования на инциденты), XDR (eXtended Detection & Response, система расширенного обнаружения и реагирования на атаки).

Они возникали постепенно, беря начало от классических средств антивирусных защиты, систем обнаружения вторжений, межсетевых экранов и им подобных. На *рисунке 1* показана упрощённая последовательность эволюционных новшеств в сфере СЗИ.

NGFW – это межсетевой экран для глубокой фильтрации сетевого трафика, напоминающий по функционалу системы предотвращения вторжений (Intrusion Prevention System, IPS), только в основе его архитектуры лежит именно межсетевой экран [1]. Он способен не только анализировать трафик на предмет угроз и соответствия политикам безопасности, но и собирать информацию об угрозах из внешних источников. С развитием технологий и подключением всё новых функций NGFW стали больше напоминать ещё одно решение на базе МЭ и также интегрированное с IPS – UTM (Unified Threat Management, унифицированное управление угрозами). UTM,

по сути, представляет собой многофункциональный шлюз, осуществляющий защиту от разнообразных сетевых угроз. В её состав, помимо МЭ и IPS, включаются DLP (Data Leakage Prevention, системы предотвращения утечки данных), САВЗ, VPN и т.д. Однако если произойдёт сбой в работе UTM, то все эти защитные сервисы откажут [1].

TIP собирает данные об актуальных угрозах и группировках преступников в области информационных технологий, в ответ на действия и инструменты которых платформа позволяет выстроить эффективную систему защиты от атак [2].

SIEM – это объединение систем управления событиями безопасности и информацией о них. SIEM собирает данные с различных источников (в том числе с межсетевых экранов, систем обнаружения вторжений (СОВ), системных журналов и пр.), анализирует их, производит корреляцию и создаёт сообщения об инцидентах. Самое сложное и главное в SIEM – сформировать базы правил корреляции, нормализации, обогащения и сбора данных так, чтобы эффективно отслеживать состояние сети [3].

IRP создана в развитие технологии SIEM и также предназначена для работы с инцидентами. Поскольку нередко возникают однотипные или похожие инциденты, чтобы сэкономить время на их обработку, этот процесс автоматизируют [3].

SOAR, в свою очередь, развивает уже технологию IRP, и его главное предназначение заключается в координации и управлении системами безопасности, с которыми он связан. Здесь также возможна автоматизация типовых сценариев реагирования. SIEM могут быть одним из источников информации о событиях для SOAR [3].

### Класс систем обнаружения и реагирования на атаки

Прежде чем перейти к проблеме XDR, следует подчеркнуть, что также есть и другие СЗИ, относящиеся к классу \*DR, где DR значит Detection & Response, то есть «обнаружение и реакци-

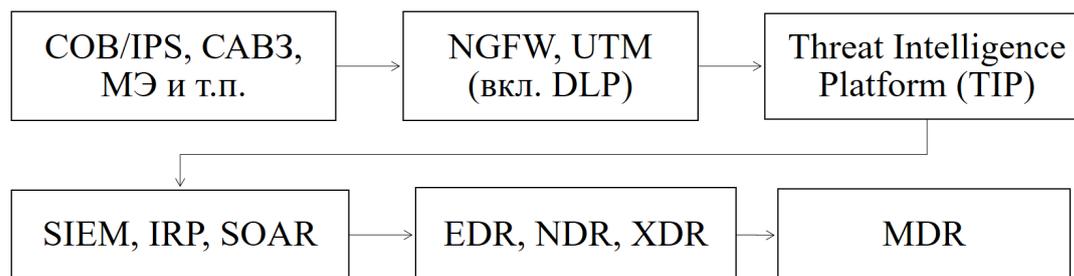


Рис. 1. Эволюция комплексных средств защиты информации

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

рование». Среди них выделяются EDR (Endpoint DR), NDR (Network DR), MDR (Managed DR) и, собственно, XDR (Extended DR). EDR собирает информацию на конечных устройствах с целью выявления целевых атак и сложных угроз, способны интегрироваться с SIEM-решениями и предназначены для проактивного поиска угроз [4,5].

NDR можно назвать расширением сетевых COB, которое включает в том числе данные с этих СЗИ, а также с других источников информации о сети. После сбора данных NDR может производить их анализ для обнаружения и противодействия общесистемным угрозам, происходящим из сети, в том числе с использованием методов машинного обучения [4].

MDR подразумевает управляемое обнаружение и реагирование, тем самым в него могут входить другие комплексные СЗИ, в том числе EDR, NDR, XDR, SIEM, а также COB. Оно также предназначено для предупреждения угроз, а также для восстановления систем в случае инцидента [4].

XDR, хотя и может включаться в MDR, само по себе представляет комплексное средство защиты информации, включающее сбор данных как на уровне конечных устройств, так и на уровне самой сети. При этом оно может реагировать на угрозы заранее и противодействовать сложным атакам. Из самого описания видно, что XDR превосходит EDR по области действия, SIEM – по способности реагирования, SOAR – по гибкости реакции. При

этом это более однородное решение, нежели MDR [4].

Однако XDR имеют существенный и в то же время необычный недостаток. Впервые данная технология была введена в оборот компанией Palo Alto в 2018 году [5], и, несмотря на то, что различные отечественные и зарубежные компании выпускают собственные XDR-решения, нельзя сказать, что у этой технологии устоялась какая-то архитектура.

Исторически первая XDR-система, Palo Alto Cortex XDR, устроена таким образом, что собирает данные с конечных узлов, NGFW, TI, умеет проводить поведенческий анализ, использует машинное обучение, контролирует USB-подключения. Один из её конкурентов, Cisco SecureX, представляет облачную платформу, собирает данные на уровне электронной почты, конечных узлов, серверов, NGFW и т.д. Зарубежная FortiXDR и отечественная PT XDR объединяют в себе продукты своих компаний, с той лишь разницей, что Fortinet делает упор скорее на межсетевое экранирование, а Positive Technologies – на SIEM, EDR и систему управления уязвимостями. Близкий к ним путь избрала Kaspersky Symphony, которая автоматизирует механизмы реагирования на атаки и тоже включает в себя компонент EDR [6].

В связи с вышеизложенным XDR может иметь совершенно разный набор инструментов, а следовательно, его эффективность варьируется от решения к решению.

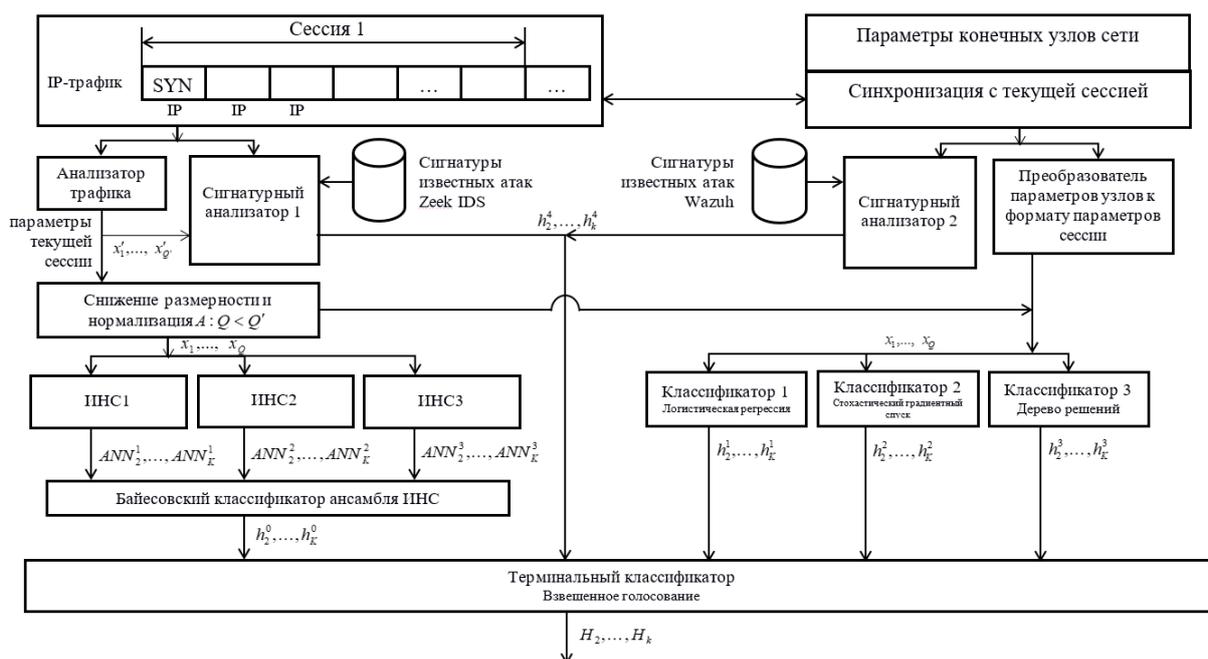


Рис. 2. Предлагаемая архитектура XDR-системы

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Проект унифицированной архитектуры XDR

Унифицированный подход к построению XDR призван устранить неопределённость в определении функциональных возможностей данного вида СЗИ и тем самым обеспечить его эффективное применение. Поскольку недостаточно задекларировать архитектуру самого общего плана, требуется формализовать основные компоненты и их взаимосвязи, при этом сохранив возможность для вариаций, не нарушающих совокупность функций.

Представляется разумным представить XDR в виде комплекса сетевой СОВ и EDR-решения. По крайней мере, основную структуру, ядро системы. Чтобы оно имело возможность активного реагирования, блокировки угроз, данный комплекс можно соединить с межсетевым экраном, однако это следует рассматривать как дополнительный, необязательный компонент.

Рисунок 2 представляет возможную унифицированную архитектуру системы расширенного обнаружения и реагирования на атаки.

Предлагаемая система способна работать как с сетевой активностью, так и с узловыми событиями. После нормализации событий они проверяются на сигнатурных анализаторах на соответствующем уровне, в противном случае подаются на входы ансамбля искусственных нейронных сетей и ансамбля машинного обучения. Каждый из них может работать в режиме, когда другой бездействует, отключён или не справляется с распознаванием событий. Выводы ансамблей агрегируем на терминальном классификаторе, как это подробно описано в [7].

Оценка точности классификации событий безопасности проводилась на CICIDS 2017 и показала высокие результаты, что может свидетельствовать об эффективности описанного подхода.

### Заключение

До сих пор XDR-системы представляли собой маркетинговый ход, попытки компаний-разработчиков объединить либо все свои продукты в одном пакете услуг, либо совместить их с продуктами коллег и конкурентов. С точки зрения защиты информации такой подход может быть чреват излишними тратами и неэффективным применением СЗИ, что значительно и не лучшим образом влияет на уровень защищённости информационных ресурсов.

Формальное представление унифицированной архитектуры XDR-системы закладывает недостающую основу под эффективное развитие и применение данного вида комплексных СЗИ. Объединение функциональных возможностей се-

тевой системы обнаружения вторжений и EDR-системы позволяет обеспечить ключевые свойства систем расширенного обнаружения и реагирования на атаки, заявляемые в их названии.

Предложенная архитектура не обязана быть единственно возможной, что оставляет задел под альтернативные варианты исполнения XDR-систем, но с появлением хотя бы одного теоретического образца данная технология становится пригодной для грамотного внедрения в защищаемые системы.

### Литература

1. Liang J. Evolution of Firewalls: Toward Securer Network Using Next Generation Firewall / J. Liang, Y. Kim // 2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC): сборник трудов Межд. науч. конф. IEEE, 2022. С.752-759.
2. Dutta A. An overview of cyber threat intelligence platform and role of artificial intelligence and machine learning / A. Dutta, S. Kant // International Conference on Information Systems Security: сборник трудов Межд. науч. конф. Cham: Springer, 2020. С.81-86.
3. Нужный А.С. Регуляризация Байеса при подборе весовых коэффициентов в ансамблях предикторов // Труды Института системного программирования РАН, 2019. Т.31, № 4. С.113-120.
4. Горбатов В.С. Кибербезопасность сетевого периметра объекта критической информационной инфраструктуры / В.С. Горбатов, И.Ю. Жуков, В.В. Кравченко [и др.] // Безопасность информационных технологий, 2022. Т.29. №4. С.12-26.
5. Мишуринов А.О. Использование данных о киберугрозах (Cyber threat intelligence) в работе центров мониторинга и реагирования на инциденты ИБ (Security operations center) // Цифровизация и кибербезопасность: современная теория и практика: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Сибирский гос. автомобильно-дорожный университет. Омск: СибАДИ, 2021. С.237-244.
6. Добкач Л.Я. Проект стандартизации технологии расширенного обнаружения и реагирования // Новые направления развития приборостроения (ННПП-2024, Минск, 17-19 апреля 2024 года). Материалы 17-й Межд. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, 2024. С. 257.
7. Сакулин С.А. Выявление сетевых аномалий на основе взвешенного агрегирования с учетом узловых параметров / С.А. Сакулин, А.Н. Алфимцев, А.А. Ломанов, Л.Я. Добкач, В.М. Недашковский // Вестник компьютерных информационных технологий, 2022. Т.19. №7(217). С.48-56.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.94

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАЖЕНИЯ УДАРОВ БПЛА ПВО В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF REFLECTING AIR DEFENSE UAV STRIKES IN CONDITIONS OF INFORMATION IMPACT

**Владимир Леонидович Захаров**

доктор военных наук, профессор  
действительный член АВН  
профессор кафедры  
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)  
Адрес: 125993, Москва,  
Волоколамское шоссе, д. 4  
Тел.: +7 (905) 566-17-94  
E-mail: varahas@yandex.ru

**Рафаэль Рамисович Казаков**

кандидат технических наук  
заместитель начальника кафедры  
ВКА им. А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (911) 223-59-67  
E-mail: xoxlov1984@bk.ru

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**

почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, доцент  
действительный член АИИ  
профессор кафедры  
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)  
Первый Вице-президент Института  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: dv\_smr@iifmail.ru

**Юрий Александрович Пономарев**

доктор военных наук, доцент  
доцент кафедры  
ВКА им. А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (931) 104-28-96

### Аннотация

В статье рассмотрены способы борьбы средств противовоздушной обороны с беспилотными летательными аппаратами. Предложены различные варианты решения такой задачи. Представлены целевая функция, характеризующая эффективность боевых действий и показатель эффективности боевых действий. Получено аналитическое выражение характеризующее взаимосвязь частных показателей эффективности способов информационной борьбы с показателями вооруженной борьбы.

**Ключевые слова:** средства воздушного нападения противника, противовоздушная оборона, нестратегическая противоракетная оборона, характеристика эффективности боевых действий, информационная борьба.

### Summary

The article discusses methods of combating air defense systems against unmanned aerial vehicles. Various options for solving this problem have been proposed. An objective function characterizing the effectiveness of combat operations and an indicator of the effectiveness of combat operations are presented. An analytical expression has been obtained that characterizes the relationship between particular indicators of the effectiveness of information warfare methods and the indicators of armed struggle.

**Keywords:** enemy air attack means, air defense, non-strategic missile defense, characteristics of the effectiveness of combat operations, information warfare.

### Введение

Анализ характера современных войн показывает, что достижение целей боевых действий во многом определяется результатами противоборства конфликтующих сторон в воздушной и информационной сфере.

Соответственно, высокая точность прогнозирования результатов отражения ударов средств

воздушного нападения (СВН) противника, позволяет определить наиболее рациональную стратегию управления группировкой сил и средств противовоздушной обороны – нестратегической противоракетной обороны (ПВО-НПРО), привлекаемых к отражению ударов СВН противника.

При этом требуемая достоверность оценки

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

результатов противоборства достигается при учете возможностей не одной, а обеих конфликтующих сторон, а также определении меры соотношения результатов реализации этих возможностей сторонами с учетом взаимного влияния друг на друга.

Все это предопределяет актуальность разработки и обоснования нового подхода к оценке эффективности боевых действий группировок сил и средств ПВО.

Усложнение характера современной войны, появление и все большее доминирование в структуре вооруженного противоборства информационной борьбы поставило перед военной наукой актуальную проблему разработки принципиального нового методического подхода к оценке эффективности боевых действий. Его суть состоит в том, что методология оценки эффективности должна не просто «учитывать» фактор информационной борьбы, а базироваться на положении об информационной борьбе как относительно самостоятельном виде борьбы в войне [5,6,7].

Все это вызывает необходимость разработки методического аппарата, позволяющего при наличии исходных данных о способах ведения вооруженной и информационной борьбы и возможностями по их реализации противоборствующими сторонами, выбирать такое сочетание способов, которое обеспечит эффективное выполнение стоящей перед войсками и силами ПВО боевой задачи [2,6].

Для решения данной проблемы предлагается осуществить ее декомпозицию на совокупность взаимосвязанных частотных задач, многообразии которых определяется выбором целевой функции и спецификой ограничений, накладываемых на исходные данные. Целевая функция, характеризующая эффективность боевых действий, в общем виде записывается следующим образом:

$$Y=(W,V,A,B) \quad (1)$$

где  $W=(W_{nk})$ ,  $n=1,2,\dots,N$ ,  $k=1,2,\dots,K$  – матрица показателей эффективности способов борьбы своих войск ( $N$  – количество способов борьбы своих войск,  $K$  – количество объектов борьбы);

$V=(V_{mk})$ ,  $m=1,2,\dots,M$ ,  $k=1,2,\dots,K$  – матрица показателей эффективности способов борьбы войск противника ( $M$  – количество способов противника,  $K$  – количество объектов борьбы);

$A=(A_{nk})$  – матрица показателей обеспечения реализуемости способов борьбы;

$B=(B_{mk})$  – матрица показателей обеспечения реализуемости способов борьбы противника.

Ограничения могут накладываться как в виде равенства, так и в виде неравенств:

$$G_l(W, V, A, B) \left\{ \begin{array}{l} > \\ \gg \\ = \\ < \\ \ll \end{array} \right\} 0 \quad (2)$$

где  $l$  – количество ограничений.

Выбор конкретного вида целевой функции (1) и накладываемых ограничений (2) обусловлен сущностью задач, составляющих в совокупности содержание проблемы оценки эффективности боевых действий в условиях информационной борьбы.

При оценке эффективности боевых действий войск и сил ПВО такая совокупность может быть представлена в виде следующего перечня оптимизационных задач: определение необходимой эффективности способов вооруженной и информационной борьбы, обеспечивающих требуемую эффективность боевых действий войск ПВО с учетом прогнозируемой эффективности боевых действий воздушного противника; определение необходимой эффективности вооруженной и информационной борьбы, обеспечивающих требуемую эффективность боевых действий войск ПВО с учетом стоимости реализации этих способов; определение потребной эффективности способов информационной борьбы, обеспечивающих решение задач вооруженной борьбы, для достижения требуемой величины предотвращения ущерба; распределение ограниченного ресурса для достижения максимальной эффективности боевых действий войск ПВО [5,8].

В качестве показателя эффективности боевых действий может быть избран предотвращенный ущерб объекта обороны [1]:

$$U = I - \frac{\bar{Q}}{Q} \quad (3)$$

где  $\bar{Q}$  – математическое ожидание числа выведенных из строя объектов в результате нанесенных противником огневых ударов;

$Q$  – общее количество обороняемых объектов.

Предотвращение ущерба, наносимого ударами воздушного противника, может достигаться с применением различных способов борьбы [4,5].

В частности, это может быть не только уничтожение противника, но и отвлечение ударов противника на ложные объекты обороны, блокирование прицельной информации, необходимой для нанесения ударов по объектам обороны, провоцирование воздушного противника на прорыв зональной и объектовой обороны с целью его упреждающего уничтожения и др. Каждый из этих способов может быть охарактеризован с помощью частных показателей эф-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

фективности, взаимосвязанных показателей предотвращенного ущерба [4].

### Способ отвлечения ударов СВН на ложные объекты

Системы ПВО применяется на этапе подготовки боевых действий, когда информационная борьба направлена на снижение степени и качества информативности противника относительно дислокации, а также истинного или ложного характера объекта обороны [4,5].

Эта информация является приоритетной при планировании противником огневых ударов, так как влияет на распределение ресурсов и выбор их направления. Показатель эффективности определяется из выражения:

$$W_1 = \frac{dE_1}{1+dE} \frac{dE}{1+dE} \quad (4)$$

где  $d = \frac{q}{Q_0}$  – соотношение количества ложных и истинных объектов;

$E = \frac{(1-P_1)}{P_1}$  – коэффициент подобия ложных и истинных объектов ( $P_{1(2)}$  – вероятность правильной информативности об истинных (ложных) объектах обороны).

Данное выражение позволяет определить требования к количеству и степени подобия ложных объектов в зависимости от заданной эффективности способа и, наоборот, эффективности способа в зависимости от качественных и количественных характеристик истинных и ложных объектов системы ПВО.

В ходе отражения ударов СВН войсками ПВО основным способом информационной борьбы будет **блокирование прицельной информации**, необходимой для нанесения ударов по объектам обороны.

Этот способ нацелен на снижение точности бомбометания и применения БПЛА и ракет. В свою очередь, последнее приводит к уменьшению вероятности поражения объектов и росту наряда СВН, потребного для вывода их из строя. Реализация способа в объединении ПВО возлагается на части РЭБ. Эффективность ведения информационной борьбы этим способом может быть определена из выражения:

$$W_2 = \frac{1-D_0}{D_1}, \quad (5)$$

где  $D_0$  – расчетная дисперсия отклонения боеприпасов СВН от точки прицеливания;

$D_1$  – дисперсия отклонения боеприпаса от точки прицеливания в условиях информационной борьбы.

Здесь следует отметить, что если расчетная дисперсия, как правило, известна достаточно точно, то определение значений дисперсии в условиях информационной борьбы требует раз-

работки целого комплекса методик. Этот связано с многообразием информационных систем и методов, применяемых воздушным противником для решения задач бомбометания, запуска БПЛА и пуска управляемых ракет.

### Способ провоцирования на прорыв зональной обороны

Способ провоцирования на прорыв зональной обороны заключается в навязывании воздушному противнику искаженного представления о наличии и параметрах «брешей» в зональной обороне. При реализации способа провоцирования существенное значение имеет математическое ожидание неверно вскрытых разведкой противника ложных объектов системы ПВО. В первую очередь к ним следует отнести стартовые позиции зрдн, позиции подразделений и частей РЭБ, позиции ЗПУ и т.п. Наличие таких объектов создает у воздушного противника мнимое убеждение об исходящей от них угрозе. И, наоборот, удачно скрытые боевые позиции огневых средств и средств РЭБ усыпляют его бдительность.

В целом искаженное представление о построении группировки войск ПВО провоцирует противника на прорыв ПВО на опасных для него участках. Тем самым ведение информационной борьбы обеспечивает ударным силами ПВО благоприятные условия для обстрела и уничтожения СВН противника.

Частный показатель эффективности способа провоцирования записывается в виде:

$$W_3 = \frac{1-P_1(1-dE)}{1+d} \quad (6)$$

Показатель  $W_3$  можно интерпретировать как вероятность события, состоящего в том, что под влиянием навязывания воздушному противнику ложного представления о боевом порядке группировки войск ПВО он будет осуществлять прорыв в глубину обороны именно на тех участках, где на него может быть оказано огневое воздействие.

### Способы провоцирования на прорыв объектовой ПВО

Способы провоцирования на прорыв объектов ПВО используется в том случае, когда нанесение ударов по прикрываемым объектам может осуществляться воздушным противником с рубежей, расположенных вне зоны боевого воздействия сил и средств ПВО. Чаще всего подобная ситуация создается противником путем подавления помехами средств разведки и целеуказания РТВ и ЗРВ, что резко снижает их пространственные возможности. Кроме того,

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

безнаказанному нанесению ударов способствует широкое применение современного бортового оружия типа управляемых авиабомб, ракет и БПЛА, обладающих достаточно большой дальностью пуска.

В совокупности эти обстоятельства приводят к информационному превосходству воздушного противника, которое проявляется в обладании им, всей необходимой прицельной информацией для нанесения ударов по прикрываемым объектам с заданных рубежей и одновременном блокировании информации о своих СВН, необходимой для управления войсками и силами ПВО.

Основным фактором, влияющим на реализуемость способа провоцирования, является отсутствие прицельно-навигационной информации. Наличие или отсутствие информации, необходимой для решения боевых задач, проявляется, в конечном счете, в реализуемости пространственных возможностей сторон. Именно отсутствие прицельной информации на заданной дальности вынуждает воздушного противника сокращать расстояние между собой и объектом удара с целью все же получить эту информацию и применить оружие. Тем самым снижаются пространственные возможности СВН и создаются условия его обстрела силами и средствами ПВО. Поэтому целесообразно эффективность провоцирования рассчитать по формуле:

$$W_4 = \begin{cases} 1 - \frac{R}{z} & \text{при } R < z \\ 0 & \text{при } R > z \end{cases}, \quad (7)$$

где  $z$  – максимально реализуемая дальность поражения войсками и силами ПВО средств воздушного нападения противника в условиях информационной борьбы;

$R$  – рубеж выполнения боевой задачи СВН в условиях информационной борьбы.

Расчет реализуемых дальностей применения оружия должен осуществляться применительно к конкретным его типам и способам информационного противодействия. Так, максимальная дальность поражения ЗРК в условиях информационной изоляции определяется из выражения:

$$Z = K(z_{\beta} - z_{\sigma}) + z_{\sigma}, \quad (8)$$

где  $z_{\beta}$ ,  $z_{\sigma}$  – дальняя и ближняя границы зоны поражения;

$K$  – коэффициент реализации глубины зоны поражения в условиях информационной изоляции.

Показатели эффективности провоцирования должны входить в интегральный показатель эффективности огня сил и средств ПВО.

Установленная взаимосвязь частных показателей эффективности с предотвращенным ущер-

бом позволяет распространить ее на всю возможную совокупность способов информационной борьбы как относительно самостоятельного вида борьбы с противником и записать окончательное выражение для обобщенного показателя эффективности боевых действий в условиях информационной борьбы:

$$U = 1 - \sum_{k=1}^k E_k V_k (1 - W_k), \quad (9)$$

где  $k$  – количество типов обороны;

$E_k$  – доля объектов  $k$ -го типа от общего количества объектов, запланированных противником для поражения;

$V_k$  – эффективность боевых действий противника при нанесении ударов по объектам  $k$ -го типа;

$W_k$  – эффективность боевых действий при обороне объектов  $k$ -го типа.

Взаимосвязь частных показателей эффективности способов информационной борьбы с показателями вооруженной борьбы проявляется двояко. В случае, когда оба вида борьбы имеют «равный статус» (способ отвлечения и блокирования), зависимость выглядит следующим образом:

$$W = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - W_n), \quad (10)$$

где  $W_n$  – эффективность  $n$ -го способа борьбы (информационной или вооруженной),  $0 \leq W \leq 1$ .

В этом случае, если информационная борьба ведется в интересах решения задач вооруженной борьбы (способом провоцирования), запись несколько видоизменяется:

$$W = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - W_n^B W_n^U), \quad (11)$$

где  $W_n^B$  – эффективность  $n$ -го способа вооруженной борьбы;

$W_n^U$  – эффективность  $n$ -го способа информационной борьбы.

### Заключение

В заключении следует отметить, что приведенные выше положения и результаты позволяют проводить оценку эффективности боевых действий войск ПВО при отражении массированных ударов СВН противника в условиях информационной борьбы.

Разработка методологии оценки эффективности боевых действий войск ПВО для других этапов боевых действий возможна на основе дальнейшей разработки системы частных показателей эффективности способов информационной борьбы.

### Литература

1. Гордиенко Д.В. Показатели эффективности защиты информации в системах управления войсками и оружием фронта // Бюллетень науч-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

но-методических материалов. М.: ВАГШ, №25. С.57-84.

2. Гордиенко Д.В. Оценка эффективности защиты информации при управлении войсками (силами) и оружием оперативно-стратегических (оперативных) объединений // Военная мысль, 1998. №2. С.33-38.

3. Комов С.А. О методологии оценки эффективности информационной борьбы // Военная мысль, 1997. №5. С.42-44.

4. Костин Н.А. Оценка эффективности дезорганизации управления войсками (силами) и ору-

жием // Воен. мысль, 1993. №11. С.39-44.

5. Калистратов А.И. К вопросу о формах и способах ведения вооруженной борьбы // Военная мысль, 2003. №12. С.45-54.

6. Расторгуев С.П. Математические модели в информационном противоборстве. Экзистенциальная математика. М.: АНО ЦСОиП, 2014. 260 с.

7. Воробьев И.Н. Информационно-ударная операция // Военная мысль, 2007. №6. С.14-21.

8. Португальский Р.М. О борьбе в сфере управления войсками // Военная мысль, 1991. №3. С.25-30.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.391.6

## НЕКОТОРЫЕ МЕХАНИЗМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В СОГЛАСОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ SOME PATTERN RECOGNITION MECHANISMS IN COORDINATED NEURAL NETWORKS

Владислав Валентинович Квашенников  
доктор технических наук  
ведущий научный сотрудник  
АО «КНИИТМУ»  
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. К. Маркса, д. 4  
Тел.: 8 (910) 864-52-75  
E-mail: kvashienvv@mail.ru

### Аннотация

В статье рассмотрены некоторые механизмы распознавания образов в согласованных нейронных сетях. Описана многоуровневая иерархическая структура образов и построение сложных образов на основе простых образов. Для простых образов можно достаточно просто определить эффективный код, тогда весовым коэффициентам нейронов первого слоя сети можно назначить значения эффективного кода. При совпадении структуры и весовых коэффициентов НС со структурой и эффективными кодами образов сеть будет согласованной. Согласованная сеть обеспечивает минимум среднеквадратичной ошибки и при определенных условиях распознавание образов в такой сети выполняется по максимуму правдоподобия. Для согласованной сети можно оценить число нейронов, количество слоев нейронов и связей между ними. Для построения сети используется только необходимое число образов полного образа и сложность уменьшается. Параллельные согласованные сети позволяют распознавать образы, существенно отличающиеся от эталонного образа.

**Ключевые слова:** распознавание образов в согласованных нейронных сетях, многоуровневая иерархическая структура образов, простые и сложные образы.

### Summary

The article discusses some mechanisms of pattern recognition in consistent neural networks. The multilevel hierarchical structure of images and the construction of complex images based on simple images are described. For simple images, it is quite simple to determine the effective code, then the weight coefficients of the first layer of the HC can be assigned the values of the effective code. If the structure and weight coefficients of the HC coincide with the structure and effective image codes, the network will be consistent. A consistent network provides a minimum of root-mean-square error and, under certain conditions, pattern recognition in such a network is performed to the maximum likelihood. For a consistent network, it is possible to estimate the number of neurons, the number of layers of neurons and the connections between them. To build a network, only the required number of elements is used and the complexity is reduced. Parallel coordinated networks make it possible to recognize images that differ significantly from the reference image.

**Keywords:** pattern recognition in coordinated neural networks, multilevel hierarchical structure of images, simple and complex images.

### 1. Введение

Нейронные сети (НС) используются для создания интеллектуальных систем, решающих множество взаимосвязанных задач: восприятие информации, выработка решений и выполнение соответствующих действий. Критерием «интеллектуальности» систем является их способность к выработке решений на основе воспринимаемой информации примерно также, как это делает человек. Входная информация представляется в виде множества образов входных воздействий,

а восприятие информации заключается в распознавании этих образов. Образам сопоставляются некоторые коды, являющиеся избыточными кодами, что позволяет разделять образы между собой и распознавать их даже при искажениях и неполном задании. Избыточные коды, корректирующие ошибки и стирания, задаются своей информационной частью. Информационным частям образов соответствуют эталонные образы, задаваемые эффективными кодами. Эффективные коды образов определяются отсчетами и

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

могут отличаться друг от друга, как числом отсчетов, так и величиной этих отсчетов.

В настоящее время предложено большое число различных НС, которые с различной степенью эффективности распознают образы. Выбор структуры сети, её связей и числа нейронов, как правило, решается эмпирически. Обычно применяются многослойные архитектуры нейронов, и связи чаще устанавливаются между нейронами соседних слоев, но могут быть и связи между удаленными друг от друга слоями. Применение в последнее время архитектур сверточных нейронных сетей (СНН) способствовало увеличению точности и производительности систем распознавания образов [1]. Однако, для обучения таких сетей требуются тщательно подобранные выборки данных большого объема и сама процедура обучения довольно сложная и длительная. Существует ряд исследований о количестве нейронов, требуемых для достаточно точного решения задачи распознавания, однако, пока они носят весьма приближенный характер [2]. Задача построения сети распознавания высокой точности и минимальной сложности еще находится в процессе решения.

В статье рассмотрены некоторые механизмы распознавания образов в согласованных НС. При совпадении структуры и весовых коэффициентов НС со структурой и эффективными кодами образов сеть будет согласованной. Для согласованной сети обеспечивается минимум среднеквадратичной ошибки и при определенных условиях распознавание образов в такой сети выполняется по максимуму правдоподобия. Настройка согласованной сети выполняется на основе априорной информации о структуре сети и величинах весовых коэффициентов. НС может распознавать образы, отличающиеся от тех образов, на которых она была настроена, за счет обобщающей способности сети. В настоящей работе описаны некоторые механизмы обобщающей способности сети. Построение согласованной сети требует определения структуры и эффективных кодов образов, что иногда может быть проще, чем построение сети путем обучения. В такой сети число нейронов и связи между ними определяются структурой образов, для построения сети используют минимальное число нейронов и связей, что сокращает сложность сети.

### 2. Структура образов и основные определения

На входе НС могут быть образы различной природы: зрительные образы, ауди образы, образы данных и т.д. Входной образ задается вектором отсчетов с  $n$  компонентами. Отсчеты  $b_i$

принимают действительные значения, точность которых ограничена. Запишем образ

$$B = b_0 b_1 \dots b_{n-1}, \quad b_i \in R.$$

Для образа  $B$  определяется метрика Евклида

$$d_E(B) = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} b_i^2}.$$

Для двух образов  $B_1$  и  $B_2$  одинаковой длины определяется расстояние Евклида между образами

$$d_E(B_1, B_2) = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (b_{1i} - b_{2i})^2}.$$

На множестве образов  $\{B_j\}$  мощности  $M$  определяется минимальное расстояние Евклида между парой образов

$$d_{\min} = \min \left( \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (b_{ji} - b_{ki})^2} \right), \quad j, k = 1..M, \quad j \neq k.$$

Определенную часть отсчетов образа в некоторых случаях можно также рассматривать как образ

$$B = \{B_v\}, \quad B_v = b_{i_0} b_{i_1} \dots b_{i_{v-1}}, \quad b_{ij} \in R, \quad v < n.$$

Образы могут быть простыми и сложными. Сложные образы представляются в виде конкатенации простых образов и других сложных образов [3]. Самый сложный образ будет полным образом. Например, изображения состоят из фрагментов изображения, аудио образы могут включать предложения, которые в свою очередь состоят из слов, слова строятся из звуков, образы данных могут состоять из букв, цифр, знаков препинания, разделительных знаков и т.д. Человек хорошо распознает не только сложные образы, но и компонентные образы. Ему не представляет труда описать структуру образов и входящие компонентные образы, вплоть до довольно мелких образов.

Образы задаются отсчетами, однако, не все множества отсчетов являются образами. Отличительным свойством образов является различимость между собой

$$d_E(B_j, B_k) \geq d_{\min}, \quad j, k = 1..M, \quad j \neq k,$$

что позволяет распознавать образы даже при ошибках и стираниях некоторого числа отсчетов.

Образами являются часто поступающие на вход устойчивые последовательности отсчетов, разнесенные между собой на достаточно большое расстояние  $d_E \geq d_{\min}$ . Свойства образов позволяют выделять образы на каждом уровне иерархии и определять структуру сложных образов. Человек выделяет образы при достаточно частом их повторении, т.е. при установлении устойчивой взаимосвязи между образом и соответствующей группы нейронов и их связей. Структуру и эффективные коды согласованных сетей можно определить, используя частотный

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

анализ с учетом разнесения образов некоторого слоя на минимальное расстояние.

При распознавании образов определяют информационные части образов

$$B \rightarrow A, \quad A = a_0 a_1 \dots a_{k-1}, \quad a_i \in R, \quad k < n.$$

Информационная часть образа длины  $k$  отсчетов представляет собой минимальное количество отсчетов, однозначно определяющих образ. Для образов, отсчеты которых последовательно следуют друг за другом во времени, минимальное число отсчетов можно определить по теореме Котельникова. Если отсчеты поступают одновременно, но разделены в пространстве, минимальное число отсчетов определяется расположением отсчетов в пространстве. Информационной части образа соответствует неискаженный или эталонный образ, который задается отсчетами эффективного кода образа

$$C = c_0 c_1 \dots c_{n-1}, \quad c_i \in R.$$

Эффективный код образа используется при корреляционном распознавании образа в НС. Существование образов при подходящем выборе  $n, k, d_{\min}$  гарантирует граница сферической упаковки [4].

Образы, входящие в сложные образы, в свою очередь также могут быть разделены на образы и многие сложные образы имеют многоуровневую иерархическую структуру. Сложные образы, имеющие многоуровневую иерархическую структуру, можно рассматривать как множество внешних кодов, вложенных во внутренние коды [5]. Множество простых образов можно считать внешними компонентными кодами сложных об-

разов следующего слоя, а построение сложного образа, используя простые образы, есть внутреннее кодирование полного образа. Коды образов последнего слоя  $B^{(0)}$  с параметрами  $(n, q_1 \dots q_{r-1}, d_r)$  есть объединение  $q_1$  различных кодов  $B_{i_1}^{(1)}$  ( $0 \leq i_1 \leq q_1 - 1$ ), где код  $B_{i_1}^{(1)}$  имеет параметры  $(n, q_2 \dots q_{r-1}, d_2)$ . Каждый код предпоследнего слоя  $B_{i_1}^{(1)}$  должен быть объединением  $q_2$  различных кодов  $B_{i_1 i_2}^{(2)}$  ( $0 \leq i_2 \leq q_2 - 1$ ), где код  $B_{i_1 i_2}^{(2)}$  имеет параметры  $(n, q_2 \dots q_{r-1}, d_2)$  и т.д. Наконец, каждый код второго слоя  $B_{i_1 i_2}^{(2)}$  является объединением  $q_{r-1}$  различных кодов первого слоя  $B_{i_1 i_2 \dots i_{r-1}}^{(r-1)}$  ( $0 \leq i_{r-1} \leq q_{r-1} - 1$ ), имеющих параметры  $(n, q_{r-1}, q_{r-1}, d_r)$ .

Можно записать рекуррентные соотношения для кодов различных слоев кодирования образов [6]

$$B^{(0)} = \bigcup_{i_1=0}^{q_1-1} B_{i_1}^{(1)}; \quad B_{i_1}^{(1)} = \bigcup_{i_2=0}^{q_2-1} B_{i_1 i_2}^{(2)}; \quad \dots \quad B_{i_1 i_2 \dots i_{r-2}}^{(r-2)} = \bigcup_{i_{r-1}=0}^{q_{r-1}-1} B_{i_1 i_2 \dots i_{r-1}}^{(r-1)}$$

при этом минимальные расстояния  $d_1 < d_2 < \dots < d_r$ .

Распознавание начинают с кодов первого слоя, определяя сначала простые образы. Затем распознают образы второго слоя образов, двигаясь от слоя к слою, вплоть до последнего слоя, распознавая полный образ [7].

Пример иерархической структуры сложного образа показан на рисунке 1. Самый сложный полный образ (черный) 1-го уровня состоит из 2-х сложных образов (серые) 2-го уровня и 1-го простого образа (бесцветный). Сложные образы 2-го уровня состоят из 2-х сложных образов 3-го уровня и 2-х простых образа. Сложные образы 3-го уровня состоят из 4-х простых образов 4-го уровня.

1 уровень полный образ  $A$

2 уровень  $A_{12} \ A_{17} \ A_{11}$

3 уровень  $A_{21} \ A_{23} \ A_{25} \ A_{29}$

4 уровень  $A_{34} \ A_{36} \ A_{38} \ A_{310}$

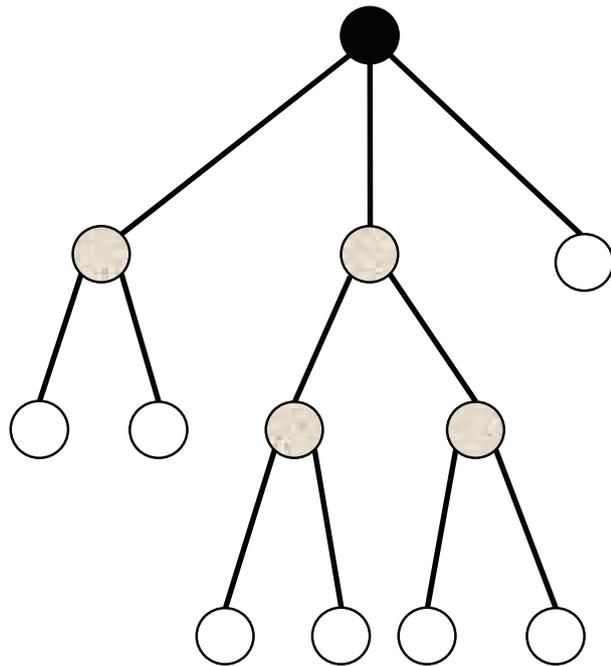


Рис. 1. Многоуровневая иерархическая структура сложных образов

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

НС настраиваются по входным образам и по структуре повторяют многоуровневую иерархическую структуру входных образов. Структура согласованной сети совпадает со структурой образов, а весовые коэффициенты согласованной сети приравниваются к отсчетам эффективных кодов образов.

### 3. Распознавание образов в согласованной НС

При поступлении на вход нейрона отсчетов образа вычисляется функция

$$Y_i = f\left(\sum_j w_{ij} \times b_{ij}\right), \quad w_{ij}, b_{ij} \in R,$$

где  $f(x)$  – решающая функция нейрона;

$\{w_{ij}\}$  – множество весовых коэффициентов  $i$ -го нейрона;

$\{b_{ij}\}$  – множество отсчетов  $i$ -го образа.

Для согласованной НС весовые коэффициенты нейрона совпадают с эффективным кодом эталонного образа

$$w_{ij} = b_{ij}^*, \quad i = 1..M, \quad j = 0..n-1.$$

С некоторым приближением нейрон является согласованным линейным фильтром с нелинейной решающей функцией на выходе, имеющей два состояния: низкий уровень или высокий уровень [8]. При согласовании отсчетов эффективного кода образа с весовыми коэффициентами нейрона, на выходе нейрона будет высокий уровень. Распознается образ  $B_s = \{b_{sj}\}$ , если

$$Y_s = \max(Y_i), \quad i = 1..M,$$

где  $M$  – мощность множества образов.

Нейрон вычисляет корреляционную функцию между входным образом и эталонным образом. Максимум корреляционной функции соответствует минимуму среднеквадратичного отклонения. Можно показать, что при искажениях отсчетов образа аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) распознавание выполняется по максимуму правдоподобия [9].

Нейроны первого слоя распознают простые образы, задаваемые небольшим числом отсчетов и небольшим числом соответствующих эталонных образов. Выходы некоторой группы нейронов первого слоя соединены со входами нейронов второго слоя, согласно структуре сложного образа. Выходы группы нейронов  $i$ -го слоя поступают на входы нейрона  $(i+1)$ -го слоя и т.д. Выходы последнего слоя нейронов будут соответствовать множеству полных образов.

На входы нейронов первого слоя подаются отсчеты образов, на входы следующих слоев подаются последовательности типа

$$001_{i_1}00..01_{i_2}00..1_{i_j}00,$$

где  $1_{ij}$  означает высокий уровень на выходе  $ij$ -го нейрона слоя, а 0 – низкий уровень на выходах остальных нейронов слоя.

Высокий уровень сигнала на выходе нейрона определяет область близкую к распознаваемому образу. Пересечение областей, задаваемых некоторым множеством выходов нейронов слоя, определяет образ следующего слоя.

Можно предположить, что известные алгоритмы обучения строят из сетей с полными связями согласованные сети, т.е. оптимизируют сети под образы. При обучении с учителем требуется довольно большое число обучающих выборок, и точность распознавания будет зависеть от того, насколько полно эти выборки описывают образ, в том числе при искажениях данных. При обучении без учителя объем данных только увеличивается.

Согласованные сети – это сети с фиксированными связями, но они при необходимости могут еще и дополнительно дообучаться. Использование дополнительной априорной информации об образе улучшает настройку согласованной сети. В согласованных сетях с фиксированными связями весовые коэффициенты первого слоя НС могут назначаться заранее, исходя из величин отсчетов простых образов. Для следующих слоев необходимо знать структуру образов, число образов и связи в слое. Согласованные НС можно рассматривать как предобученные сети, которые возможно использовать в качестве базовой основы, и при необходимости дообучать на дополнительных данных. Назначение фиксированных весовых коэффициентов повышает скорость дообучения сети.

На входе образы могут быть искажены или представлены не в нормализованном виде. В нормализованном образе только небольшое число параметров приведены к некоторым стандартным значениям, а остальные могут отличаться от стандартных величин. Например, параметрами нормализованного образа могут быть масштаб, повороты в пространстве, растяжение по осям, различные цветовые окраски, освещение и т.д., которые приводятся к стандартной величине. Нормализованный образ и эталонный образ являются различными понятиями. Нормализованный образ задается небольшим числом основных параметров, а эталонный образ – отсчетами эффективного кода образа, которые полностью определяют образ. Инвариантность позволяет нейронным сетям быть устойчивыми к различным трансформациям входных данных. Известны несколько механизмов инвариантности, которые, вероятно, работают в совокупности.

1. Свойство обобщения НС позволяет определять образ, отличающийся от эталонного образа. Настроенная НС определяет неизвестные образы за счёт обобщающих способностей.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Определяется некоторая область вблизи образа, учитывающая инвариантные преобразования. Пространство образов разделяется некоторыми поверхностями на области и попадание входного образа в область эталонного образа позволяет его распознать. Эталонные образы разделены, по крайней мере, на минимальное расстояние. При отклонениях входного образа от эталонного образа не более, чем на половину минимального расстояния, образ распознается.

2. Сложный образ разбивается на маленькие участки, вплоть до нескольких пикселей, каждый из которых связан с входами своего нейрона первого слоя. Такие маленькие участки: углы, линии, многогранники, участки с небольшим градиентом яркости и т.д. представляют собой простые образы. Нейроны первого слоя настроены на распознавание простых образов с учетом инвариантных преобразований. Поскольку эталонных простых образов немного, то и простых образов с инвариантными преобразованиями будет не слишком много и все они распознаются в первом слое нейронов. Свойство обобщения используется и для распознавания простых образов.

3. Удаление шума и искажений для восстановления образа. При АБГШ задача решается с помощью различных фильтров, таких как линейные согласованные фильтры нижних или средних частот. Более эффективным является применение специальных линейных фильтров, типа фильтров Калмана или Винера. [10].

4. Для устранения мультипликативных помех можно использовать линейные корректоры искажений, которые по своей структуре близки НС. Можно также применять линейные адаптивные корректоры искажений, которые близки НС с обучением [11].

5. Для нормализации образа можно применять разностные подходы: вычисление размера образа и коэффициентов его масштабирования, перевод образов из декартовой системы координат в полярную систему, повороты образа в пространстве и т.д. При этом устраняется разность между входным образом и его нормализованным видом [12].

Структура согласованных НС повторяет структуру образов и сложность сети определяется сложностью образов. Все входные отсчеты, соответствующие полному образу, можно разбить на группы входных отсчетов, каждая из которых соответствует простому образу. Для оценки сложности сети можно подсчитать число образов каждого слоя, общее число слоев и число связей между слоями. Простые образы первого слоя задаются небольшим числом отсчетов и сложность распознавания простых образов

будет незначительной. Пусть число простых образов для  $i$ -ой входных отсчетов есть  $M_{i1}$ , тогда и число нейронов для этой группы отсчетов будет равно  $M_{i1}$ . При числе групп входных образов  $H_1$ , общее число нейронов первого слоя

$$M_s = \sum_{i=1}^H M_{i1}.$$

Выходы этих нейронов разбиваются на группы, каждой группе соответствует некоторый образ или нейрон второго слоя. Число нейронов второго слоя  $M_{i2}$  выразится аналогичной формулой и т.д. Пусть число слоев сети  $F$ , тогда число нейронов сети оценим

$$M_s = \sum_{j=1}^F \sum_{i=1}^H M_{ij}.$$

Если принять, что при обучении сетей получают согласованные сети, то сложность сети может оцениваться примерно, как сложность согласованной сети.

### 4. Согласованная сеть распознавания лица

Рассмотрим применение согласованных нейронных сетей к распознаванию лица, используемое, например, человеком при разблокировании телефона своим лицом. Существующие методы решения этой задачи эффективны примерно от 93% до 98% случаев [10]. Для распознавания лица обычно применяют сверточные НС глубокого обучения. Согласованные сети и параллельные согласованные сети имеют другой алгоритм построения и во многих случаях оптимизируют сети по ряду параметров. Для настройки согласованной сети требуется знание структуры и эффективных кодов образов лица.

При сравнении лица человека в фас, с различными поворотами, а возможно и в профиль, мы увидим, что они имеют больше различий, чем сходств. Лицо следует представлять в нормализованном виде, тогда задача распознавания значительно облегчается. Предполагается, что лицо для распознавания должно быть в фас. Тени и освещение добавляют дополнительные детали и усложняют распознавание. Трудности возникают при другом масштабе лица, различных сдвигах, поворотах, искажениях, фрагментациях, дефектах и т.д. Однако, мы без проблем распознаем лицо, которое видели много лет тому назад и в совсем другой обстановке. Обычно без труда распознаем лицо по его части, при изменении ракурса, условий освещенности, причёски, мимики, при наличии или отсутствии очков и т.п. Перед распознаванием лицо желательно преобразовать, т.е. привести в нормализованный вид.

Сначала согласованная сеть строится для нор-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

мализованного лица в фас, изображенного на *рисунке 2* в центре. Такое нормализованное лицо будет также и эталонным лицом. Изображение лица представляется, как некоторый полный образ последнего слоя, состоящий из образов предпоследнего слоя и т.д. Распознавание начинается с простых образов в первом слое сети. Если весовые коэффициенты нейронов совпадают с эффективными кодами простых образов, то на выходе соответствующего нейрона появляется сигнал распознавания простого образа. Первый слой анализирует небольшие части образов и может обнаруживать только простые признаки, такие как края, углы и т.д. По мере того, как мы идем глубже в сеть, нейроны получают информацию от более крупных фрагментов образа и от других нейронов предыдущих слоев. Нейроны глубоких слоев работают с более сложными образами. Переходя от простых образов к сложным образам в некотором слое формируют образы фрагментов лица: глаз, носа, бровей, лба, прически, ушей, рта, подбородка и т.д. Каждому типу этих сложных образов будут соответствовать определенные группы нейронов глубинного слоя сети. Определяя комбинацию сложных образов в последнем слое нейронов получим полный образ лица.

После настройки сети проверяется распознавание лица с некоторыми отличиями от его нормализованного вида, допустим с поворотами лица вправо или влево. Если повороты будут небольшими, то лицо будет еще распознаваться при отличиях в пределах половины минимального расстояния. Такое свойство сети в некотором смысле можно считать обобщающей способностью. При больших отличиях, таких, как при поворотах лица на правом и левом изображении на *рисунке 2*, лицо уже не будет распознаваться. Значит, следует построить согласованные сети и

для лиц с поворотами, которые также будут эталонными образами. Затем следует подключить вновь построенные сети параллельно к ранее построенной сети. Тогда сеть будет распознавать все три лица на *рисунке 2*. При наличии достаточно репрезентативной выборки примеров, состоящих из множества эталонных лиц, будут распознаваться лица, довольно существенно отличающиеся от лица строго в фас.

Параллельные согласованные сети, после настройки на большой выборке, содержащей примеры с существенными отличиями, будут распознавать лица, значительно отличающиеся от его нормализованного вида в фас. Возможное решение задачи инвариантности состоит в построении параллельных согласованных сетей, каждая из которых настроена на свое эталонное лицо.

### Заключение

Важными задачами, решаемыми при распознавании образов, является увеличение точности, уменьшение сложности и повышение производительности. Одним из направлений решения этих задач является использование согласованных НС. Построение согласованной сети является естественным и логичным процессом. Сеть заранее или при обучении подстраивается под структуру образов и их эффективные коды. Для согласованной НС выполняются некоторые принципы оптимальности. В определенных условиях распознавание образов в таких НС осуществляется по максимальному правдоподобию. Распознаются только те образы, которые входят в структуру полного образа, что уменьшает сложность сети. Согласованная сеть позволяет заранее настроить некоторые связи, используя априорную информацию о структуре образа, что также упрощает построение сети. Параллельные согласованные сети строятся с использованием

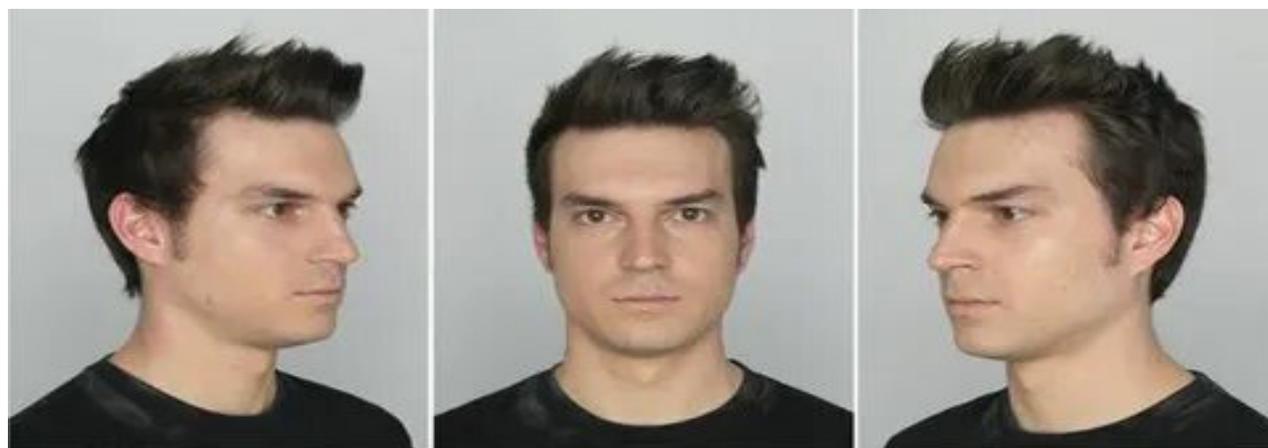


Рис. 2. Изображение лица в фас, с правым и левым поворотом

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

множества эталонных образов. Дополнительные эталонные образы существенно отличаются от основного эталонного образа, что увеличивает распознающую способность сетей.

### Литература

1. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. <http://www.deeplearningbook.org>.
2. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: РиС, 2014. 249 с.
3. Савельев А.В. На пути к общей теории нейросетей. К вопросу о сложности // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2006. № 4. С.4-14.
4. Сидельников В.М. Теория кодирования. М.: Физматлит, 2008. 324 с.
5. Зиновьев В.А. Обобщенные каскадные коды // Проблемы передачи информации, 1976. Т.12. Вып. 1. С.5-15
6. Блох Э.Л., Зяблов В.В. Обобщенные каскадные коды. М.: Связь, 1976. 240 с.
7. Гибсон У. Распознавание образов. М.: Вильямс, 2015. 384 с.
8. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.: Мир, 1992. 184 с.
9. Квашенников В.В. Нейронные модули обработки сигналов в каналах с группирующимися ошибками // Известия Института инженерной физики, 2024. №1(71). С.18-24.
10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2011.
11. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
12. Квашенников В.В., Козеева О.О. Инвариантные преобразования и распознавание образов геоинформационных систем // Телекоммуникации, 2022. №4. С.23-31.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.182

## О ПРОТОКОЛАХ СПИН- ФОТОННОЙ ЗАПУТАННОСТИ В СОЗДАНИИ УДАЛЕННЫХ КВАНТОВЫХ СЕТЕЙ ON SPIN-PHOTON ENTANGLEMENT PROTOCOLS IN THE CREATION OF REMOTE QUANTUM NETWORKS

**Сергей Владимирович Смуров**  
*почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, профессор  
Первый Вице-президент Института –  
Главный конструктор  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: Svs\_iif@mail.ru*

**Геннадий Германович Волков**  
*доктор физико-математических наук, профессор  
старший научный сотрудник  
АНО «Институт инженерной физики»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru*

### Аннотация

В данной статье дается краткий обзор различных подходов к спин-фотонному запутыванию, которые можно применять в масштабах мегаполиса. В заключение нашего обсуждения мы предлагаем спин-нейтринный интерфейс, в котором роль удаленного кутрита-пилота играет три-нейтринное состояние.

**Ключевые слова:** геральдово и детерминированное запутывание, телепортация, классическая и квантовая интерференция, неразличимые фотоны, спин-фотон интерфейс.

### Summary

This paper provides a brief overview of various approaches to spin-photon entanglement that can be applied at the metropolitan scale. To conclude our discussion, we propose a spin-neutrino interface in which the role of the qutrit pilot is played by a tri-neutrino state.

**Keywords:** herald and deterministic entanglement, teleportation, classical and quantum interference, indistinguishable photons, spin-photon interface.

## 1. От спин-фотон интерфейсов к созданию дистанционно удаленных квантовых сетей

За прошлое десятилетие ряд экспериментов на кубитных платформах продемонстрировал элементарные возможности квантовой сети на коротких расстояниях, включая фотонную генерацию запутанности. Сети кубитов ближнего действия были полезны для тестирования улучшенного оборудования, разработки управления квантовой сетью и для изучения протоколов квантовой сети в лабораторных условиях [1-6]. Следующая серьезная задача касалась разработки систем квантовой сети, способных генерировать, хранить и обрабатывать квантовую информацию в масштабах мегаполиса [7-11]. Такие системы сталкиваются с рядом новых требований. Во-первых, большие расстояния, и как следствие, значительное время связи и необходимость масштабируемости требует, чтобы сетевые узлы работали независимо в полную силу.

Во-вторых, потери фотонов станут критическим параметром, которые необходимо контролировать и уменьшать. В-третьих, так как передовые сетевые приложения требуют объявленной передачи общих запутанных состояний, готовых к дальнейшему использованию, то системы кубитов должны быть способны хранить квантовую информацию в течение длительного времени, и сетевая система должна быть способна применять в реальном времени обратную связь к кубитам после успешной генерации запутанности.

Удаленная запутанность квантовых систем является жизненно важной компонентой в квантовых сетях и вычислениях. Удаленные стационарные кубиты не могут взаимодействовать напрямую, «летающий кубит» необходим для интерференции и создания запутанности. Фотоны предлагают универсальность, поскольку они могут передавать квантовую информацию на большие расстояния через оптические во-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

локна с низкими потерями, работают при комнатной температуре и легко обнаруживаются с помощью детекторов одиночных фотонов. В протоколе фотонной запутанности стационарные кубиты избирательно «взаимодействуют» с фотонами, обычно через оптический переход, приводящий к запутыванию между фотоном и стационарным кубитом. Эта запутанность между фотонами и спинами можно использовать дальше для создания запутанности между стационарными кубитами. Модульная структура протоколов удаленной запутанности, опосредованной фотонами, может быть разделена на разные уровни, что позволяет взглянуть на протокол запутанности с детальным моделированием спин-фотонных интерфейсов, включая квантовые оптические резонаторы.

### 2. Масштабные квантовые сети

Различные протоколы квантовой телепортации непосредственно связаны с созданием тонких механизмов запутанности между удаленными стационарными кубитными системами, такими как захваченные ионы, нейтральные атомы, квантовые точки, алмазные дефектные центры и др. [1-7]. В канонических протоколах генерации запутанности сначала созданная спин-фотонная запутанность расширяется до спин-спиновой запутанности с помощью фотонного измерения Белла [11], либо прямого спин-фотонного «взаимодействия» [11]. Успешная запутанность объявляется детектированием излученных фотонов, а квантовое состояние спиновых кубитов должно оставаться когерентным в течение времени одной попытки создания запутанности, которое обычно устанавливается временем прохождения сигнала между узлами. Ключевые функции квантовой сети, такие как очистка запутанности и телепортация многокубитного состояния [7-11] требуют наличия более чем одной запутанной пары кубитов. В частности, когда квантовая информация, закодированная в нескольких физических кубитах, в квантовом корректирующем ошибке коде должна быть передана так, чтобы все физические кубиты этого кода должны быть переданы одновременно.

Многокубитная память была рассмотрена на генерировании нескольких запутанных пар двумя способами, последовательным или параллельным [10], которые использовали те же протоколы фотонных кубитов, что и для генерации одиночной запутанной пары. Однако высокие потери в квантовой сети приводят к гораздо более жестким требованиям ко времени когерентности квантовой памяти, чем для однопарной схемы. Для приемлемой скорости генерации

успешно запутанные пары должны храниться в квантовой памяти, пока оставшиеся пары полностью успешно запутаются. В результате требуемое время памяти увеличивается в обратной зависимости от вероятности передачи фотона, которая экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния распространения между узлами в стандартном оптоволокне. Более того, продолжающиеся попытки запутывания соседних кубитов из-за нежелательных перекрестных помех могут еще больше уменьшить время памяти успешной пары.

Принципиальный вариант схемы генерации нескольких запутанных пар между двумя удаленными регистрами кубитов это использование многомерных ( $\dim=2^m$ ) фотонных кудит состояний. В частности, было показано [10], что одиночный фотонный кудит временного интервала (time-bin):

$$|\psi\rangle_{\delta} = \frac{1}{2^{m/2}} \sum_{k=0}^{2^m-1} |k\rangle_{\delta} \quad (1)$$

допускает объявленную и одновременную генерацию  $m$ - запутанных пар между двумя различными многокубитными регистрами.  $|k\rangle_{\phi}$  – состояние фотона в  $k$ -м интервале времени [10]. Фотонные кодировки кудитов ранее рассматривались для квантовых сетей и квантовых повторителей из-за их более высокой информативности, которая может привести к более высокой терпимости к потерям и более эффективной генерации квантовых ключей.

В протоколе на основе кудитов, необходимое время когерентности памяти кубита не зависит от вероятности передачи и учитывает время только одной попытки генерации запутанности. Кроме того, скорость генерации запутанности в таком протоколе при передаче между удаленными регистрами более устойчива к потерям, чем в других кубитных подходах. Схема открывает новые возможности для генерации множества запутанных пар кубитов с высокой точностью в расширенной квантовой сети, где потери при передаче между узлами становятся ограничивающим фактором, как скорости генерации, так и к требованиям квантовой памяти. Эскизы кудит-протокола и сравнительный аналогичный протокол на основе кубитов показаны соответственно на *рисунках 1а* и *1б* [10].

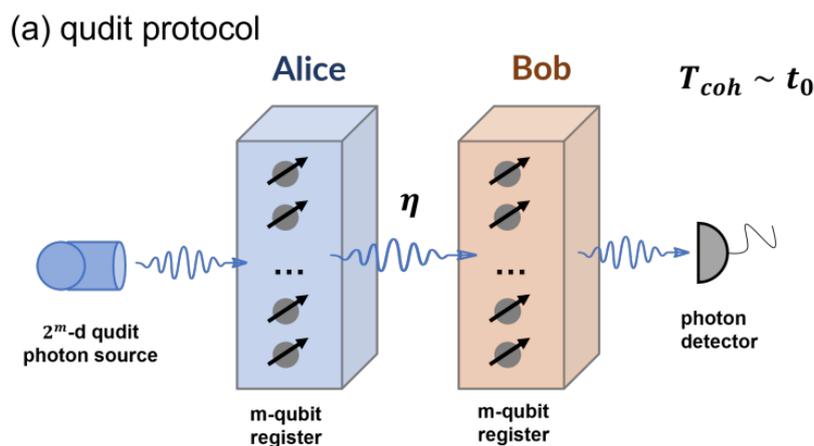
Конкретная реализация схемы возможна на основе квантовых эмиттеров, таких как нейтральные атомы или дефектные центры в алмазах с использованием фотонно-индуцированных атомных фазовых затворов на основе односторонних резонаторов с сильно связанными с эмиттером, называемыми спин-резонаторными си-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

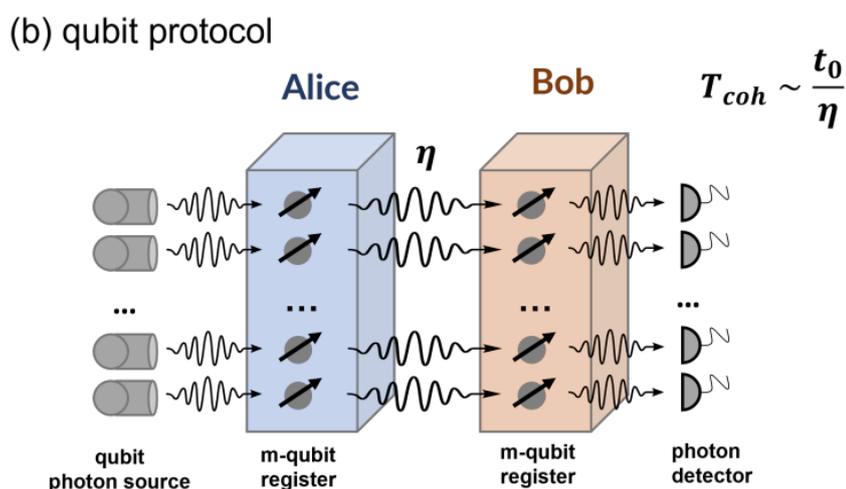
стемами Фотонный кудит генерируется за счет импульсного возбуждения рамановского перехода с резонатором. Управление мощностью возбуждения позволяет регулировать амплитуды в состоянии кудита. Это имеет решающее значение для конкретной реализации, так как фотон будет испытывать разные потери в зависимости от того, в каком временном излучаемом интервале он находится, например, из-за неиде-

ального взаимодействия с разным количеством спин-резонаторных систем на спин-фотон запутывающем этапе.

Численно моделируя одновременную генерацию нескольких запутанных пар, используя кудит протокол, можно сравнить его с подходом параллельных кубитов, в котором используется аналогичная система увеличения расстояния между двумя узлами. Как показано, протокол-



**Рис. 1а.** Протокол кудит для одновременной генерации из нескольких запутанных пар. Сперва запутанность генерируется между одиночным фотонным кудитом и всеми кубитами памяти на стороне Алисы. Фотонный кудит размером  $2^m$  кубитов требуется для  $m$ -памяти кубитов. Кудит передается в регистр Боба и взаимодействует со всеми кубитами памяти, тем самым расширяя запутывание с этим регистром. Окончательное измерение отделяет фотонное состояние от кубитов памяти и объявляет одновременную генерацию всех запутанных пар. Требуемое время когерентности кубитов памяти составляет  $T_{coh} \sim t_0$ , где  $t_0$  время одной попытки [10]



**Рис. 1б.** Протокол на основе кубитов для создания нескольких запутанных пар между двумя кубитными регистрами. Запутывание сначала создается между несколькими фотонными кубитами и кубитами памяти регистра Алисы параллельным образом.  $2^m$ -мерный кудит требуется для  $m$  кубитов-памяти. Фотоны (каждый запутан с одним кубитом памяти) передаются в регистр Боба для взаимодействия с кубитами памяти, и измерения отделяют фотонное состояние от состояний кубитов памяти, предвещая успешную генерацию пар Белла. Для того чтобы эффективно сгенерировать несколько пар, успешно сгенерированные пары должны быть сохранены, в то время как для оставшихся пар должны предприниматься повторные попытки. Это приводит к требуемому времени когерентности спин-ворот  $T_{coh} \sim t_0 / \eta$ , где  $\eta$  – вероятность передачи [10]

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

кудит превосходит протокол-кубит для высокоточной генерации запутанности по мере увеличения расстояния и, следовательно, потерь и времени передачи сигналов. Хотя протокол кудит более устойчив к потерям при передаче, чем кубитный подход, он менее устойчив к локальным потерям. Полагая величину  $\eta_0$  – эффективность передачи фотона при взаимодействии с одиночным переключателем и полостью, полная передача протокола кудит будет масштабировать, как  $\eta_0^m$ . Тем не менее, даже для  $\eta_0 \sim 86\%$  и  $m=5$  протокол кудит значительно превосходит протокол кубита для высокоточной генерации запутанности на расстояниях до 20 км из-за значительного смягчения требований ко времени когерентности кубитов [10].

### 3. Спин-фотонный интерфейс

Ключевым логическим строительным блоком протоколов удаленной запутанности является блок спин-фотон интерфейса [1-7], поскольку это взаимодействие между стационарным и летающими кубитами. В этом случае надо выделить объявленное геральдово запутывание, использующее однофотонное детектирование с исключением ошибок на потери фотонов.

Из категории спин-фотонных интерфейсов спин-фотонная эмиссия создает фотонный кубит, запутанный с кубитом состояния спина путем эмиссии через возбужденное состояние более высокого уровня. Обычно это достигается за счет эмиссии фотона после спин-зависимого возбуждения лазерным импульсом. Например, оптическое возбуждение спина в состоянии суперпозиции будет испускать фотон в зависимости от состояния спина [11]:

$$\begin{aligned} \sqrt{1/2}(|0\rangle_s + |1\rangle_s) &\rightarrow \text{лазер} \rightarrow \sqrt{1/2}(|0\rangle_s + |\text{возбужд}\rangle_s) \\ &\rightarrow \sqrt{1/2}(|0\rangle_s |0\rangle_p + |1\rangle_s |1\rangle_p) \end{aligned} \quad (2)$$

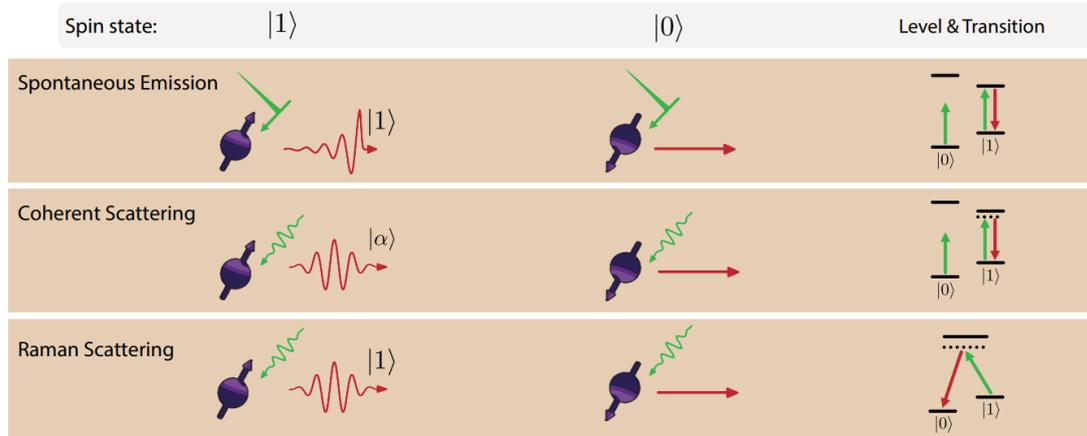
где индекс s(p) обозначает метки состояния спина (фотонная мода);

$|1\rangle_s$  – спиновое состояние, которое возбуждается и испускает одиночный фотон.

Альтернативно, систему можно привести в возбужденное состояние, когда два разных канала распада приводят к двум различным спиновым состояниям. Испускаемые фотоны могут иметь, например, другую поляризацию, запутанную со спиновым состоянием. Различные оптически активные квантовые системы реализовали эмиссию спиновых фотонов посредством спин-зависимого оптического возбуждения или распада на различные спиновые состояния, включая NV-центры в объемных алмазах [1-3].

Источники фотонов можно рассматривать как инициализацию фотонных кубитов. Высокий уровень генерации запутанности с источниками фотонов требует детерминированной генерации одиночных фотонов с помощью высокоэффективных квантовых эмиттеров или генерация пар фотонов с последующим объявлением. Для обеспечения высокой точности одиночные фотоны должны быть неразличимы, что является одной из важнейших проблем в твердотельной среде [1-7]. Источники фотонных пар обеспечивают запутанные пары фотонов, которые можно использовать для проколов удаленного запутывания. Это можно понимать как два фотона инициализируются в запутанном состоянии.

Можно указать несколько различных физических возможностей реализаций спин-фотон интерфейса, например, в виде спин-фотонной эмиссии: спонтанное излучение, когерентное



**Рис. 2.** Избирательный по состоянию оптический переход как спин-фотон интерфейс. При спин-фотон интерфейсе со спонтанным излучением импульс возбуждения намного короче оптического времени жизни и возбуждает  $|1\rangle$ , которое испускает один фотон в результате спонтанного излучения. Спин-фотон интерфейс когерентного рассеяния рассеивает слабый импульс оптического перехода  $|1\rangle$ , приводящий к фотону со слабым когерентным состоянием. Рамановское рассеяние спин-фотон интерфейса оптически возбуждает другое спиновое состояние, которое излучает только один фотон  $|1\rangle$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

рассеяние и комбинационное рассеяние. Все эти процессы контролируются с помощью классического лазерного управляющего импульса, и выходной сигнал представляет собой одиночный фотон, запутанный со спином. Когда взаимодействие между светом и излучателем очень сильное, можно получить отражение одиночного фотона или слабое когерентное состояние, где амплитуда или фаза отраженного фотона контролируется спиновым состоянием [11].

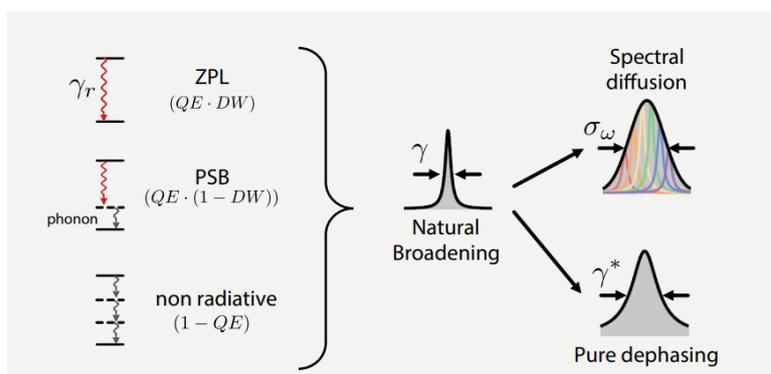
Голый эмиттер можно использовать в качестве спин-фотон интерфейса, но для улучшения свойств эмиттера и эффективности сбора фотонов все чаще используется оптический резонатор. В результате, такие устройства уже надо рассматривать, как квантовые соединения резонатор-эмиттер. На рисунках 3-4 показаны соответствующие параметры системы резонаторов эмиттера. Динамика связанной системы эмиттер-резонатор определяется тремя параметрами:  $\gamma$ ,  $\kappa$  и  $g$ . Ширина линии перехода эмиттера (резонатора)  $\gamma(\kappa)$  равна обратному времени распада эмиттера (релаксации резонатора). Спонтанно излучаемые фотоны в свободное пространство, безызлучательные распады и рас-

пады на фононные боковые полосы, выходят за пределы когерентных взаимодействий полость-эмиттера и рассматриваются, как канал релаксации системы, включающий в  $\gamma$ .

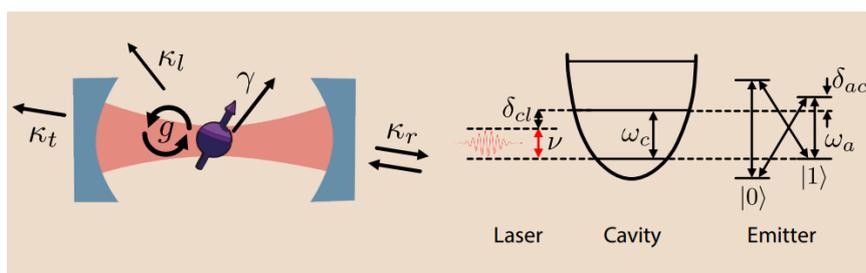
Динамика связанной системы резонатор-эмиттер определяются скоростью связи  $g$ . Физически  $g$  – это частота Раби, когда излучатель приводится в действие электрическим полем полости (электрическое поле нулевой точки, умноженное на дипольный момент перехода) [11]. Кооперативность системы определяется как  $S=4g^2/\kappa\gamma$ . Кооперативность измеряет силу когерентного взаимодействия по отношению к диссипации, а более высокая кооперативность повышает эффективность спин-фотонных интерфейсов.

### 4. Детерминированная передача удаленной запутанности в квантовой сети

Выход за рамки существующих двух-узловых сетей требует скорости генерации запутанности между узлами, превышающей скорость их декогеренции. За этим критическим порогом, вероятностные протоколы запутанности могут быть включены в мощный строительный блок,



**Рис. 3.** Неэффективности и шумы оптического перехода в спин-фотонном интерфейсе. Распад нульфононной линии ( $\gamma_r$ ), распад фононной боковой полосы и безызлучательный распад вместе дают общую скорость затухания  $\gamma$ , приводящую к естественному уширению. Дополнительный медленный шум добавляет гауссову спектральную диффузию со стандартным отклонением  $\sigma_\omega$ , в то время как быстрый шум дает чистую лоренцеву дефазировку ширины линии  $\gamma^*$  [11]

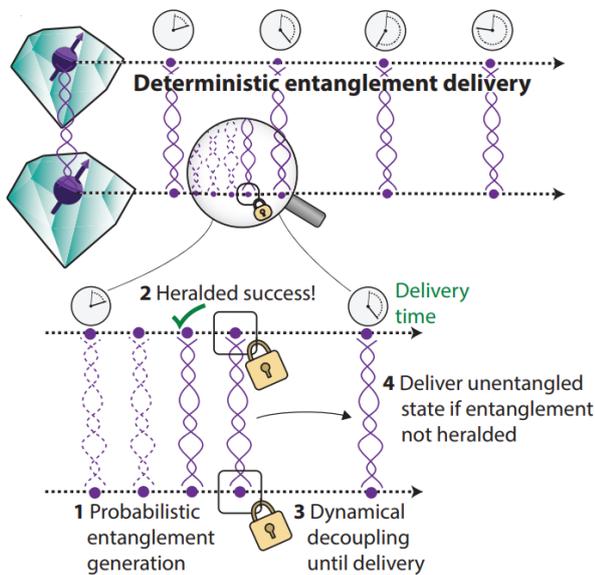


**Рис. 4.** Резонатор в виде полости квантовой электродинамики. Системные параметры:  $g$  – вакуумная частота Раби,  $\gamma$  – скорость спонтанного излучения, а  $\kappa_r$ ,  $\kappa_l$  и  $\kappa_t$  – соответственно скорости распада полости до отражения, передачи и потери. Диаграмма уровней лазера, резонатора и спина. Предполагается, что  $|1\rangle$  состояние спинов желательно взаимодействует с фотонами; взаимодействие с состоянием  $|0\rangle$  незначительно при  $\gamma \delta_{01}$ ,  $g$  [11]

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

который детерминированно обеспечивает удаленные запутанные соединения в заранее определенное время. В [7] было предложено как этот порог может быть преодолен на примере узлов спиновых кубитов в алмазе, разделенных на 2 метра, и использовании протокола геральдовой однофотонной запутанности, которая достигает скорости запутанности до 39 Гц, на три порядка превышающей ранее продемонстрированный двухфотонный протокол на этой платформе [2]. Эти результаты демонстрируют ключевой блок для расширенных квантовых сетей, раскрывая простор для распределения запутанности между необходимым в сети набором удаленных узлов.

Важнейшими параметрами для будущих квантовых сетей, базирующихся на запутанности, являются скорость  $\gamma_{ent}$  генерации запутанности между узлами и скорость декогеренции запутанного состояния  $\gamma_{dec}$ . Их соотношение, называемое квантовой эффективной связью  $\eta_{link} = \gamma_{ent}/\gamma_{dec}$ , количественно определяет, насколько эффективно запутанные состояния могут сохраняться в течение времени, необходимого для их создания [7]. Альтернативно, эффективность кана-



**Рис. 5.** Детерминированная передача запутанности гарантирует выход состояния со средней точностью запутанности, превышающей 0,5 в заданное время. В протоколе, лежащем в основе этого детерминированного подхода – это вероятностный, но объявленный (геральдовый) процесс запутанности. После неоднократных попыток запутывания, а затем, после объявления успеха, запутанное состояние защищается от декогеренции до намеченного времени передачи. В основе протокола детерминированной запутанности и сохранения состояний (шаги 1-3), компромисс между средней точностью доставленного запутанного состояния и вероятностью успеха определяется эффективностью квантовой связи  $\eta_{link}$  [7]

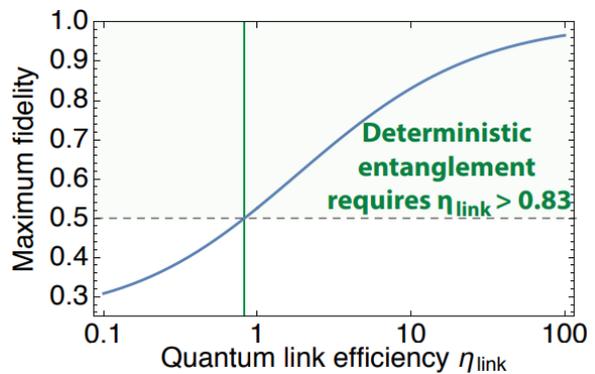
ла определяет среднее количество запутанных состояний, которые можно создать в течение времени жизни одного запутанного состояния. Таким образом, достижение эффективности  $\eta_{link} \sim 1$  представляет собой критический порог, за пределами которого запутанность может быть создана быстрее, чем она теряется. Превышение этого порога имеет решающее значение для разрешения создания и одновременного поддержания нескольких запутанных связей, как это требуется для распределения выбранного множества квантовых состояний в сети. При попытках создания запутанности за период  $t_{ent}$  кумулятивная вероятность успеха равна

$$p_{succ} = 1 - \exp\{-\gamma_{ent} \cdot t_{ent}\}.$$

Для данного  $p_{succ}$ , средняя точность  $F_{succ}$  успешно сгенерированных состояний определяется исключительно эффективной квантовой связью  $\eta_{link}$ . Элементарный протокол передачи запутанных состояний в заранее определенное время может быть реализован путем нескольких попыток создания запутывания, а затем успешной защиты созданного запутанного состояния от декогеренции (рис. 5, этапы 1, 2 и 3) [7]. Этот протокол позволяет передавать запутанные состояния в заданные моменты времени, но с конечной вероятностью успеха. При передаче незапутанного состояния (точность состояния  $F_{unent} \leq 1/2$ ) в циклах, в которых все попытки генерации запутанности не удалось, протокол может быть полностью «положен» в детерминированный черный ящик (рис. 5 шаг 4). Состояния, выходящие из такого черного ящика, будут иметь точность (достоверность) состояний Белла [7]:

$$F_{det} = p_{succ} F_{succ} + (1 - p_{succ}) F_{unent} \quad (3)$$

Максимально достижимая точность  $F_{det}^{max}$  этого детерминированного протокола передачи



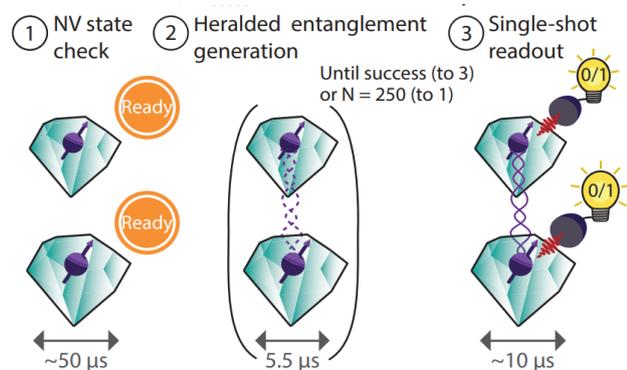
**Рис. 6.** На графике представлена максимальная точность детерминированных состояний в зависимости от  $\eta_{link}$ . Превышение критического порога  $\eta_{link} > 0,83$  обеспечивает вероятностный процесс детерминированным и состояние, в среднем, запутанным в каждом цикле [7]

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

состояний, найденная путем оптимизации  $p_{succ}$ , также определяется только эффективностью одной квантовой связи  $\eta_{link}$  [7].

За порогом  $\eta_{link} > 0,83$  (рисунк 6) существует комбинация  $p_{succ}$  и  $F_{succ}$ , достаточно высокая для компенсации тех циклов, в которых запутанность не геральдова, но допускающая детерминированную передачу состояний, но которые в среднем запутаны ( $F_{det}^{max} \geq 1/2$ ). Таким образом, демонстрация детерминированной передачи запутанности представляет собой эталон производительности сети, удостоверяющий, что эффективность квантового канала сети  $\eta_{link} = 1$  или выше. Кроме того, возможность заранее указать

время, в которое доставляются запутанные состояния, может помочь при разработке многоэтапных квантовых информационных задач, таких как маршрутизация запутанности. Азотные вакансии NV-центры, точечные дефекты в алмазе с долгоживущим спином электрона и яркие оптические переходы продемонстрировали скорости запутывания в десятки мГц, а в отдельных экспериментах скорости декогеренции  $\Gamma_{dec}$  порядка 1 Гц, что в совокупности дало бы  $\eta_{link} \sim 10^{-2}$ , В [7], реализуя альтернативный протокол запутывания для NV-центров, в котором успех геральдова состояния связан с обнаружением одиночного фотона, было достигнуто  $\eta_{link}$  значительно превышающее единицу. Недавние эксперименты подчеркнули потенциал таких однофотонных протоколов путем создания локальной запутанности и удаленной запутанности при пост-отборе (рисунк 7). Реализуя однофотонный протокол полностью объявленным, и защищая запутанность на основе динамической развязки (рисунк 8), была достигнута детерминированная передача удаленных запутанных состояний на частоте  $\sim 10$  Гц.



**Рис. 7.** Эталон однофотонного запутывания состоит из нескольких шагов:

- 1) Перед возникновением запутанности NV центр должен находиться в правильном зарядовом состоянии (NV-) и резонансном состоянии с лазером возбуждения. Для обеспечения этого используется проверка состояния NV и повторяется до тех пор, пока проверка не пройдет.
- 2) Генерация однофотонной запутанности предпринимается до тех пор, пока не будет объявлен геральдов успех, в этом случае продолжается считывание. Если 250 попыток были безуспешны, то возвращение к шагу 1.
- 3) При объявленном геральдовом успехе спиновые состояния считываются в выбранном базисе с использованием микроволн [7]

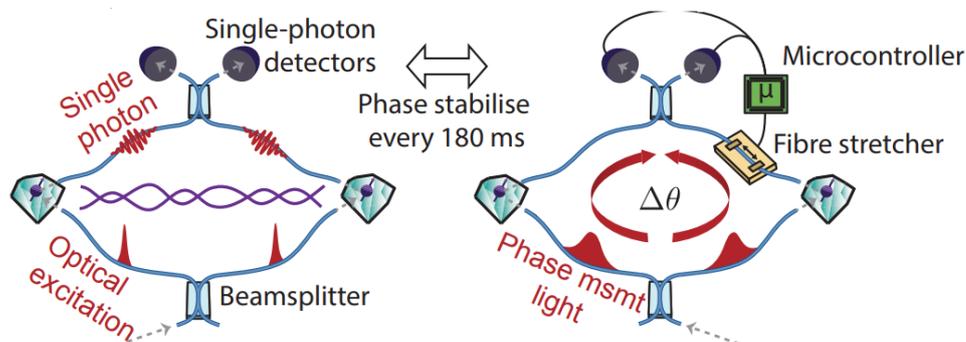
В эксперименте [7] использовались NV-центры, находящиеся в независимо работающих криостатах, разделенных двумя метрами. Используются кубиты, образованные двумя спиновыми подуровнями основного состояния NV-центра

$$(|\uparrow\rangle \equiv |m_s = 0\rangle, |\downarrow\rangle \equiv |m_s = -1\rangle).$$

Генерация однофотонной запутанности (рисунк 7) происходит путем первой инициализации каждого узла с  $|\uparrow\rangle$  оптической накачкой и последующим когерентным вращением, выполняемыми микроволновыми импульсами, с созданием в результате состояния

$$|NV\rangle = \sqrt{\alpha} |\uparrow\rangle + \sqrt{1-\alpha} |\downarrow\rangle.$$

Затем применяется резонансный лазерный свет для избирательного перевода «яркого» со-



**Рис. 8.** Генерация запутанности ↔ Стабилизация фазы. Оптическая разность фаз  $\Delta\theta$ , полученная в интерферометре, образованной двумя узлами, должна быть фиксирована. Стабилизация разности фаз в эксперименте производилась каждые 180 мс [7]

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

стояния  $|\uparrow\rangle$  в возбужденное состояние, которое быстро излучательно распадается обратно в основное состояние, испуская одиночный фотон. Это запутывает спиновое состояние NV. с наличием  $|1\rangle$  или отсутствием  $|0\rangle$  фотона в излучаемом оптическом режиме:

$$|NV, \text{optical mode}\rangle = \sqrt{\alpha} |\uparrow\rangle |1\rangle + \sqrt{1-\alpha} |\downarrow\rangle |0\rangle. \quad (4)$$

Испускаемые фотоны передаются на центральную станцию, в которой светоделитель используется для удаления информации о пути. Успешное обнаружение фотона на этой станции указывает, что хотя бы один из NV центров находится в состоянии яркого состояния  $|\uparrow\rangle$  и, следовательно, предвещает создание спин-спин запутанного состояния. Однако при регистрации одного фотона условная вероятность того, что другой NV также находится в состоянии  $|\uparrow\rangle$  с потерей фотона, дана  $p=\alpha$  (в пределе, когда эффективность регистрации фотонов  $p_{\text{det}} \ll 1$ ). Это деградирует объявленное максимально запутанное состояние Белла

$$|\psi\rangle = \sqrt{1/2} (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)$$

до

$$\rho_{NV, NV} = (1-\alpha) |\psi\rangle\langle\psi| + \alpha |\uparrow\uparrow\rangle\langle\uparrow\uparrow|. \quad (5)$$

Вероятность успешного объявления запутанности определяется, как  $2p_{\text{det}}\alpha$ . Следовательно, точность состояния  $F=1-\alpha$  может напрямую быть противопоставлена запутыванию. Таким образом, для заданной приемлемой неверности  $\alpha$  однофотонные протоколы обеспечат увеличение скорости в  $4\alpha/p_{\text{det}}$ . Например, для использованной системы  $p_{\text{det}} \sim 4 \times 10^{-4}$ , если допустима неверность в размере 10%, скорость может быть увеличена на три порядка по сравнению с двухфотонными протоколами.

Основная проблема в реализации однофотонной запутанности заключается в том, что

результатирующее запутанное состояние зависит от оптической фазы, приобретаемой лазерными импульсами, используемыми для создания спин-фотонной запутанности в каждом узле, а также фазы, которую приобретают испускаемые одиночные фотоны по мере их распространения (рисунки 8,9).

Поэтому экспериментальная установка действует как интерферометр от точки, в которой оптические импульсы расщепляются до точки, в которой излучаемые оптические моды интерферируют. С учетом полной оптической разности фаз  $\Delta\theta$  созданное запутанное состояние

$$|\psi_{0/1}(\Delta\theta)\rangle = 1/\sqrt{2} (|\uparrow\downarrow\rangle \pm e^{i\Delta\theta} |\downarrow\uparrow\rangle) \quad (6)$$

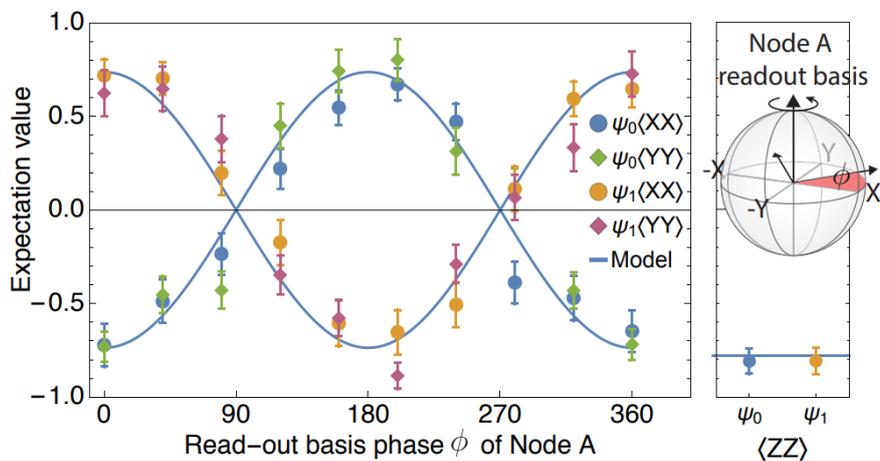
где 0/1 (с соответствующим  $\pm$  фазовым коэффициентом) обозначает, какой детектор на центральной станции детектирует падающий фотон. Эта оптическая разность фаз должна быть известна, чтобы гарантировать доступность запутанных состояний для дальнейшего использования.

Преодоление этой фазовой чувствительности запутанного состояния осуществляется с помощью чередования периодов оптико-фазовой стабилизации с генерацией запутанности, которое в эксперименте достигает средней установившейся фазы стабильности  $\sim 14,3$  град [7].

При малых  $\alpha$  точность достигает насыщения, поскольку скорость темного счета детектора становится сравнимой со скоростью детектирования.

Выбирая  $\alpha$  для максимизации точности, обнаруживается, что протокол позволяет генерировать запутанность с точностью 0,81 при  $\gamma_{\text{ent}}=6$  Гц (при  $\alpha=0,05$ ). Альтернативно, обменивая точность запутанности на скорость, можно создать запутанность при  $\gamma_{\text{ent}}=39$  Гц с помощью с ассоциированной точностью 0,60(2) ( $\alpha=0,3$ ) [7].

Для достижения достаточной эффективности



**Рис. 9.** Для  $\alpha=0,1$  отображены измеренные корреляции  $\langle XX \rangle$  и  $\langle YY \rangle$  (левая панель) для  $\psi_{0/1}$  (где 0/1 обозначает геральдовый детектор). На правой панели показаны измеренные корреляции  $\langle ZZ \rangle$  [7]

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

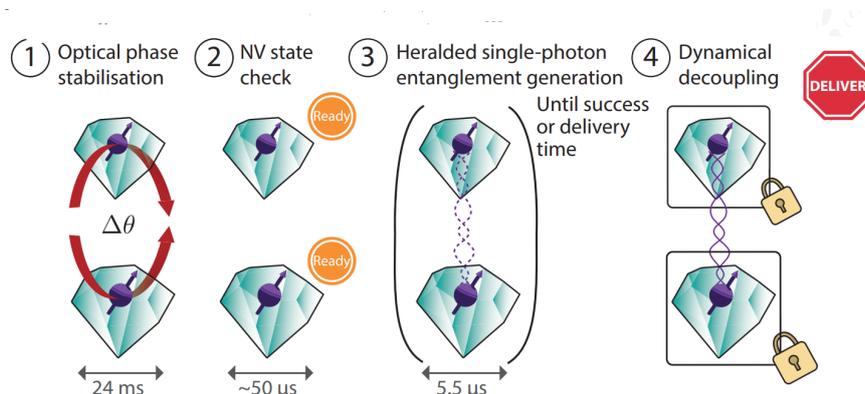
канала  $\eta_{\text{link}}$  и обеспечения детерминированной передачи запутанных состояний, протокол одиночных фотонов должен сочетаться с надежной защитой генерируемых удаленных запутанных состояний (рисунки 10). Достигать это надо тщательно экранировать NV от источников внешнего шума, включая остаточный лазерный свет и шум микроволнового усилителя, оставляя в качестве доминирующего шума медленно меняющееся магнитное поле, индуцированное окружающей средой. ядерной спиновой ванной. Уменьшение этого квазистатического шума можно, реализуя динамическую развязку на основе импульсных последовательностей XY8. Для исследования сохранения удаленных запутанных состояний включается динамическая развязка для различных продолжительностей времени после успешной генерации одиночного фотонного запутывания. Сочетание динамической развязки с протоколом однофотонной запутанности достигает квантовой эффективности  $\eta_{\text{link}} \sim 8$  (сопоставимо с опубликованным современным состоянием ионных ловушек,  $\eta_{\text{link}} \sim 5$  [7]). Платформа на базе NV значительно превосходит критический порог  $\eta_{\text{link}} \sim 0,83$ .

### 5. Спин-нейтрино интерфейс

Кроме фотона, как пилота дальней информации, в качестве очень важного кандидата, можно рассмотреть три-нейтрино  $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ , которые можно рассматривать в рамках  $D=4$ -мерной пространственной симметрии Пуанкаре-Лоренца, как неприводимое триплетное представление группы  $3 \in \text{SU}(3)_H$ - и  $\text{SL}(2, \mathbb{C})$  ( $\text{SO}(1,3)$ )-Дираковскими состояниями [12]. Другая воз-

можность рассмотреть тернарную горизонтальную группу  $\text{TSU}(3)_H$ , относительно которой эти три состояния связаны необычным зарядовым сопряжением, что позволяет объединить их в одно квантовое поле  $\psi = (\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$  [12]. Последнее потребует расширения пространства-времени, например, с соответствующим расширением группы симметрии  $D=6$  ( $D=12$ )-мерного пространства-времени, спонтанно нарушенной до симметрии  $D=4=1t+3s$  (в зависимости нейтрино двух- или 4-х компонентное) [12], что проявляется в иерархии масс 3-х кварк-лептонных поколений и, в частности, неравенстве масс нейтрино, которым и объясняется механизм возникновения осцилляций 3-х типов нейтрино. Возможное существование рассматриваемых горизонтальных симметрий с механизмом спонтанного нарушения открывает путь к квантовому запутыванию 3-х нейтринных состояний [12].

Для проверки этих идей нужно провести на протонных ускорителях сверхвысоких энергий эксперименты с образованием 3-х типов нейтрино и с дальнейшим прохождением длинных дистанций, проверить процессы исчезновения и трансформации нейтрино на пути следования в детектор с возможностью проверки по пути следования типы нейтрино-электронного, мюонного и тау-нейтрино. Заметим только, что если свет и электромагнитно заряженные частицы дают нам одну картину мира Вселенной, то сверхдальние 3-нейтрино могут открыть нам совершенно новые представления о ней, в частности, о ее геометрии. Эти вопросы мы планируем обсудить в следующих статьях.



**Рис. 10.** Передача детерминированной запутанности. Один цикл доставки детерминированной запутанности сочетает в себе следующие шаги:

- ① Оптическая фазовая стабилизация.
- ② Проверки состояния NV, повторяемые до тех пор, пока не будет обнаружено пороговое количество фотонов в каждом узле.
- ③ Попытки создания вероятностной запутанности.
- ④ После объявления успеха запутанности состояние защищено динамической развязкой до момента поставки [7]

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Литература

1. H. Bernien, B. Hensen, W. Pfaff, G. Koolstra, M.S. Blok, L. Robledo, T.H. Taminiau, M. Markham, D.J. Twitchen, L. Childress, R. Hanson // *Nature* 497, 86 (2013).
2. Pfaff W. et al. Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits // *Science* 345, 532-535 (2014).
3. Reiserer A., Rempe G. Cavity-based quantum networks with single atoms and optical photons // *Rev. Mod. Phys.* 87, 1379-1418 (2015).
4. Волков Г.Г., Смуров С.В. Спин-электронные и ядерные кубиты. Квантовое запутывание NV-центров алмаз // *Известия Института инженерной физики*, 2017. №2(44). С.40-50.
5. Смуров С.В., Масликов А.А., Волков Г.Г. Идеи и методы генерации запутывания твердотельных спин-кубитов // *Известия Института инженерной физики*, 2019. №1(51). С.58-67.
6. Волков Г.Г., Масликов А.А., Смуров С.В., Царьков А.Н. От геральдового запутывания к безусловной телепортации // *Известия Института инженерной физики*, 2019. №3(5). С.73-81.
7. P.C. Humphreys et al. Deterministic delivery of remote entanglement on a quantum network // *Nature* 558, 268 (2018), ArXiv:1712.07567v2 [quant-ph] 2018.
8. Волков Г.Г., Масликов А.А., Смуров С.В., Царьков А.Н. О многокубитных схемах запутывания и телепортации на основе NV-центров в алмазе // *Известия Института инженерной физики*, 2019. №2(52). С.103-105.
9. Смуров С.В., Волков Г.Г. Особенности квантовых состояний NV-центров в нелокальности запутанности и телепортации // *Известия Института инженерной физики*, 2023. №2(68). С.49-58.
10. Y. Zheng, H. Sharma, J. Borregaard. Entanglement distribution with minimal memory requirements using time-bin photonic qudits // ArXiv:2210.16540v2 [quant-ph] 10 Nov 2022.
11. Tutorial: Remote entanglement protocols for stationary qubits with photonic interfaces H. K.S. Beukers, M. Pasini, H.Choi, D. Englund, R. Hanson, and J.Borregaard1 // ArXiv:2310.19878v1 [quant-ph] 30 Oct. 2023.
12. Волков Г.Г. Geometry of Majorana neutrino and new symmetries // arXiv:hep-ph/0607334 (hep-ph) 30 Jul. 2006.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК: 004.056

## ПЛАТФОРМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЛОЖНЫХ ЦЕЛЕЙ КАК ЧАСТЬ ЭШЕЛОНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ PLATFORM FOR CREATING A DISTRIBUTED INFRASTRUCTURE OF DECOYS AS PART OF A LAYERED DEFENSE SYSTEM

**Александр Михайлович Тихонов**

аспирант

Финансовый университет при Правительстве РФ

руководитель группы

ООО «Наумен консалтинг»

Адрес: 109147, Москва, ул. Воронцовская, д. 35б, к. 3

Тел.: +7 (915) 360-88-08

e-mail: amtihonov@bk.ru



### Аннотация

В статье рассматривается построение комплексной эшелонированной защиты с добавлением технологии обмана злоумышленника с помощью Deception Platform. Объясняется основной принцип построения эшелонированной системы защиты, роль Deception Platform в составе средств защиты, методы противодействия атакам злоумышленников. Приводятся методика и математическая модель по выявлению необходимого количества ловушек и приманок.

**Ключевые слова:** эшелонированная защита, информационная безопасность, методы построения Deception Platform.

### Summary

The article discusses the construction of a comprehensive deep-layered security system with the addition of technology to deceive an attacker (Deception Platform). The basic methods for building a layered protection system, the role of the Deception Platform as a part of it, and methods for countering attacks are explained. The methodology for identifying the required number of traps and decoys is given.

**Keywords:** defense in depth, information security, methods for constructing the Deception Platform.

### Проблема и метод решения

**Проблема:** основной проблемой, на решение которой нацелена статья, является несовершенство современных средств обнаружения злоумышленника с помощью использования методики классической эшелонированной защиты. При включении в состав комплексной эшелонированной защиты системы распределенной инфраструктуры ложных целей (Deception Platform), качество защиты может как возрасти, так и ухудшится, в зависимости от выбранного состава ловушек и приманок, а также от их количества. В статье приводится способ определения необходимого и достаточного количества ловушек и приманок для эффективного выявления и противодействия злоумышленнику.

**Метод решения проблемы:** анализ инфраструктуры организации, подбор ловушек и приманок необходимого количества и состава исходя из инфраструктуры.

### Введение

Актуальным направлением развития эшелонированных систем защиты в настоящее время считается создание распределенной инфраструктуры ложных целей (Deception Platform), позволяющей построить проактивную защиту внутри сети организации благодаря инфраструктуре ложных целей, состоящих из ловушек и приманок [1-3]. По сути, системы Deception – это централизованно управляемые системы для организаций, предназначенные для создания, распространения и управления всей обманчивой средой и связанными с ней архитектурными элементами, которые часто виртуализируются и по существу неотличимы от реальных активов и используются в качестве приманки для привлечения и обнаружения злоумышленника [4]. Используя такие ловушки, организация получает возможность быстрее детектировать злоумышленника во время реализации направленных

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

атак, которые не были отслежены превентивными средствами защиты, например, межсетевыми экранами, антивирусным программным обеспечением, системами обнаружения и предотвращения вторжений. Технология базируется на известной концепции построения сетей ложных активов Honeypot (ловушки) [5-12], но имеет принципиально другой уровень реализации и имеет следующие отличия (рисунк 1) [13].

### Определение состава ловушек и приманок

Чтобы правильно использовать инструменты, которые предлагает платформа, нужно разобраться, какими бывают ловушки и приманки. Ловушки бывают нескольких видов, например серверные, сервисные, пользовательские (клиентские) [4-13].

Серверные ловушки располагаются в сети и видны в качестве отдельных серверов. Например, это может быть сервер Tomcat, который располагается внутри сети, либо это могут быть сервера VPN или Outlook, которые располагаются в демилитаризованной зоне. Эти сервера должны быть неотличимы от настоящих, располагаться по очевидному адресу, чтобы злоумышленник мог их найти, и с ними должна быть возможность взаимодействовать.

Сервисные ловушки нужны для имитации тех сервисов, которые реально используются или могли бы быть использованы в организации. Например, к числу таких сервисов можно отнести SSH, RDP, TELNET, ICMP и так далее. Во многом сервисные ловушки являются неотъемлемой частью серверных ловушек. Например,

злоумышленник подключился к серверу Tomcat с помощью браузера, увидев открытый порт 8080. Попытался перебрать известные ему логины и пароли, но они не подошли. Далее злоумышленник пытается подключиться к серверу через открытый сервис SSH получает к нему доступ. Все действия злоумышленника на ловушке фиксируются и передаются команде защиты.

Клиентские ловушки – служат для имитации пользователей. К числу таких ловушек можно отнести клиентские машины, которые находятся внутри сети и имитируют реальных пользователей. Например, ловушка NBNS client, которая имитирует Windows и рассылает по внутренней сети запросы, реализуя защиту от атак типа NBNS Poisoning. В случае ответа злоумышленника на этот запрос, ловушка информирует о его присутствии, действиях и местонахождении. К клиентскому типу ловушек можно отнести созданные mail адреса, которые могут быть выложены в открытый доступ и позволят получить информацию в том случае, если на них придет письмо. Злоумышленники, реализующие направленные фишинг атаки, могут использовать данные о сотрудниках, хранящиеся в общедоступной сети интернет, благодаря чему делать таргетные рассылки. Ловушка позволяет узнать о проводимой фишинг атаке, получив во время её проведения опасное сообщение, и уведомив об этом команду защиты. Такая рассылка, при должной подготовке, может не попасть в систему антиспама, определить её без почтовых ловушек может быть проблематично [14,15].

Что касается приманок, то это, как правило,

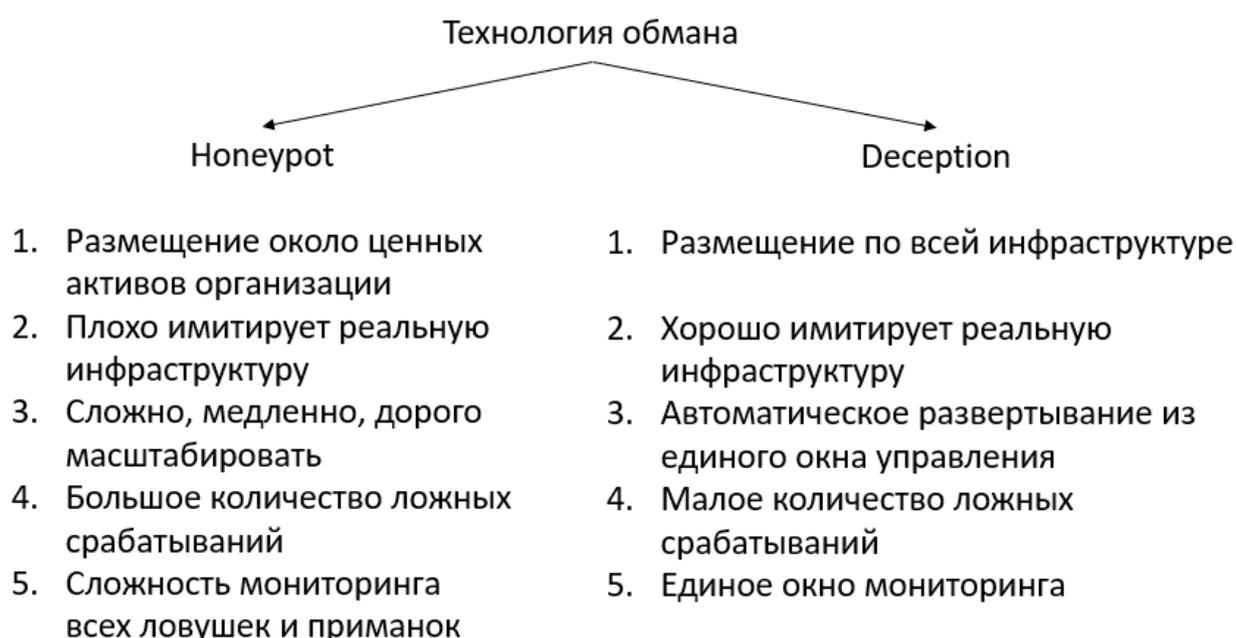


Рис. 1. Различия Honeypot и Deception

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

файлы, пароли или отдельные данные, которые не несут в себе действительную ценность, но помогают справиться с атакой. Например, к их числу можно отнести файлы-приманки типа Word или Excel, при взаимодействии с которыми будет отправлено оповещение службе безопасности, или логины с паролями, которые будут распределены внутри сети, а их использование во внутренних системах приведет к срабатыванию Desception Platform.

### Определение количества ловушек и приманок

Таким образом получается, что есть различные ловушки и приманки, которые нужно размещать в достаточном, но не чрезмерном количестве в организации. Автором предлагается общая методика по определению количества ловушек и приманок, которая может быть использована для компаний разного размера (рисунк 2). Цель методики – определить достаточный состав и количество ловушек и приманок, чтобы обеспечить обнаружение злоумышленника при совершении им не более 5 боковых перемещений внутри сети с вероятностью не менее 90%.

Рассмотрим методику по шагам А-Г.

А) Количество серверных ловушек напрямую зависит от реального количества используемых серверов. Предлагается использовать 1 сервер-ловушку для каждого обычного сервера. Значительное увеличение этого количества может негативно повлиять на защиту – злоумышленник поймет исходя из количества серверов о находящихся в сети ловушках. В инфраструктуре организации могут находиться сервера, представляющие особую ценность, сбой в работе которых или утечка данных, из которых может привести к значительным рискам [16]. Для этого вводится коэффициент  $k$ , который может варьироваться в значениях от 1 до 3, в зависимости от степени

важности сервера и необходимости увеличения количества серверных ловушек для него. Если сервер обычный, то коэффициент равен 1, если сервер критически важен, коэффициент может быть увеличен до 3. Необходимое и достаточное количество серверов-ловушек можно представить следующей формулой:

$$N_{\text{сервл}} = \left( \sum_{i=1}^G (N_{\text{лдсерв}} * k)_i \right), \quad (1)$$

где  $N_{\text{лдсерв}}$  – количество ловушек для сервера  $i$  без учета коэффициента степени необходимой защиты;

$G$  – общее количество серверов;

$k$  – коэффициент степени необходимой защиты.

Б) Количество сервисных ловушек зависит от количества реально и потенциально используемых сервисов, а также от количества устройств, с которыми эти сервисы могут работать. Стоит отметить, что использовать одновременно все ловушки-сервисы на одной машине может быть не очень эффективно. Для взаимодействия с ловушкой, должны быть доступны хотя бы 1-2 сервиса. При размещении сервисов на ловушках, которые могут имитировать как обычные активы, так и ключевые, автор предлагает аналогично ввести коэффициент  $k$ , который позволит регулировать коэффициент степени необходимой защиты. В данном случае значение коэффициента  $k$  может варьироваться от 1 до 2 в зависимости от необходимой степени защиты.

Таким образом, сумма сервисных ловушек будет равна сумме ловушек для каждого сервиса, которые могут друг от друга отличаться и зависеть от специфики инфраструктуры:

$$N_{\text{сервисл}} = \left( \sum_{i=1}^R (N_{\text{лдс}} * k)_i \right), \quad (2)$$

где  $N_{\text{лдс}}$  – количество ловушек для сервиса без

### Методика определения состава ловушек и приманок

- 1 Оценить состав и количество имеющиеся активов (серверы, сервисы), количество сотрудников, пользователей и критически важных файлов.
- 2 Исходя из определенного на предыдущем этапе количества серверов, сервисов, пользователей и критически важных файлов требуется определить количество серверов-ловушек (методика описана в А), сервисов-ловушек (Б), клиентских ловушек (В), файлов-приманок (Г)
- 3 Разместить ловушки и приманки в соответствии с описанной ниже рекомендацией.

Рис. 2. Методика определения состава ловушек и приманок

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

учета коэффициента степени необходимой защиты;

R – количество сервисов;

k – коэффициент степени необходимой защиты.

В) Количество клиентских ловушек напрямую зависит от количества сотрудников и пользователей в сети. Если цель предотвратить фишинг атаку, то генерация в пропорции 5 ложных почт к 95 настоящим может быть достаточна при условии, что эта почта будет легко доступна. Объясняется это тем, что при условии доступности данных злоумышленнику, он не станет ими пренебрегать и при переборе всех почт задействует в том числе почту-ловушку. Если цель противодействовать атаке внутри, создавая клиентские машины, которые имитируют работу реальных пользователей в сети, то можно использовать 2 ловушки на 8 пользователей сети (исследование эффективности предлагаемого количества описано в следующем разделе):

$$N_{\text{кл}} = \sum_{i=1}^S (N_{\text{ккл}})i, \quad (3)$$

где S – количество видов (почтовые или клиентские машины) клиентских ловушек в организации;

$N_{\text{ккл}}^i$  – количество клиентских ловушек конкретного вида.

Г) Количество приманок также зависит от количества сотрудников и от количества важных файлов, которые хранятся в организации. Все критически важные файлы должны содержать как минимум по одной приманке, каждая из которых будет находиться на той же машине, что и настоящий файл. Дополнительное размещение приманок важных файлов на других машинах может улучшить защиту. Приманки типа HoneyToken (ложные логины и пароли, которые при использовании выявляют злоумышленника) зависят в большей степени от количества пользователей [17]. Злоумышленнику интереснее получить доступ к данным, которые помогут ему продвинуться дальше в сети, поэтому имеет смысл оставлять данные, похожие на те, что могут привести в итоге к получению повышенных прав. Целесообразно генерировать не более одной приманки типа HoneyToken на 10 сотрудников, так как обнаружив в сети учетные данные администратора сети, злоумышленник постарается их использовать.

Итак, общее количество ловушек и приманок, которые могут потребоваться для создания защиты в организации, можно представить в виде следующей формулы:

$$N_{\text{окл}} = N_{\text{пр}} + N_{\text{сервл}} + N_{\text{сервисл}} + N_{\text{кл}} \quad (4)$$

где  $N_{\text{окл}}$  – общее количество ловушек и приманок;

$N_{\text{пр}}$  – количество приманок;

$N_{\text{сервл}}$  – количество серверных ловушек;

$N_{\text{сервисл}}$  – количество сервисных ловушек;

$N_{\text{кл}}$  – количество клиентских ловушек.

Полученная формула позволяет определить количество ловушек и приманок в сети, достаточных для создания качественной защиты в организации. Рассчитанное на этом этапе количество ловушек и приманок необходимо распределить в сети, чтобы максимизировать вероятность взаимодействия с ними злоумышленника.

### Рекомендации по размещению ловушек и приманок

После определения состава и количества ловушек и приманок требуется организовать их корректное размещение во внутренней сети. Рекомендации по размещению следующие:

1) Серверные ловушки должны быть размещены рядом с настоящими серверами. Рядом с каждым настоящим сервером должны находиться от 1 до 3 серверов-ловушек, в соответствии с формулой, приведенной выше в статье.

2) Сервисные ловушки должны быть распределены между клиентскими машинами ловушками и ловушками серверами. На каждом сервере и клиенте ловушке должно находиться не менее 1 сервиса ловушки.

3) Клиентские ловушки (машины) должны быть равномерно распределены по всей внутренней сети организации, они должны быть легко доступны для изучения злоумышленником. Ловушки-почты не должны дублировать настоящие почтовые адреса сотрудников, должны быть выложены на общедоступных ресурсах сети Интернет и быть интересны злоумышленнику для использования.

4) Приманки должны быть распределены по внутренней сети организации таким образом, чтобы каждый находящийся в сети критически важный файл был продублирован файлом приманкой на той же машине.

Таким образом, злоумышленник практически на каждом этапе развития своей атаки способен столкнуться с ловушкой или приманкой, благодаря чему раскрывает себя и показывает потенциал своей атаки, траекторию развития (рисунок 3).

### Вероятность обнаружения злоумышленника с помощью приведенной методики

Легко показать, что вероятность обнаружения злоумышленника с помощью Deception Platform можно рассчитать следующим образом:

$$P_{\text{обнаружения}} = 1 - (1 - P_{\text{ложпоч}}) * (1 - P_{\text{дтлз}}) * (1 - P_{\text{внутрост}}) * (1 - P_{\text{бокпернеч}}) * (1 - P_{\text{конност}}), \quad (5)$$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

где  $P_{\text{ложпоч}}$  – вероятность обнаружения с помощью приманок в виде почтовых адресов;

$P_{\text{dmz}}$  – вероятность обнаружения с помощью ложных серверов и сервисов в демилитаризованной зоне;

$P_{\text{внутрхост}}$  – вероятность обнаружения при первичном попадании злоумышленника во внутреннюю сеть (попадание сразу на ловушку);

$P_{\text{kбокперемещ}}$  – вероятность обнаружения при совершении  $k$  боковых перемещений;

$P_{\text{конхост}}$  – вероятность обнаружения на конечном хосте с помощью приманок при взаимодействии с  $l$  файлами.

Предположение:

$P_{\text{ложпоч}}$  – на каждые 95 настоящих мейл адресов, предлагается использовать 5 ложных адресов, доступных для нахождения злоумышленником на этапе сбора информации. Таким образом,  $P_{\text{ложпоч}} = 0,05$ ;

$P_{\text{dmz}}$  – для каждого сервера в демилитаризованной зоне создается 1 ложный сервер с необходимыми для подключения к нему сервисами. Таким образом,  $P_{\text{dmz}} = 0,5$ ;

$P_{\text{внутрхост}}$  – на каждые  $4n$  хостов внутренней

сети создается  $n$  хостов ловушек, вероятность обнаружения при первичном попадании злоумышленника во внутреннюю сеть  $P_{\text{внутрхост}} = 0,2$ ;

$P_{\text{kбокперемещ}}$  – предполагается:

1) Злоумышленник при боковом перемещении всегда переходит на новый хост.

2) Число боковых перемещений  $k$  меньше  $4n$  так как при  $k$  равном или большем  $4n$  вероятность обнаружения будет равна 1.

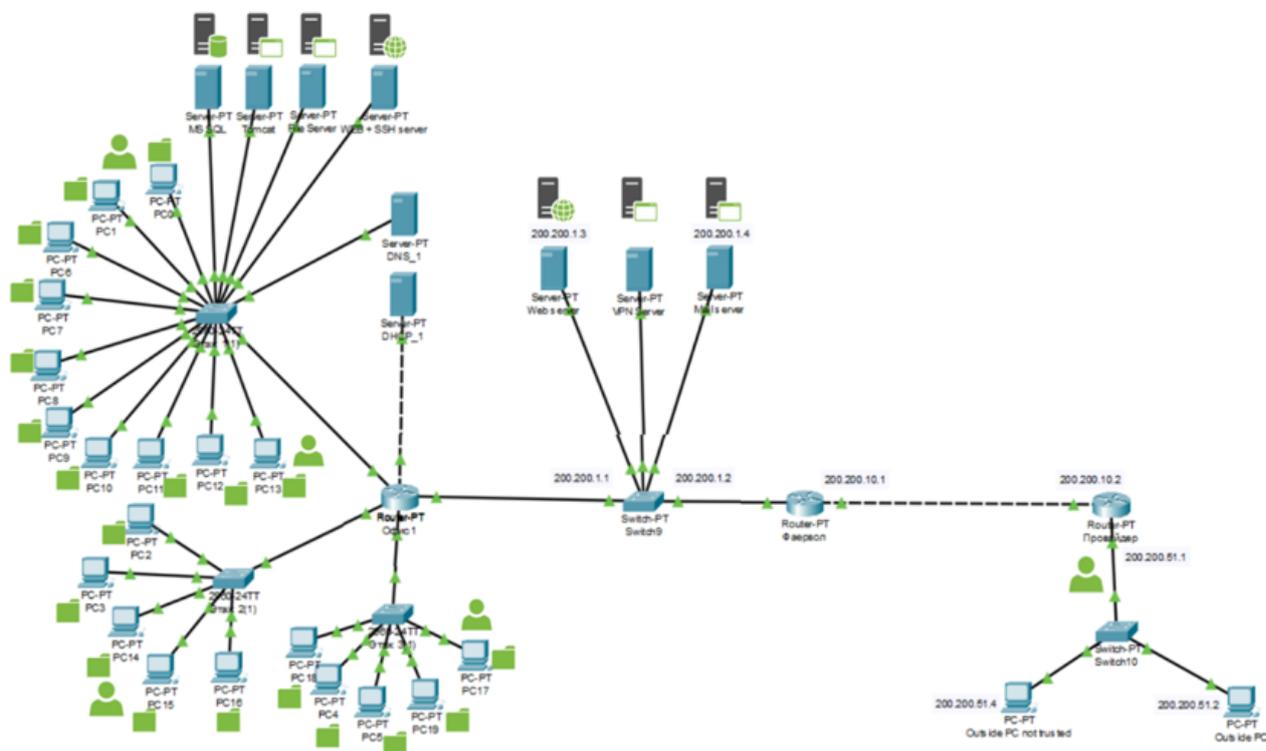
Вероятность обнаружения на первом перемещении:  $\frac{n}{5n-1}$

Вероятность обнаружения на втором перемещении, при условии необнаружения на прошлом перемещении:  $(1 - \frac{n}{5n-1}) * \frac{n}{5n-2}$

Вероятность обнаружения на третьем перемещении, при условии необнаружения на прошлых перемещениях:  $(1 - \frac{n}{5n-1}) * (1 - \frac{n}{5n-2}) * \frac{n}{5n-3}$

Тогда общую вероятность обнаружения при боковом перемещении можно вывести следующим образом:

$$P_{\text{kбокперемещ}} = \sum_{i=1}^k \left( \frac{n}{5n-i} * \prod_{j=1}^{i-1} \left( 1 - \frac{n}{5n-j} \right) \right), \quad (6)$$



**Настоящая инфраструктура:**  
 20 пользователей,  
 20 почт сотрудников,  
 7 серверов,  
 40 критически важных файлов

**Ложная инфраструктура:**  
 4 клиентские ловушки машины,  
 1 почта ловушка,  
 7 ловушек серверов,  
 40 файлов приманок

Рис. 3. Пример размещения ловушек и приманок в сети

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Таблица 1**  
Вероятность обнаружения

k	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{\text{кбокперемещ}}$	0,22	0,42	0,58	0,72	0,83	0,92	0,97	1

Приведем вероятность обнаружения в табличном виде на частном случае при  $n=2$  за  $k$  перемещений, такому случаю соответствуют 8 настоящих хостов и 2 хоста-ловушки (таблица 1).

$P_{\text{иконхост}}$  – на каждый 1 файл, содержащий критически важную информацию, создается 1 файл-приманка. В случае, если количество критически важных файлов –  $m$ , тогда общее количество файлов, включая ловушки, равно  $2m$ . При взаимодействии с первым файлом  $P_{\text{иконхост}} = 0,5$ . Предполагается, что число  $m$  не превышает общее число файлов, содержащих критически важную информацию.

Вероятность обнаружения при взаимодействии с первым файлом:  $m/2m$ .

Вероятность обнаружения при взаимодействии со вторым файлом, при условии необнаружения при взаимодействии с первым файлом:

$$\left(1 - \frac{m}{2m}\right) * \frac{m}{2m-1}$$

Вероятность обнаружения при взаимодействии со вторым файлом, при условии необнаружения при взаимодействии со вторым файлом:

$$\left(1 - \frac{m}{2m}\right) * \left(1 - \frac{m}{2m-1}\right) * \frac{m}{2m-2}$$

Тогда общую вероятность обнаружения при взаимодействии с  $l$  файлами можно вывести следующим образом:

$$P_{\text{иконхост}} = \sum_{i=0}^{l-1} \left( \frac{m}{2m-i} * \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{m}{2m-j}\right) \right), \quad (7)$$

Приведем вероятность обнаружения в та-

бличном виде на частном случае при  $m=5$  при взаимодействии с  $l$  файлами, такому случаю соответствуют 5 настоящих файлов и 5 файлов-ловушек (таблица 2).

Таким образом, с учетом описанных выше предположений, получаем следующую формулу:

$$P_{\text{обнаружения}} = 1 - (1 - P_{\text{ложпоч}}) * (1 - P_{\text{дтз}}) * (1 - P_{\text{внутрхост}}) * (1 - P_{\text{кбокперемещ}}) * (1 - P_{\text{иконхост}}) = 1 - 0,95 * 0,5 * 0,8 * \left(1 - \sum_{i=1}^k \left(\frac{n}{5n-i} * \prod_{j=1}^{i-1} \left(1 - \frac{n}{5n-j}\right)\right)\right) * \left(1 - \sum_{i=0}^{l-1} \left(\frac{m}{2m-i} * \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{m}{2m-j}\right)\right)\right) \quad (8)$$

При условии, что злоумышленник проник во внутреннюю сеть не собирая почтовые адреса в открытой сети и не совершая по ним рассылку, а также, не взаимодействуя с серверами в демилитаризованной зоне, вероятность обнаружения во внутренней сети с помощью ловушек и приманок при  $n=2$  и  $m=5$  будет:

$$P_{\text{обнаружения}} = 1 - (1 - P_{\text{внутрхост}}) * (1 - P_{\text{кбокперемещ}}) * (1 - P_{\text{иконхост}}) = 1 - 0,8 * \left(1 - \sum_{i=1}^k \left(\frac{n}{5n-i} * \prod_{j=1}^{i-1} \left(1 - \frac{n}{5n-j}\right)\right)\right) * \left(1 - \sum_{i=0}^{l-1} \left(\frac{m}{2m-i} * \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{m}{2m-j}\right)\right)\right) \quad (9)$$

Приведем таблицу  $P_{\text{обнаружения}}(k;l)$  (таблица 3).

Таким образом можно сделать вывод, что предложенная математическая модель по определению состава и количества ловушек и приманок позволяет с большой долей вероятности выявить злоумышленника даже в том случае, если он уже находится во внутренней сети, минуя исследование демилитаризованной зоны и не используя информацию из открытых источников о почтовых адресах организации.

**Таблица 2**

Вероятность обнаружения

l	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{иконхост}}$	0,5	0,78	0,92	0,98	0,996	1

**Таблица 3**

Вероятность обнаружения

k \ l	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,688	0,768	0,832	0,888	0,932	0,968	0,988	1
2	0,863	0,898	0,926	0,951	0,970	0,986	0,995	1
3	0,950	0,963	0,973	0,982	0,989	0,995	0,998	1
4	0,988	0,991	0,993	0,996	0,997	0,9987	0,9995	1
5	0,998	0,998	0,9987	0,9991	0,9995	0,9997	0,9999	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Заключение

В работе была предложена методика по определению состава и количества ловушек и приманок в сети организации. К методике предъявлялись требования, в рамках которых она должна была гарантировать выявление злоумышленника с вероятностью не менее 90% при совершении им не более 5 боковых перемещений внутри сети. С поставленными требованиями предложенная методика защиты справляется даже при условии, что злоумышленник не взаимодействовал с демилитаризованной зоной и не использовал фишинговую рассылку во время реализации атаки. Для организации такой защиты были предложены рекомендации. Таким образом можно заключить, что Description Platform при наличии необходимого и достаточного количества ловушек и приманок, а также верному их размещению внутри сети, способна эффективно противодействовать злоумышленнику.

### Литература

1. Кибербезопасность цифровой индустрии. Теория и практика функциональной устойчивости к кибератакам / Под ред. Зегжда Д.П. и др. М.: Горячая линия, 2021. 560 с.
2. Alsaqour R., Majrashi A.. Defense in Depth: Multilayer of Security // International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS), 2021, Vol. 13, No. 2. Pp. 242-248.
3. Özcan H.O., Çolak İ., Erimhan S., Güneş V., Abut F., Akay F. SOBE: a Fraud Detection Platform in Insurance Industry // Kocaeli Journal of Science and Engineering. 2022. Т. 5. № ICOLES2021 Special Issue. Pp.25-31.
4. Путьто М.М., Макарян А.С., Чич Ш.М., Маркова В.К. Исследование применения технологии Description для предотвращения угроз кибербезопасности // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2020. №4(52). С. 85-98.
5. Алейнов Ю. В. Обнаружение атак направленного типа в компьютерных сетях при помощи ложных сетевых объектов // Информационное противодействие угрозам терроризма, 2015. №24. С. 52-57.
6. Вишневский А.С. Обманная система для выявления хакерских атак, основанная на анализе поведения посетителей веб-сайтов // Вопросы кибербезопасности, 2018. №3(27). С.54-62.
7. Ворончихин И.С., Иванов И.И., Максимов Р.В., Соколовский С.П. Маскирование структуры распределенных информационных систем в киберпространстве // Вопросы кибербезопасности, 2019. №6(34). С.92-101.
8. Горбачев А.А. Модель и параметрическая оптимизация проактивной защиты сервиса электронной почты от сетевой разведки // Вопросы кибербезопасности, 2022. №3(49). С. 69-81.
9. Нижниковский А.В., Наконечный Б.М., Сморгачев Е.М. Механизм функционирования ложных сетевых информационных объектов в локальных вычислительных сетях // Известия Института инженерной физики, 2011. №3(21). С. 7-10.
10. Стародубцев П.Е., Бухаров Е.О., Кудря Р.А., Смирнов Я.Д. Определение основных возможностей нарушителя безопасности информационных систем путем включения в топологию сети ложных сетевых информационных объектов // Известия Института инженерной физики, 2019. №2(52). С. 64-70.
11. Шматова Е.С. Выбор стратегии ложной информационной системы на основе модели теории игр // Вопросы кибербезопасности, 2015. №5(13). С. 36-40.
12. Язов Ю.К., Сердечный А.А., Шаров И.А. Методический подход к оцениванию эффективности ложных информационных систем // Вопросы кибербезопасности, 2014. №1(2). С. 55-60.
13. Тихонов А.М. Description platform как часть эшелонированной системы защиты. В сборнике: «Безопасные информационные технологии». Сборник трудов Двенадцатой международной научно-технической конференции, 2023. С. 141-145.
14. Dorofeev A.V., Markov A.S. Conducting cyber exercises based on the information security threat mode // CEUR Workshop Proceedings, 2021. Vol. 3057. Pp. 1-10.
15. Dorofeev A.V., Markov A.S., Rautkin Y.V. Ethical hacking training // CEUR Workshop Proceedings, 2019. Vol. 2522. Pp. 47-56.
16. Probabilistic Modeling in System Engineering/ By ed. A. Kostogryzov. London: IntechOpen, 2018. 278 p.
17. Akiyama M., Yagi T., Hariu T., Kadobayashi Y. Honeycirculator: distributing credential honeytoken for introspection of web-based attack cycle // International Journal of Information Security, 2018. Vol. 17. №2. Pp. 135-151.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056

## ЭКСПЕРТНЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СОБЫТИЯ EXPERT MODELS FOR ASSESSING THE PROBABILITY OF AN EVENT OCCURRING

**Елена Павловна Бутрина**

начальник ОСПО

АНО «Институт инженерной физики»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,

Большой Ударный переулок, д. 1а

Тел.: +7 (916) 245-98-82

E-mail: kenga48@yandex.ru

**Владимир Петрович Олейников**

кандидат физико-математических наук, доцент

старший эксперт ОСПО

АНО «Институт инженерной физики»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,

Большой Ударный переулок, д. 1а

Тел.: 8 (916) 576-18-39

E-mail: vpoleinikov@mail.ru

### Аннотация

Статья посвящена моделированию распределения вероятности реализации события путем опроса эксперта. При этом эксперту задается только два вопроса – об ожидаемом им значении  $r_0$  вероятности реализации события и степени уверенности с эксперта в этом значении. Разработаны такие двухпараметрические модели распределения, базовые в том смысле, что они учитывают основные требования в форме такого распределения.

**Ключевые слова:** защищенность объекта, угроза, уязвимость, модель атаки, модель угрозы.

### Summary

The article is devoted to modeling the probability distribution of an event by interviewing an expert. In this case, the expert is asked only two questions - about the expected value  $r_0$  of the probability of the event occurring and the degree of confidence of the expert in this value. Such two-parameter distribution models have been developed, basic in the sense that they take into account the basic requirements in the form of such a distribution.

**Key words:** object security, threat, vulnerability, attack model, threat model.

### Вероятность реализации события Неопределенность события

Принципиальной особенностью событий считается их неопределенность – событие может реализоваться, а может и нет. Поэтому индикатор  $I$  события  $X$  есть случайная величина, принимающая два значения – ИСТИНА (событие  $X$  реализовалось) и ЛОЖЬ (событие  $X$  не реализовалось). Её можно рассматривать и как булеву переменную, равную 1, если событие произошло, и 0, если нет. Эта двойственность используется в ОЛВМ (общий логико-вероятностный метод) для обеспечения формального перехода от структуры события (СФС) к вероятностной функции системы (ВФС) [4].

Будучи случайной величиной, индикатор характеризуется числовой величиной  $P(X) \in [0; 1]$  – вероятностью реализации [события  $X$ ], которые связаны соотношением  $P(X) = E(I(X)) = r$ . То есть, вероятность события  $X$  равна математическому ожиданию случайной величины  $I(X)$ . Таким образом, индикатор события моделируется

как дискретная случайная величина (ДСВ), принимающая два значения: 1 с вероятностью  $r$  и 0 с вероятностью  $q = 1 - r$ .

Но и сама вероятность  $r$  реализации события (например, угрозы) есть величина неопределенная. К настоящему времени выработано несколько подходов для работы с такими величинами – статистический подход, нечеткие множества, теория возможностей и др.

Применение теории нечетких множеств и субъективной вероятности позволяет формализовать неоднозначность и неопределенность используемых значений. О вероятности говорят, когда можно произвести измерение, если же это неосуществимо, то оценивают возможность. В математике разработаны как теория возможностей, так и теория вероятностей – и это различные теории.

Реальные числовые значения любых параметров всегда известны с некоторой конечной точностью. Этот неоспоримый факт лежит в основе теории погрешностей и ошибок, а также интер-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

вальной математики. Чаще всего предполагается, что неизвестное точное значение параметра  $a$  лежит в некотором диапазоне:  $a \in [a_1; a_2]$ , где  $a_1$  и  $a_2$  – минимальное и максимальное значения. В этой двухпараметрической модели за значение параметра обычно принимается середина диапазона  $a_{cp} = (a_1 + a_2)/2$ , а полуразмах  $\Delta a = (a_2 - a_1)/2$  служит мерой погрешности в задании значения  $a$ .

Во многих задачах двухпараметрическая модель неопределенности является слишком грубой и не отражает действительного положения вещей. Сравнение моделей распределения вероятности реализации элементарного события (ЭС) показывает, что многие из них требуют задания до 4-х параметров.

### Пример задания распределения: управление проектами

В методе PERT [13] в управлении проектами длительность выполнения работы описывается ещё и её наиболее вероятным значением  $a_3$ , где  $a_1 \leq a_3 \leq a_2$ . Эти три значения используются для расчета среднего времени выполнения работы по формуле  $a_{cp} = (a_1 + 4 \cdot a_3 + a_2)/6$  и его среднеквадратичного отклонения  $\sigma = R/D$ , где дисперсия вычисляется по формуле  $D = ((a_1 - a_{cp})^2 + 4 \cdot (a_3 - a_{cp})^2 + (a_2 - a_{cp})^2)/6$ . Отметим, что эти формулы уже являются приближенными и могут служить только для достаточно грубой оценки значений соответствующих параметров.

Для каждой работы параметры распределения её длительности задаются экспертом (ответственным исполнителем, заказчиком и т.п.) на основе нормативных данных, априорных соображений, своего опыта или интуиции. Поэтому они обладают высокой степенью неопределенности.

Рассмотрим некоторые результаты, полученные исследователями в этой области [7]. Величина «продолжительность работы» рассматривается как непрерывная случайная величина (НСВ) и поэтому имеет некоторое распределение. В теоретических исследованиях по длительности реализации проектов предполагается, что эта (а) НСВ имеет принятый для данной системы один и тот же для всех работ закон распределения. В этой предметной области экспериментально (!) обнаружено, что (б) распределение вероятностей место при реализации подавляющего большинства входящих в сетевой проект работ обычно асимметрично.

Отсюда постулируется возможность выбора бета-распределения в качестве априорного типового, каковое и выбирается в большинстве исследований. Но оно является 4-параметрическим, у экспертов же запрашивается – в рамках

метода PERT – только три параметра из четырех. При этом какие-либо дополнительные допущения немедленно влекут за собой противоречия в методике задания этих трех оценок. Кроме того, получение от экспертов сразу трех временных оценок  $a(a_1)$ ,  $b(a_2)$  и  $m(a_3)$  нередко является весьма затруднительным. Особенные трудности вызывает необходимость задания моды  $m$  распределения, особенно, в случае работ, по которым не накоплена достаточная статистика.

Как пишут авторы [7]:

*«В работах [...] нами построен теоретико-вероятностный аппарат, использующий меньшее число задаваемых оценок, и разработаны формулы расчета параметров распределения продолжительностей выполнения работ. В основу проведенного исследования было положено требование построения для любой конкретной сетевой модели такого обобщенного распределения времени выполнения входящих в нее работ, которое требовало бы задания меньшего количества оценок, нежели система PERT, и которое, в принятом нами смысле, было бы оптимальным по отношению к информации, заданной с помощью трех оценок...»*

Многочисленные эмпирические исследования показали, что параметры бета-распределения  $a$  и  $\beta$ , определенные для большого количества сетевых проектов, концентрируются около постоянных значений. Эти значения  $a \approx 1$ ,  $\beta \approx 2$  были приняты в качестве стандартных степенных показателей. Тем самым был построен закон распределения с плотностью, зависящей лишь от двух параметров  $a$  и  $b$ :

$$f(x) = 12 \cdot (x - a) \cdot (b - x)^2 / (b - a)^2.$$

В результате существенно уменьшается объем информации, который требуется от исполнителя работы: он должен задавать только два параметра – оптимистическую  $a$  и пессимистическую  $b$  оценку продолжительности выполнения этой работы.

... применение двухоценочной методике носит универсальный характер. Эту методике можно, с одинаковым успехом, использовать как при расчете детерминированных (или близких к ним) сетей, так и при моделировании стохастических сетевых проектов (используя заложенный в этой методике закон распределения).

К недостатку двухоценочной методике следует отнести сужение класса бета-распределений по сравнению с используемым в системе PERT. Отказ от использования наиболее вероятной оценки (моды  $m$ ) для некоторых видов работ может деформировать закон распределения в сторону большего отклонения от действительного. Однако, статистические свойства проекта в целом, как это показывают результаты статистического анализа, не претерпевают существенных изменений.

... отметим, что двухоценочная методика ...

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

весьма эффективна для статистического моделирования сетевых проектов.

Алгоритм упрощения предлагается для сокращения объема или полного исключения (в случае мультипересеченных сетей) статистического моделирования сетей. Однако наилучшим методом вычисления ... представляется метод статистических испытаний (?)» [7].

### Сокращение числа параметров

Полученные в [7] результаты являются лишь одним из «маяков» для наших исследований. Наиболее интересными представляются идеи:

- вероятность реализации любого ЭС описывается одной и той же моделью вероятности распределения;
- любое конкретное ЭС характеризуется своими значениями параметров распределения;
- в качестве запрашиваемых параметров рассматривать только два –  $r_1$   $r_{\min}$  и  $r_2$   $r_{\max}$ , а остальные параметры «общего» распределения определить на основании некоторых усреднений по массиву экспериментальных данных (в их качестве могут выступать и результаты статистического моделирования).

Таким образом, предполагается, что мода распределения вероятности реализации ЭС занимает одну и ту же относительную позицию для всех ЭС. Естественно, что это предположение не совсем адекватно реальности, но выигрыш за счёт снижения вычислительных затрат (да ещё и при учете принципиальной приближенности данных, получаемых от эксперта) достаточно существенен для того, чтобы идею стоило реализовать.

Возможно, для разных систем событий эти дополнительные параметры могут различаться. Но этот вопрос требует экспериментального исследования.

### Функция и плотность вероятности НСВ

Для описания неопределенности значения

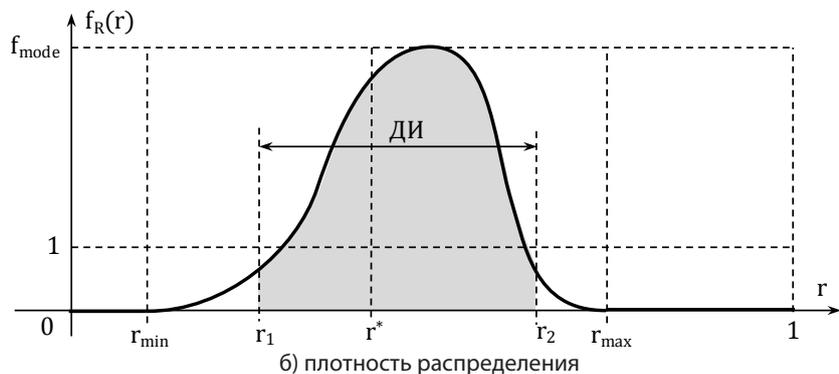
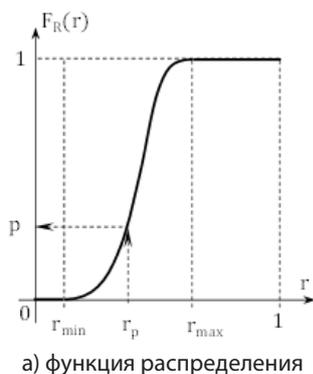


Рис. 1. Распределение непрерывной случайной величины R

вероятности мы воспользуемся статистическим подходом, используя модель непрерывной случайной величины (НСВ). Основным методом описания НСВ R – функция распределения  $F_R(r) = P(R < r)$ , равная вероятности события «НСВ R принимает значение, меньшее r» (рисунок 1а).

Другой метод использует плотность распределения  $f_R(r) = dF_R(r)/dr$  (рисунок 1б).

Плотность вероятности позволяет вычислить основные статистические характеристики случайной величины:

- математическое ожидание

$$E_R = \int_0^1 r \cdot f(r) \cdot dr \equiv \mu \quad (1)$$

среднеквадратичное отклонение (ско)

$$\sigma_R = \sqrt{D_R}, \quad (2)$$

где дисперсия вычисляется по формуле

$$D_R = \int_0^1 (r - \mu)^2 \cdot f(r) \cdot dr = \int_0^1 r^2 \cdot f(r) \cdot dr - \mu^2 \quad (3)$$

Функция распределения позволяет дать ответ на вопросы типа «Какова вероятность того, что вероятность реализации события не меньше p?», то есть, вычислить квантили  $r_p$  распределения.

*Доверительный интервал (ДИ)  $[r_1(\gamma); r_2(\gamma)]$*  – интервал значений НСВ R, в пределах которого с заданной *доверительной вероятностью*  $\gamma$  (уровнем доверия) находится (неизвестное в принципе!) «истинное» значение  $r^*$  НСВ R (рисунок 1б):

$$P(r^* \in [r_1(\gamma); r_2(\gamma)]) = \gamma \quad (4)$$

Доверительная вероятность вычисляется как

$$\gamma = \int_{r_1}^{r_2} f(r) \cdot dr \quad (5)$$

### Постановка задачи

В силу неопределенности как вида зависимости, так и значений их параметров моделирование должно носить «мягкий» характер [1]. Поэтому моделирование распределения заключается в подборе аналитически наиболее простых функций, сохраняющих, тем не менее, основные

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

особенности моделируемой величины. Построение таких функций требует ответа на вопросы – какие именно особенности функции  $f_r(r)$  (а) надо отобразить обязательно и (б) с какой точностью это следует делать.

Принципиальная неточность и неопределенность любых числовых значений приводит к мысли, что искомые модели могут быть достаточно грубыми, но все же приводить к вполне адекватным результатам. Этот подход тесно связан с теорией возможностей и нечетких множеств. В [9] авторы пишут: «Мы определим информационную единицу четверкой (объект, признак, значение, уверенность). ... В данном контексте можно четко различать понятия неточности и неопределенности: неточность относится к содержанию информации (составляющая «значение»), а неопределенность – к ее истинности, понимаемой в смысле соответствия действительности (составляющая «уверенность»)». В нашем случае объект – это событие, его признак – вероятность реализации, значение – значение  $r$  этой вероятности.

Поскольку значение величины всегда известно с некоторой погрешностью, то в кортеж (объект, признак, значение, уверенность) надо добавить соответствующий компонент (объект, признак, значение, погрешность (точность), уверенность). Именно эти три числа надо получить от эксперта, задавая ему вопрос «Какова вероятность события  $X$ ?» Однако даже само значение эксперт может указать с большой долей сомнения, а запрашивать у него его точность (погрешность) заведомо безнадежно. Значение же уверенности, скорее всего, будет завышено.

Эта проблема привела к разработке подхода GUM, Guide to the expression of Uncertainty in Measurement [11], одна из предпосылок которого состоит в том, что «... невозможно установить, насколько хорошо известно существенно единственное истинное значение, но можно только узнать, насколько велико доверие тому, что оно известно. Таким образом, неопределенность измерения может быть описана как мера того, насколько сильно человек уверен, что он знает «по сути» единственное истинное значение

измеряемой величины. Эта неопределенность отражает неполное знание об измеряемой величине».

При таком подходе эксперту для оценки значения любой величины  $X$  разумно задавать только два вопроса:

1. Каково значение величины  $X$ ?
2. Насколько вы уверены в этой оценке?

Уверенность эксперта будем измерять числом  $s \in [0; 1]$ , причем  $s = 0$  соответствует полной неуверенности эксперта в указанном им значении (то есть, оно вообще может быть любым «разумным» значением, а  $s = 1$  соответствует абсолютной уверенности.

### Базовые модели вероятности события

#### Модель А

В модели А полной определенности (жесткой оценки) уверенность эксперта в указанном значении максимальна ( $s = 1$ ), и в ней задается только одно число  $r_0 \in [0; 1]$ . В теории вероятностей такое распределение называется вырожденным, его функция распределения  $F_A(r) = \theta(r - r_0)$  ( $\theta(x)$  – функция Хэвисайда) разрывна, плотность распределения есть дельта-функция  $f_A(r) = \delta(r - r_0)$  (рисунок 2).

Значения характеристик вырожденного распределения очевидны: матожидание  $E_A = r_0$ , дисперсия  $D_A = 0$  и ско  $\sigma_A = 0$ . Доверительный интервал равен нулю, доверительная вероятность равна 1.

#### Модель В

Поскольку все числа задаются с некоторой погрешностью, то более реалистичной моделью НСВ  $R$  является модель В погрешности (ошибки измерения), в которой вероятность  $r \in [r_{\min}; r_{\max}]$ . Согласно [12, 6.4.2.1], «если единственной доступной информацией о величине  $X$  являются нижняя граница  $a$  и верхняя граница  $b$ ,  $a < b$ , тогда, согласно принципу максимума энтропии,  $X$  будет приписано равномерное прямоугольное распределение  $R(a; b)$  на интервале  $[a; b]$ ». Графики и формулы – на рисунке 3.

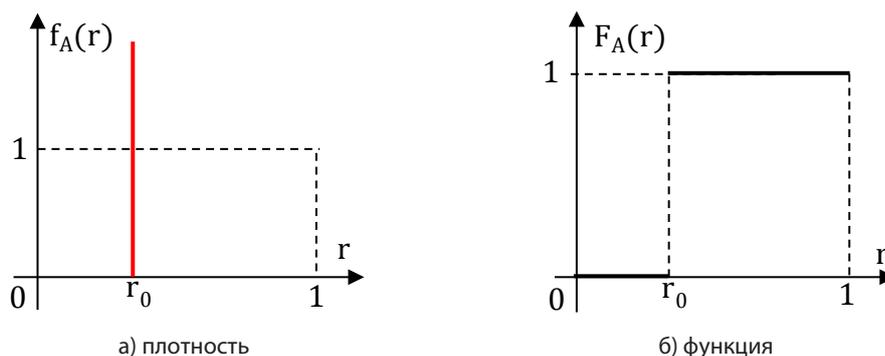


Рис. 2. Вырожденное распределение (модель А полной определенности)

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Длина диапазона (размах)  $R^* = r_{\max} - r_{\min} = 2 \cdot \Delta r$  ( $\Delta r$  – полуразмах). Значения характеристик:  $E_B = (r_{\min} + r_{\max})/2$ ,  $D_B = R^{*2}/12 = \Delta r^2/3$ ,  $\sigma_B = \sqrt{3} \cdot \Delta r/3 \cong 0,29 \cdot R^*$ .

Если  $r_{\min} = 0$  и  $r_{\max} = 1$ , то мы получаем модель полной неопределенности – о значении вероятности события не известно ничего! При этом естественно полагать, что уверенность  $c = 0$ .

В силу неопределенности положения центра ДИ разумно выбрать в центре самого распределения, тогда границы ДИ равны

$$r_1 = r_{\min} + R^* \cdot (1 - \gamma)/2 = r_{\min} + R^* \cdot \alpha/2$$

и

$$r_2 = r_{\max} - R^* \cdot (1 - \gamma)/2 = r_{\max} - R^* \cdot \alpha/2,$$

где  $\alpha = 1 - \gamma$ . Ширина ДИ равна  $r_2 - r_1 = R^* \cdot \gamma$ .

### Модель С

Мы рассмотрели две «крайности» – от полной сосредоточенности в одной точке (модель А) до полной «размазанности» по отрезку (модель В). Очевидно, что «истина где-то рядом». Построим модель равномерных распределений, плотность и функция которых зависят от некоторого параметра  $k \in [0; 1]$  так, что при его крайних значениях должны получаться модели А и В.

Такие функции распределения можно построить, опираясь на одну из моделей  $\delta$ -функции, в которой она получается как предельный переход. Например, в теории сигналов рассматривается переход прямоугольного импульса единичной мощности при стремлении его длительности к нулю (см. рисунок 4).

В нашем случае «центр импульса» находится не в нуле, а в некоторой точке  $r_0 \in [0; 1]$ . Поскольку центр прямоугольника, описывающего плотность распределения, должен по мере его расширения и понижения смещаться к середине отрезка  $[0; 1]$ , то его левая и правая границы должны согласованно изменяться в зависимости от  $k$ .

Определим модель С так (рисунок 5):

- распределение полностью определяется двумя параметрами ( $r_0; k$ );

- оно является равномерным на интервале  $[r_{\min}; r_{\max}]$ ;

- длина левого поддиапазона  $\Delta r_1 = k \cdot r_0$  прямо пропорциональна ширине левого интервала  $[0; r_0]$ ;

- длина правого поддиапазона  $\Delta r_2 = k \cdot (1 - r_0)$  прямо пропорциональна ширине правого интервала  $[r_0; 1 - r_0]$ .

Тогда границы диапазона равны

$$\begin{cases} r_{\min} = r_0 - \Delta r_{\text{л}} = r_0 \cdot (1 - k) \\ r_{\max} = r_0 + \Delta r_{\text{п}} = r_0 + k \cdot (1 - r_0) = r_0 \cdot (1 - k) + k = r_{\min} + k \end{cases} \quad (6)$$

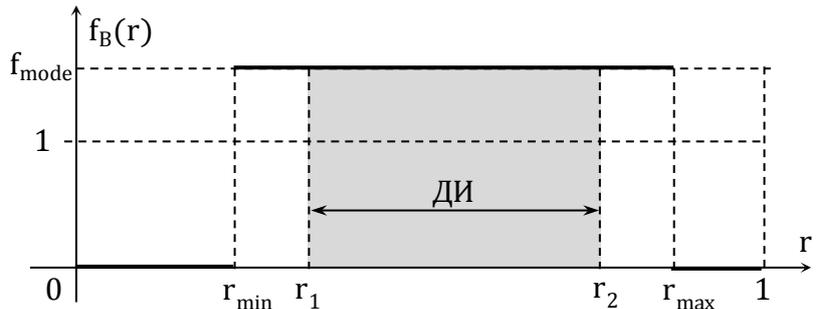
(размах  $R^* = k$ ). В силу нормировки плотности распределения  $f_{\text{mode}} \cdot R^* = 1$ , отсюда  $k = 1/f_{\text{mode}}$  (рисунок 6). Плотность и функция распределения вычисляются по формулам рисунка 3.

Значения характеристик:  $E_C = r_0(1 - k) + k/2$ ,  $D_C = k^2/12$ ,  $\sigma_C = k/(2 \cdot \sqrt{3}) \cong 0,29 \cdot k$ .

В этой модели сохраняется полная неопределенность на интервале  $[r_{\min}; r_{\max}]$ . Величину  $k$  можно интерпретировать как *меру неуверенности*

а) плотность

$$f_B(r) = \begin{cases} 1/R^*, & r \in [r_{\min}, r_{\max}] \\ 0, & r \notin [r_{\min}, r_{\max}] \end{cases}$$



б) функция

$$F_B(r) = \begin{cases} 0, & r < r_{\min} \\ \frac{r - r_{\min}}{R^*}, & r_{\min} \leq r \leq r_{\max} \\ 1, & r > r_{\max} \end{cases}$$

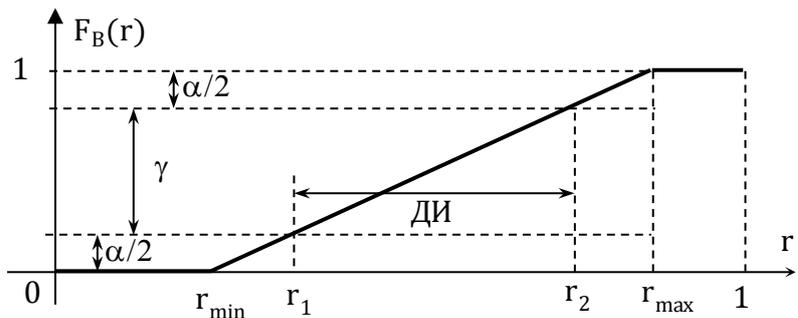


Рис. 3. Модель В (равномерное распределение)

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

эксперта в указанном им значении  $r_0$  – чем больше  $k$ , тем больше интервал. Тогда *мера уверенности* есть, например,  $c = 1 - k$ . Отметим, что функция  $c = c(k)$  может быть самой разной, лишь бы она была монотонной и удовлетворяла условиям  $c(0) = 1$  и  $c(1) = 0$ .

До опроса эксперта было известно априорное распределение вероятности  $r^*$  – равномерное на интервале  $[0; 1]$ . После опроса апостериорное распределение есть равномерное на интервале  $[r_{\min}; r_{\max}]$ . Поэтому доверительную вероятность  $\gamma$  можно положить равной  $\gamma = R^* = k$ .

Теперь для получения параметров распределения эксперту следует задать только два вопроса:

1. Как вы оцениваете вероятность реализа-

ции события  $X$ ? (ответ – число  $r_0 \in [0; 1]$ )

2. Насколько вы уверены в этой оценке? (ответ – число  $c \in [0; 1]$ )

Например, для ответов «0,8» и «На 60 %» мы строим распределение вероятностей  $f_c(r)$  с параметрами  $r_0 = 0,8$  и  $k = 1 - 0,6 = 0,4$ , которое моделирует мнение (оценку) данного эксперта (рисунок 7).

То есть, в модели  $C$  оценка экспертом вероятность события такова – она равномерно распределена на интервале  $[0,32; 0,92]$ . Отметим, что здесь – в силу субъективности оценки – имеется в виду скорее *возможность*, а не вероятность. Однако принципиальное различие между «объективными» статистическими оценками, получаемыми в результате обработки эмпирических данных, и субъективными оценками экспертов, выражающих их личные представления, обсуждаемое в [11], никак не сказывается на расчетах.

Модель  $C$  преобразует пару  $(r_0; k)$  в диапазон  $(r_{\min}; r_{\max})$ , затем применяется модель  $B$ . Это позволяет получить простые оценки вероятности события, аналогичные модели  $B$  (погрешностей), не запрашивая напрямую границ диапазона неопределенности.

Такой способ вычисления границ диапазона прост и прозрачен, но возможны и другие (например, нелинейной зависимости от  $k$ ). Построим вариант  $C1$  модели, в котором полуширина определяется меньшим из интервалов, на которые точка  $r_0$  разбивает отрезок  $[0; 1]$ :  $\Delta r = k \cdot \min(r_0; 1 - r_0) = \Delta r_1 = \Delta r_2$ . Границы симметричного интервала равны  $r_{\min/\max} = r_0 \pm \Delta r$ . Теперь

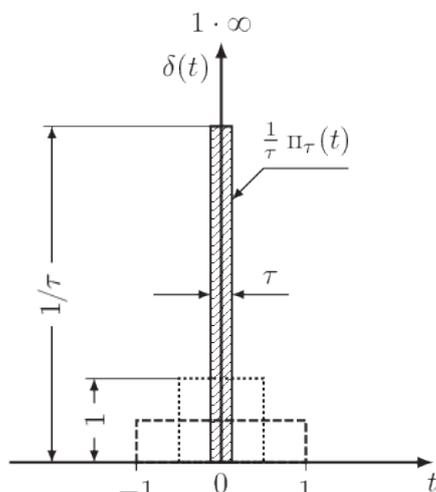


Рис. 4. Прямоугольный импульс единичной площади

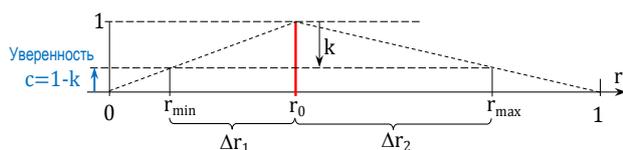


Рис. 5. Задание диапазона в модели  $C$

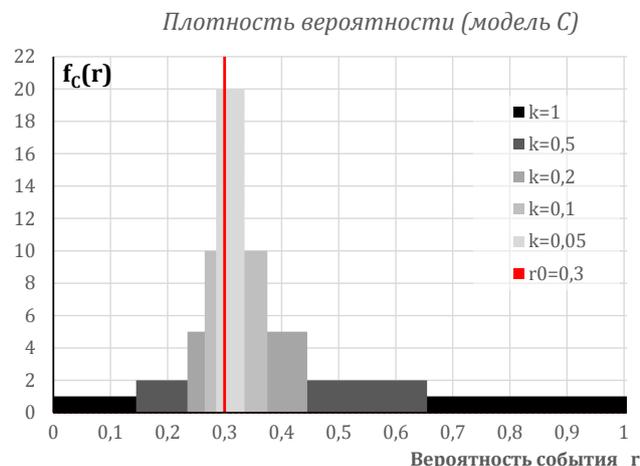


Рис. 6. Равномерные распределения в модели  $C$

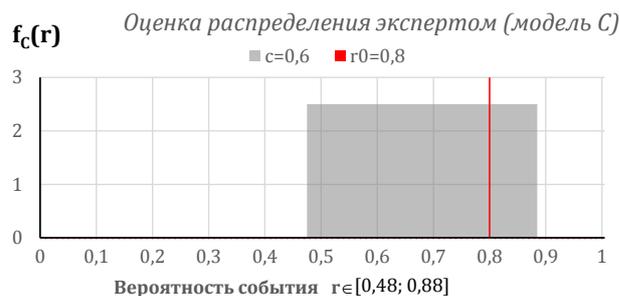


Рис. 7. Модель  $C$  (пример)

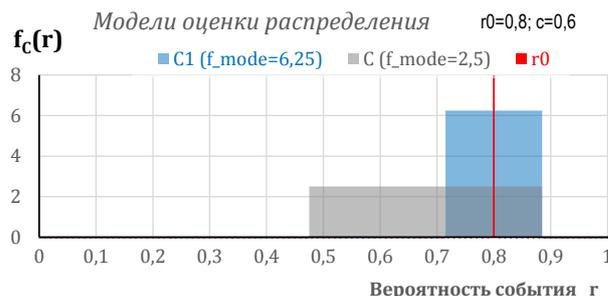


Рис. 8. Сравнение моделей  $C$  и  $C1$

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

мнение того же эксперта таково: вероятность события распределена равномерно на интервале  $[0,68; 0,92]$  (рисунк 8) с характеристиками  $E_{C1} = r_0$ ,  $D_{C1} = \Delta r^2/3$ ,  $\sigma_B = \Delta r/3$ .

Достоинство модели С1 – сохранение симметричности распределения относительно  $r_0$ . Однако в случае полной неуверенности ( $k=1$ ) мы не получаем ожидаемый интервал  $[0; 1]$ . А это лишает данную модель значительной доли привлекательности.

### Модель Т (треугольное распределение)

Модель равномерного распределения на интервале является всё же довольно грубой, поскольку все «разумные» распределения физических величин (а) унимодальны (имеют единственный максимум  $f_{mode} = f(r_0)$ ) и (б) на краях диапазона  $[r_{min}; r_{max}]$  обращаются в ноль.

Простейшей моделью с такими свойствами является треугольное распределение, которое описывается тремя параметрами  $\{r_1, r_2, r_0\}$  (рисунк 9).

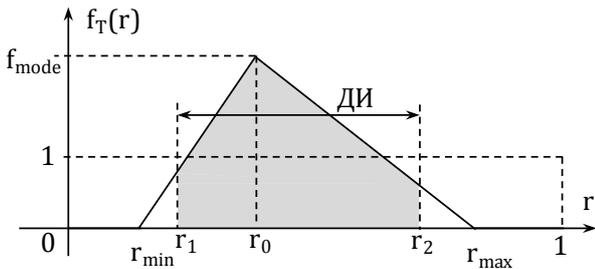


Рис. 9. Треугольное распределение и его параметры

а) плотность

$$f_T(r) = \frac{2}{R^*} \cdot \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq r_{min} \\ \frac{r - r_{min}}{r_0 - r_{min}}, & r_{min} \leq r \leq r_0 \\ \frac{r_{max} - r}{r_{max} - r_0}, & r_0 \leq r \leq r_{max} \\ 0, & r_{max} \leq r \leq 1 \end{cases}$$

б) функция

$$F_T(r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq r_{min} \\ \frac{(r - r_{min})^2}{R^* \cdot (r_0 - r_{min})}, & r_{min} \leq r \leq r_0 \\ 1 - \frac{(r_{max} - r)^2}{R^* \cdot (r_{max} - r_0)}, & r_0 \leq r \leq r_{max} \\ 1, & r_{max} \leq r \leq 1 \end{cases}$$

Рис. 10. Треугольное распределение

Простота его аналитического описания обеспечила ему популярность в моделировании случайных событий (рисунк 10).

Треугольное распределение можно использовать вместо равномерного в модели С. Тогда значения характеристик:  $E_T = r_0 + k \cdot (1 - 2 \cdot r_0)/3$ ,  $D_T = k^2 \cdot (1 - r_0 + r_0^2)/18$ ,  $\sigma_T = k \cdot \sqrt{1 - r_0 + r_0^2}/2/3$ . Отметим, что  $D_T/D_C = 2 \cdot (1 - r_0 + r_0^2)/3 \in [1/2; 2/3] < 1$ , то есть, треугольное распределение более компактно.

Плотность распределения (для данных примера) в оценке эксперта представлена на рисунке 11.

Модель с треугольным распределением явно выглядит более предпочтительной, поскольку отражает сосредоточенность значений НСВ около  $r_0$ .

Модели оценки эксперта ( $r_0=0,8$ ;  $c=0,4$ )

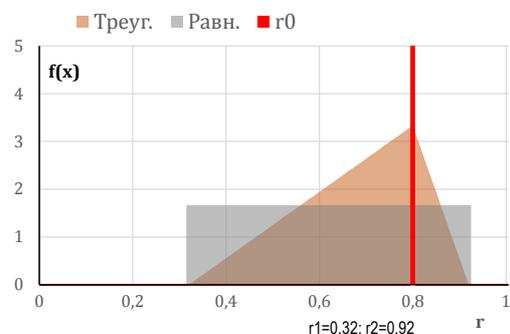
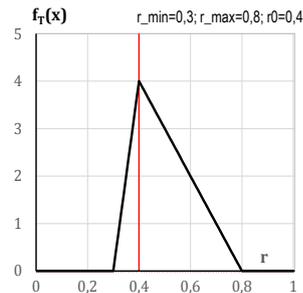
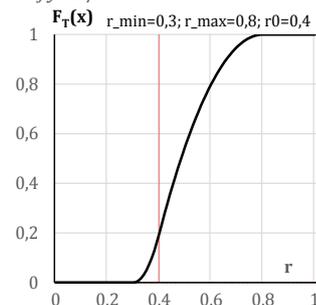


Рис. 11. Две модели оценки эксперта

Треугольное распределение: плотность



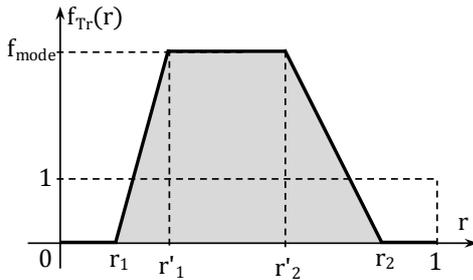
Треугольное распределение: функция



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## Модель Тг (трапецидальное распределение)

Поскольку значение моды известно неточно, её задание тоже должно производиться с помощью модели В, поэтому вблизи моды распределение практически постоянно («плоская» мода). В теории нечетких величин [10] такая ситуация описывается трапецидальной функцией принадлежности (рисунк 12).

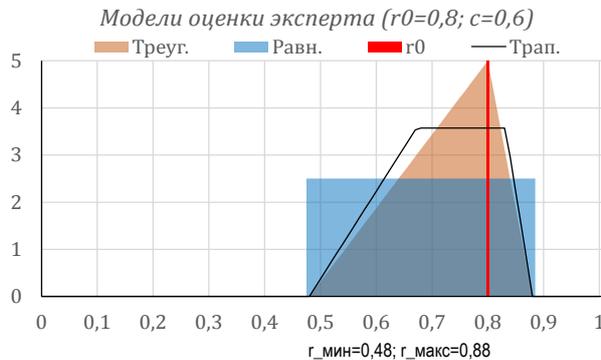


**Рис. 12.** Трапецидальное распределение  
( $R^{**} = (r_2 + r'_2) - (r_1 + r'_1)$ )

При этом от эксперта надо получить уже 4 значения, причем они должны быть согласованы. Например, новые параметры можно определить как  $r'_{1,2} = r_0 \mp \Delta$ , где  $\Delta$  – погрешность задания значения  $r_0$  (соответственно,  $r_0 = (r'_1 + r'_2)/2$ ,  $\Delta = (r'_2 - r'_1)/2$ ).

$$f_{Tr}(r) = \frac{2}{R^{**}} \cdot \begin{cases} 0, & r \leq r'_1 \\ \frac{r-r'_1}{r'_1-r'_1}, & r'_1 \leq r \leq r'_1 \\ 1, & r'_1 \leq r \leq r'_2 \\ \frac{r_2-r}{r_2-r'_2}, & r'_2 \leq r \leq r_2 \\ 0, & r \geq r_2 \end{cases} \quad F_{Tr}(r) = \begin{cases} 0, & r \leq r'_1 \\ \frac{(r-r'_1)^2}{R^{**} \cdot (r'_1-r'_1)}, & r_1 \leq r \leq r'_1 \\ \frac{2 \cdot r - (r'_1+r'_2)}{R^{**}}, & r'_1 \leq r \leq r'_2 \\ 1 - \frac{(r_2-r)^2}{R^{**} \cdot (r_2-r'_2)}, & r'_2 \leq r \leq r_2 \\ 1, & r \geq r_2 \end{cases}$$

Построим – по аналогии с моделью Т – модель Тг с параметром  $k \in [0; 1]$ . Крайние значения ( $r_1; r_2$ ) будем вычислять аналогично треугольному распределению – по формулам (6). Для «внутренних» точек ( $r'_1; r'_2$ ) применим тот же подход:



**Рис. 13.** Модели оценки экспертом плотности распределения

$$\begin{cases} r'_1 = r_0 - k \cdot (r_0 - r_1) = r_0 \cdot (1-k) + r_1 \cdot k = r_0 \cdot (1-k^2) \\ r'_2 = r_0 + k \cdot (r_2 - r_0) = r_0 \cdot (1-k) + r_2 \cdot k = r_0 \cdot (1-k^2) + k^2 \end{cases} \quad (7)$$

Тогда  $r'_1 - r_1 = r_0 \cdot k \cdot (1-k)$ ,  $r_2 - r'_2 = (1-r_0) \cdot k \cdot (1-k)$ ,  $R^{**} = k \cdot (1+k)$ . Теперь можно применить формулы трапецидального распределения (рисунк 12) (выражения для характеристик не будем приводить ввиду их громоздкости).

Для сравнения все три модели показаны на рисунке 13.

Интересно, что эти модели дают вполне разумные распределения и для крайних значений  $r_0$  (рисунк 14).

Приведем плотности при трех значениях уверенности  $c$  (рисунк 15).

Отметим, что с ростом уверенности эксперта сужается диапазон значений вероятности, поэтому различия между моделями распределения становятся незначимыми. В то же время, поведение плотности для всех моделей хорошо отражает интуитивные представления о распределении вероятности события.

## Модель СТг (равномерное распределение с неточно известными границами)

Рассмотрим ещё одно, достаточно редко встречающееся распределение. В литературе, посвященной обработке неопределенности данных, рассматривается случай, когда:

«Известно, что величина  $X$  лежит между границами  $A$  и  $B$ ,  $A < B$ , где средняя точка интервала  $(A + B)/2$ , определенная этими границами, фиксирована и протяженность интервала  $B - A$  точно не известна. Известно, что  $A$  лежит в интервале  $a \pm d$  и  $B$  в интервале  $b \pm d$ , где  $a, b$  и  $d$ , при  $d > 0$  и  $a + d < b - d$ , заданы. Если никакая другая информация, касающаяся  $X, A$  и  $B$ , недоступна, может быть применен принцип максимума энтропии, чтобы приписать  $X$  «криволинейную трапецию» (прямоугольное распределение с неточно заданными границами)» [8,12].

Плотность распределения такой случайной величины имеет вид:

$$f_{Стрп}(x, a, b, d) = \frac{1}{4d} \cdot \begin{cases} 0, & x \leq a-d \\ \ln((w+d)/(v-x)), & a-d \leq x \leq a+d \\ \ln((w+d)/(w-d)), & a+d \leq x \leq b-d \\ \ln((w+d)/(x-v)), & b-d \leq x \leq b+d \\ 0, & x \geq b+d \end{cases} \quad (8)$$

где  $v = (a + b)/2$ ,  $w = (b - a)/2$ . Для примера приведем графики этого распределения при  $a = 0,2$ ,  $b = 0,6$  и двумя значениями  $d$  (рисунк 16), причем сравним его с «базовыми» – равномерным на интервале  $[a; b]$  и симметричным треугольным (Симпсона) на интервале  $[a - d; b + d]$ .

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

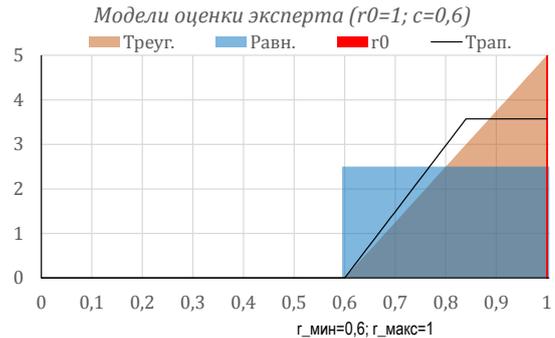
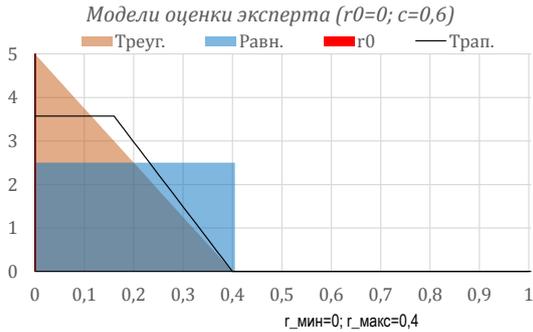
Имея «плоскую» моду, это распределение лучше описывает вероятность события в центре интервала. А ведь именно в центре распределения и около него сосредоточена вероятность.

Значения характеристик:  $E_{CTr} = (a + b)/2$ ,  $D_{CTr} = (b - a)^2/12 + d^2/9 > D_B$ .

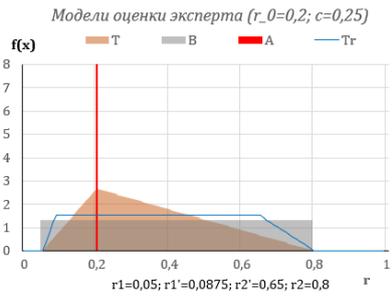
Поскольку данное распределение симметрично относительно своего центра, то построение двухпараметрической модели  $CTr1(r_0; k)$

на его основе (рисунок 17) возможно только по варианту модели  $C1$  (см. рисунок 8). Полагая  $v = \min(r_0; 1 - r_0)(1 - k)$  и  $d = v \cdot k$ , получим распределение с параметрами ( $a = r_0 - v$ ;  $b = r_0 + v$ ;  $d$ ) и дисперсией  $D = v^2 \cdot (1 + k^2)/3$ .

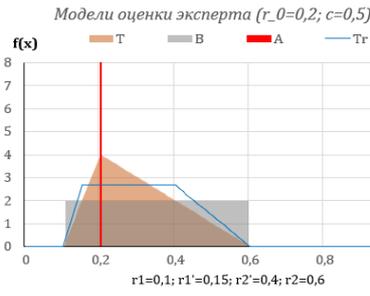
Основной недостаток моделей с симметричным относительно  $r_0$  распределением – при полной неуверенности эксперта мы не получаем ожидаемой полной неопределенности.



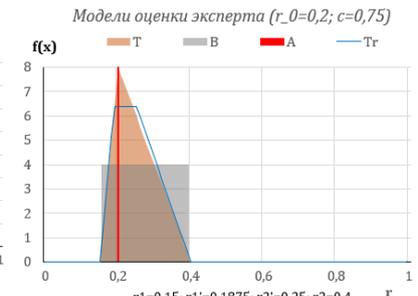
**Рис. 14.** Распределения при крайних значениях  $r_0$



а)  $r_0 = 0,2$ ;  $c = 0,25$

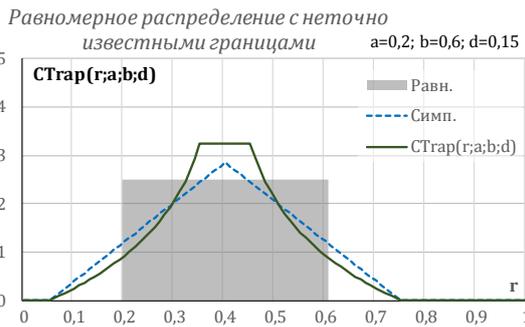


б)  $r_0 = 0,2$ ;  $c = 0,5$

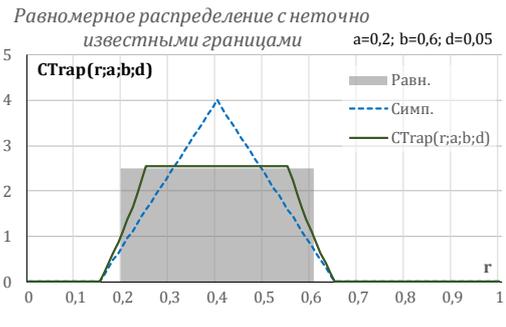


в)  $r_0 = 0,2$ ;  $c = 0,75$

**Рис. 15.** Распределения при различных значениях уверенности эксперта с

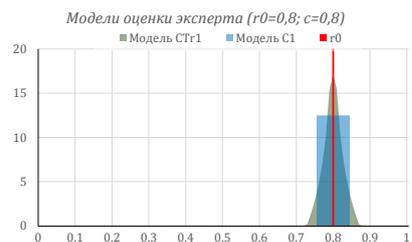
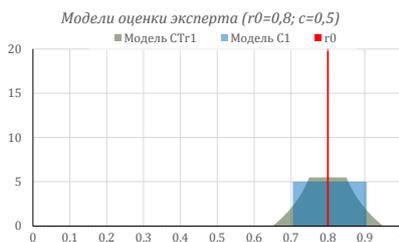
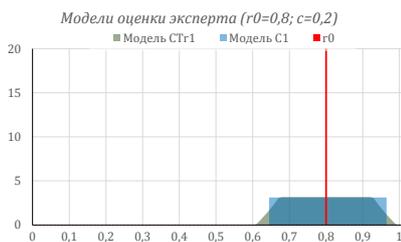


а)  $d=0,15$



б)  $d=0,05$

**Рис. 16.** Равномерное распределение с неточно известными границами



**Рис. 17.** Распределения по модели  $CTr1$  для разных значений уверенности с

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Выводы

Достоинством рассмотренных моделей является использование только двух параметров – значения  $\gamma_0$  вероятности реализации события и степени уверенности с эксперта в этом значении. Именно эти параметры являются психологически наиболее надежными при опросе экспертов. Остальные детали распределения вероятности события задаются выбранной моделью.

Эти модели являются базовыми в том смысле, что учитывают основные особенности распределения вероятности события простейшим образом. В силу приближенности всех имеющихся числовых значений можно полагать, что наиболее адекватными моделями будут треугольная  $T$  и трапециевидальная  $Tg$ , при этом различия в результатах их применения могут оказаться и несущественными. Обоснованные выводы можно будет сделать лишь после сравнения показателей атак, профиль которых сформирован на основе этих моделей. Для этого необходимо провести обширное статистическое моделирование атак (см., например, [8,12]).

### Литература

1. Арнольд В.И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. 2-е изд., стереотип. М.: МНИМО, 2008. 32 с.
2. Бутрина Е.П., Олейников В.П. Защищенность – объекты и события // Известия Института инженерной физики, 2021. №2(60). С.86-90.
3. Бутрина Е.П., Олейников В.П. Защищенность объекта: структуры событий и сценарный подход // Известия Института инженерной физики, 2021. №3(61). С.55-60.
4. Бутрина Е.П., Олейников В.П. Защищенность объекта: событийная модель угроз // Известия Института инженерной физики, 2022. №4(66). С.78-82.
5. Бутрина Е.П., Олейников В.П. Атака – модель и показатели // Известия Института инженерной физики, 2023. №3(69). С.58-66.
6. Бутрина Е.П., Олейников В.П. Управление защищенностью (при линейной атаке) // Известия Института инженерной физики, 2023. №4(70). С.35-42.
7. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления работками: Монография. Воронеж: «Научная книга», 2010. 284 с.
8. ГОСТ Р 54500.3.1-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008/ Дополнение 1: 2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло.
9. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: Пер. с фр. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
10. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 312 с.
11. Руководство по выражению неопределенности измерения. Пер. с англ. под ред. В.А. Слаева. СПб.: ВНИИМ, 1999.
12. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. Приложение 1 к «Руководству по выражению неопределенности измерения» – Оценивание данных измерений / Пер. с англ. под науч. ред. В.А. Слаева, А.Г. Чуновкиной. СПб.: «Профессионал», 2010. 182 с.
13. Управление проектами: учеб, пособие для студентов, обучающихся по специальности «Менеджмент организации» / И.И. Мазур [и др.]; под общ. ред. И.И. Мазура и В.Д. Шапиро. 6-е изд., стер. М.: Издательство «Омега-Л», 2010. 960 с.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЙЛЕРОВЫХ И ГАМИЛЬТОНОВЫХ МАРШРУТОВ ДЛЯ БПЛА С ПОМОЩЬЮ РЕДУКЦИИ\* THE METHOD OF CALCULATING EULERIAN AND HAMILTONIAN ROUTES FOR UAVS USING REDUCTION

**Эдуард Михайлович Руденко**  
кандидат технических наук  
доцент кафедры математики  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: +7 (916) 851-80-55  
E-mail: eduard5529@yandex.ru

**Елена Викторовна Семикина**  
преподаватель кафедры информатики  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
E-mail: labinfo\_serp@inbox.ru  
Тел.: +7 (915) 064-50-74

Согласно теореме 2 [4] о замкнутости множества маршрутов максимального и наибольшего мониторинга ЭГ при действии на них автоморфизмов  $\gamma_{авт}$  графа (1), операторов обращения (инверсии) (3)  $\gamma_{обр}$ , разрезания (4)  $\gamma_{раз,1}$  в промежуточной вершине с номером 1. Другими словами, множество МММ и МНМ операторами  $\gamma_{обр}$ ,  $\gamma_{раз,1}$ ,  $\gamma_{авт}$  переводятся сами в себя. Например, имеем:

$$\begin{aligned} \gamma_{раз,1}(m_6) &= \gamma_{раз,1}(1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 1\ 7\ 2\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1) = \\ &= (1\ 7\ 2\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1)\ (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 1) = \\ &= (1\ 7\ 2\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 1) = m_{159}, \\ \text{т.е. } \gamma_{раз,1}(m_6) &= m_{159}. \end{aligned} \quad (4)$$

Поэтому можно записать:

$$\begin{aligned} \gamma_{раз,1}(m_6) &= m_{159}, \gamma_{раз,1}(m_8) = m_{155}, \\ \gamma_{раз,1}(m_{12}) &= m_{151}, \gamma_{раз,1}(m_{28}) = m_{135}, \\ \gamma_{раз,1}(m_{47}) &= m_{110}, \gamma_{раз,1}(m_{65}) = m_{100}, \\ \gamma_{раз,1}(m_{70}) &= m_{95}, \gamma_{раз,1}(m_{71}) = m_{94}, \\ \gamma_{раз,1}(m_{94}) &= m_{71}, \gamma_{раз,1}(m_{95}) = m_{70}, \\ \gamma_{раз,1}(m_{100}) &= m_{65}, \gamma_{раз,1}(m_{110}) = m_{47}, \\ \gamma_{раз,1}(m_{135}) &= m_{28}, \gamma_{раз,1}(m_{151}) = m_{12}, \\ \gamma_{раз,1}(m_{155}) &= m_8, \gamma_{раз,1}(m_{159}) = m_6. \end{aligned} \quad (5)$$

Ниже приведены ЭМ из таблицы 3 с числом мониторинга 4, которые операторами  $\gamma_{обр}$ ,  $\gamma_{раз,1}$ ,  $\gamma_{авт}$  переводятся сами на себя. Например, имеем:

$$\begin{aligned} \gamma_{обр}(m_{22}) &= m_{116}, \gamma_{обр}(m_{24}) = m_{76}, \\ \gamma_{обр}(m_{32}) &= m_{52}, \gamma_{обр}(m_{41}) = m_{143}, \\ \gamma_{обр}(m_{89}) &= m_{139}, \gamma_{обр}(m_{105}) = m_{133}, \\ \gamma_{обр}(m_{111}) &= m_{149} \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь ЭМ с числом  $n_{МММ} = 4$  связаны между собой через преобразование инверсии (6).

Из подсчета ЭМ на графе  $v4e9-2$  с помощью редукции можно отметить, что башней редукций [6,7] является последовательность ЭГ

$$v4e4 \rightarrow v4e8 \rightarrow v6e10 \rightarrow v8e12. \quad (7)$$

Согласно [7] поднятием ЭМ (1 3 5 7 1), (1 7 5 3 1) графа  $v4e4$  является 10 ЭМ графа  $v4e8$  из (2) и (3) (таблица 2).

Поднятием каждого ЭМ графа  $v4e8$  из таблицы 2 является 4 ЭМ графа  $v8e10$ . Например:

$$\begin{aligned} n_1 &= (1\ 2\ 4\ 5\ 1\ 2\ 4\ 5\ 1) \rightarrow (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 1\ 2\ 4\ 5\ 1), \\ &\quad (1\ 2\ 4\ 5\ 6\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 1), \\ &\quad (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 1\ 2\ 4\ 5\ 6\ 1), (1\ 2\ 4\ 5\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 1). \end{aligned}$$

Аналогично, поднятием каждого ЭМ графа  $v4e10$  из таблицы 2 является 4 ЭМ графа  $v8e12$  (таблица 3):

$$\begin{aligned} (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 1\ 2\ 4\ 5\ 1) &\rightarrow m_{137} = \\ &= (1\ 7\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 1\ 2\ 4\ 8\ 5\ 1)-3, \\ m_8 &= (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 1\ 7\ 2\ 4\ 8\ 5\ 1)-5, \\ m_{143} &= (1\ 7\ 2\ 3\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1\ 2\ 4\ 5\ 1)-4, \\ m_{16} &= (1\ 2\ 3\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1\ 7\ 2\ 4\ 5\ 1)-4. \end{aligned} \quad (8)$$

Базисное множество на графе  $v4e9-2$  в соответствии с [7] (определение 3) состоит из 25 ЭМ:

$$\begin{aligned} m_1 &= (1\ 2\ 3\ 4\ 2\ 7\ 1\ 5\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1) - 3; \\ m_3 &= (1\ 2\ 3\ 4\ 2\ 7\ 1\ 6\ 5\ 4\ 8\ 5\ 1) - 3; \\ m_4 &= (1\ 2\ 3\ 4\ 2\ 7\ 1\ 6\ 5\ 8\ 4\ 5\ 1) - 3; \\ m_5 &= (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 1\ 6\ 5\ 8\ 4\ 2\ 7\ 1) - 3; \\ m_7 &= (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 1\ 5\ 8\ 4\ 2\ 7\ 1) - 3; \\ m_9 &= (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 8\ 4\ 2\ 7\ 1\ 5\ 6\ 1) - 3; \\ m_{10} &= (1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 8\ 4\ 2\ 7\ 1\ 6\ 5\ 1) - 3; \\ m_{11} &= (1\ 2\ 3\ 4\ 8\ 5\ 1\ 6\ 5\ 4\ 2\ 7\ 1) - 3; \\ m_{13} &= (1\ 2\ 3\ 4\ 8\ 5\ 4\ 2\ 7\ 1\ 5\ 6\ 1) - 3; \end{aligned}$$

\* Окончание. Начало см. в №2 (72) 2024 года

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$\begin{aligned}
 m_{23} &= (1\ 2\ 4\ 5\ 6\ 1\ 5\ 8\ 4\ 3\ 2\ 7\ 1) - 3; \\
 m_{25} &= (1\ 2\ 4\ 5\ 8\ 4\ 3\ 2\ 7\ 1\ 5\ 6\ 1) - 3; \\
 m_{30} &= (1\ 2\ 4\ 8\ 5\ 4\ 3\ 2\ 7\ 1\ 6\ 5\ 1) - 3; \\
 m_{36} &= (1\ 2\ 7\ 1\ 5\ 8\ 4\ 3\ 2\ 4\ 5\ 6\ 1) - 3; \\
 m_{40} &= (1\ 2\ 7\ 1\ 6\ 5\ 8\ 4\ 3\ 2\ 4\ 5\ 1) - 3; \\
 m_{44} &= (1\ 5\ 4\ 2\ 3\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1\ 7\ 2\ 1) - 3; \\
 m_{45} &= (1\ 5\ 4\ 2\ 7\ 1\ 2\ 3\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1) - 3; \\
 m_{50} &= (1\ 5\ 4\ 3\ 2\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1\ 7\ 2\ 1) - 3; \\
 m_{51} &= (1\ 5\ 4\ 3\ 2\ 7\ 1\ 2\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1) - 3; \\
 m_{63} &= (1\ 5\ 6\ 1\ 7\ 2\ 4\ 5\ 8\ 4\ 3\ 2\ 1) - 3; \\
 m_{80} &= (1\ 5\ 8\ 4\ 5\ 6\ 1\ 7\ 2\ 4\ 3\ 2\ 1) - 3; \\
 m_{16} &= (1\ 2\ 3\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1\ 7\ 2\ 4\ 5\ 1) - 4; \\
 m_{22} &= (1\ 2\ 4\ 5\ 1\ 7\ 2\ 3\ 4\ 8\ 5\ 6\ 1) - 4; \\
 m_{41} &= (1\ 5\ 4\ 2\ 1\ 6\ 5\ 8\ 4\ 3\ 2\ 7\ 1) - 4; \\
 m_{76} &= (1\ 5\ 8\ 4\ 3\ 2\ 7\ 1\ 6\ 5\ 4\ 2\ 1) - 4; \\
 m_{28} &= (1\ 2\ 4\ 8\ 5\ 1\ 7\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 1) - 5; \\
 m_{135} &= (1\ 7\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 1\ 2\ 4\ 8\ 5\ 1) - 5,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где цифра после тире показывает число мониторинга этого маршрута.

Если исходить из множества ЭМ (9), то множество ЭМ  $\{n_1, n_2, \dots, n_r\}$  редукции  $\Gamma_* = v4e8$  эйлерова графа  $\Gamma = v8e12$  будет базисным множеством редукции  $\Gamma_*$ , если их поднятие до маршрутов графа  $\Gamma$  с помощью операторов автоморфизма (1), инверсии (3) и разрезания (4) в промежуточной вершине 1 порождает все множество ЭМ графа  $\Gamma$ .

В отличие от графа  $v4e9$  для графа  $v8e16$  (рисунк 1а) число ЭМ методом перебора подсчитать на персональном компьютере не удастся за приемлемое время – часы, дни, недели.

Граф  $v8e16$  является симметричным и у него есть вертикальный и горизонтальные автоморфизмы:

$$\begin{aligned}
 \gamma_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 6 & 7 & 8 & 4 & 5 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}; \\
 \gamma_8 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 3 & 2 & 1 & 5 & 4 & 8 & 7 & 6 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Проводя редукцию, исключим у графа  $v8e16$  кратные боковые ребра (1 6) и (3 8), получим граф  $v8e12$  (рисунк 5).

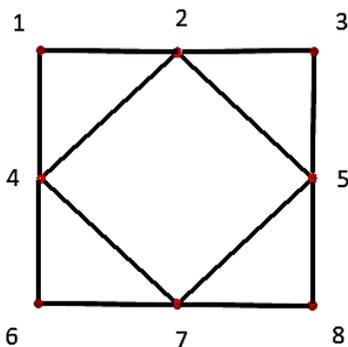


Рис. 5. Эйлеров граф  $v8e12-1$

Граф  $v8e12-1$  изоморфен графу  $v8e12$  на рисунке 3а. Для этого графа известно, что на нем существует 160 ЭМ, которые приведены в таблице 2. Но между этими графами есть отличие. У них переставлены номера вершин. Если у графа на рисунке 3 вершина с номером 1 имеет кратность 4, то у графа рисунка 5 вершина 1 имеет кратность 2. По этой причине у графа  $v8e12-1$  число ЭМ в два раза меньше и равно 80 (таблица 4).

Из первого ЭМ таблицы 4  $m_1 = (1\ 2\ 3\ 5\ 2\ 4\ 6\ 7\ 5\ 8\ 7\ 4\ 1)$ , вставляя вершины с номерами 1 и 6 между вершинами 1, 2 и 1, 4, а также вершины 3 и 8 между вершинами 3, 5 и 5, 8, получаем 9 ЭМ ЭГ  $v8e16$  (рисунк 1а):

$$\begin{aligned}
 &(1\ 6\ 1\ 2\ 3\ 5\ 2\ 4\ 6\ 7\ 5\ 8\ 3\ 8\ 7\ 4\ 1), \\
 &(1\ 2\ 3\ 8\ 5\ 2\ 4\ 1\ 6\ 7\ 5\ 3\ 8\ 7\ 4\ 6\ 1), \\
 &(1\ 2\ 3\ 8\ 3\ 5\ 2\ 4\ 6\ 7\ 5\ 8\ 7\ 4\ 1\ 6\ 1), \\
 &(1\ 6\ 1\ 2\ 3\ 8\ 3\ 5\ 2\ 4\ 6\ 7\ 5\ 8\ 7\ 4\ 1), \\
 &(1\ 6\ 1\ 2\ 3\ 8\ 5\ 2\ 4\ 6\ 7\ 5\ 3\ 8\ 7\ 4\ 1), \\
 &(1\ 2\ 3\ 5\ 2\ 4\ 1\ 6\ 7\ 5\ 8\ 3\ 8\ 7\ 4\ 6\ 1), \\
 &(1\ 2\ 3\ 5\ 2\ 4\ 6\ 7\ 5\ 8\ 3\ 8\ 7\ 4\ 1\ 6\ 1), \\
 &(1\ 2\ 3\ 8\ 5\ 2\ 4\ 6\ 7\ 5\ 3\ 8\ 7\ 4\ 1\ 6\ 1), \\
 &(1\ 2\ 3\ 8\ 3\ 5\ 2\ 4\ 1\ 6\ 7\ 5\ 8\ 7\ 4\ 6\ 1).
 \end{aligned}$$

Из предпоследнего ЭМ  $m_{79} = (1\ 4\ 7\ 8\ 5\ 7\ 6\ 4\ 2\ 3\ 5\ 2\ 1)$  таблицы 4 получим также 9 ЭМ графа  $v8e16$ :

$$\begin{aligned}
 &(1\ 6\ 4\ 7\ 8\ 3\ 5\ 7\ 6\ 1\ 4\ 2\ 3\ 8\ 5\ 2\ 1), \\
 &(1\ 6\ 4\ 7\ 8\ 3\ 8\ 5\ 7\ 6\ 1\ 4\ 2\ 3\ 5\ 2\ 1), \\
 &(1\ 6\ 4\ 7\ 8\ 5\ 7\ 6\ 1\ 4\ 2\ 3\ 8\ 3\ 5\ 2\ 1), \\
 &(1\ 6\ 1\ 4\ 7\ 8\ 3\ 5\ 7\ 6\ 4\ 2\ 3\ 8\ 5\ 2\ 1), \\
 &(1\ 6\ 1\ 4\ 7\ 8\ 3\ 8\ 5\ 7\ 6\ 4\ 2\ 3\ 5\ 2\ 1), \\
 &(1\ 6\ 1\ 4\ 7\ 8\ 5\ 7\ 6\ 4\ 2\ 3\ 8\ 3\ 5\ 2\ 1), \\
 &(1\ 4\ 7\ 8\ 3\ 8\ 5\ 7\ 6\ 1\ 6\ 4\ 2\ 3\ 5\ 2\ 1), \\
 &(1\ 4\ 7\ 8\ 5\ 7\ 6\ 1\ 6\ 4\ 2\ 3\ 8\ 3\ 5\ 2\ 1), \\
 &(1\ 4\ 7\ 8\ 3\ 5\ 7\ 6\ 1\ 6\ 4\ 2\ 3\ 8\ 5\ 2\ 1).
 \end{aligned}$$

Продолжая поднятие ЭМ графа  $v8e12$  из таблицы 4 получим  $80 \cdot 9 = 720$  ЭМ на графе  $v8e16$ . Организуя этот процесс с помощью программы получим 720 ЭМ за время соизмеримое с несколькими минутами, что значительно проще и быстрее, чем процесс перебора. Получение ЭМ на графе  $v8e16$  с помощью редукции является наиболее эффективным по сравнению с применением ГА в цикле или методом прямого перебора по числу полученных ЭМ за одинаковое время.

Однако метод редукции в значительной мере зависит от выбранной последовательности редукций. Число ЭМ на графе  $v8e16$  может оказаться большим, чем 720, если выбрать другую

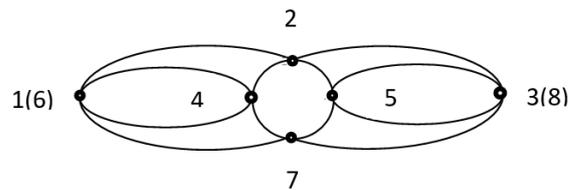


Рис. 6. Эйлеров граф  $v6e12$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Таблица 4**  
Эйлеровы маршруты графа  $v8e12-1$

№	ЭМ	№	ЭМ
1	1 2 3 5 2 4 6 7 5 8 7 4 1	41	1 4 2 3 5 7 4 6 7 8 5 2 1
2	1 2 3 5 2 4 6 7 8 5 7 4 1	42	1 4 2 3 5 7 6 4 7 8 5 2 1
3	1 2 3 5 2 4 7 5 8 7 6 4 1	43	1 4 2 3 5 8 7 4 6 7 5 2 1
4	1 2 3 5 2 4 7 8 5 7 6 4 1	44	1 4 2 3 5 8 7 6 4 7 5 2 1
5	1 2 3 5 7 4 2 5 8 7 6 4 1	45	1 4 2 5 7 4 6 7 8 5 3 2 1
6	1 2 3 5 7 4 6 7 8 5 2 4 1	46	1 4 2 5 7 6 4 7 8 5 3 2 1
7	1 2 3 5 7 6 4 2 5 8 7 4 1	47	1 4 2 5 8 7 4 6 7 5 3 2 1
8	1 2 3 5 7 6 4 7 8 5 2 4 1	48	1 4 2 5 8 7 6 4 7 5 3 2 1
9	1 2 3 5 7 8 5 2 4 6 7 4 1	49	1 4 6 7 4 2 3 5 7 8 5 2 1
10	1 2 3 5 7 8 5 2 4 7 6 4 1	50	1 4 6 7 4 2 3 5 8 7 5 2 1
11	1 2 3 5 8 7 4 2 5 7 6 4 1	51	1 4 6 7 4 2 5 7 8 5 3 2 1
12	1 2 3 5 8 7 4 6 7 5 2 4 1	52	1 4 6 7 4 2 5 8 7 5 3 2 1
13	1 2 3 5 8 7 5 2 4 6 7 4 1	53	1 4 6 7 5 2 3 5 8 7 4 2 1
14	1 2 3 5 8 7 5 2 4 7 6 4 1	54	1 4 6 7 5 2 4 7 8 5 3 2 1
15	1 2 3 5 8 7 6 4 2 5 7 4 1	55	1 4 6 7 5 3 2 4 7 8 5 2 1
16	1 2 3 5 8 7 6 4 7 5 2 4 1	56	1 4 6 7 5 3 2 5 8 7 4 2 1
17	1 2 4 6 7 5 2 3 5 8 7 4 1	57	1 4 6 7 5 8 7 4 2 3 5 2 1
18	1 2 4 6 7 5 3 2 5 8 7 4 1	58	1 4 6 7 5 8 7 4 2 5 3 2 1
19	1 2 4 6 7 8 5 2 3 5 7 4 1	59	1 4 6 7 8 5 2 3 5 7 4 2 1
20	1 2 4 6 7 8 5 3 2 5 7 4 1	60	1 4 6 7 8 5 2 4 7 5 3 2 1
21	1 2 4 7 5 2 3 5 8 7 6 4 1	61	1 4 6 7 8 5 3 2 4 7 5 2 1
22	1 2 4 7 5 3 2 5 8 7 6 4 1	62	1 4 6 7 8 5 3 2 5 7 4 2 1
23	1 2 4 7 8 5 2 3 5 7 6 4 1	63	1 4 6 7 8 5 7 4 2 3 5 2 1
24	1 2 4 7 8 5 3 2 5 7 6 4 1	64	1 4 6 7 8 5 7 4 2 5 3 2 1
25	1 2 5 3 2 4 6 7 5 8 7 4 1	65	1 4 7 5 2 3 5 8 7 6 4 2 1
26	1 2 5 3 2 4 6 7 8 5 7 4 1	66	1 4 7 5 2 4 6 7 8 5 3 2 1
27	1 2 5 3 2 4 7 5 8 7 6 4 1	67	1 4 7 5 3 2 4 6 7 8 5 2 1
28	1 2 5 3 2 4 7 8 5 7 6 4 1	68	1 4 7 5 3 2 5 8 7 6 4 2 1
29	1 2 5 7 4 2 3 5 8 7 6 4 1	69	1 4 7 5 8 7 6 4 2 3 5 2 1
30	1 2 5 7 4 6 7 8 5 3 2 4 1	70	1 4 7 5 8 7 6 4 2 5 3 2 1
31	1 2 5 7 6 4 2 3 5 8 7 4 1	71	1 4 7 6 4 2 3 5 7 8 5 2 1
32	1 2 5 7 6 4 7 8 5 3 2 4 1	72	1 4 7 6 4 2 3 5 8 7 5 2 1
33	1 2 5 7 8 5 3 2 4 6 7 4 1	73	1 4 7 6 4 2 5 7 8 5 3 2 1
34	1 2 5 7 8 5 3 2 4 7 6 4 1	74	1 4 7 6 4 2 5 8 7 5 3 2 1
35	1 2 5 8 7 4 2 3 5 7 6 4 1	75	1 4 7 8 5 2 3 5 7 6 4 2 1
36	1 2 5 8 7 4 6 7 5 3 2 4 1	76	1 4 7 8 5 2 4 6 7 5 3 2 1
37	1 2 5 8 7 5 3 2 4 6 7 4 1	77	1 4 7 8 5 3 2 4 6 7 5 2 1
38	1 2 5 8 7 5 3 2 4 7 6 4 1	78	1 4 7 8 5 3 2 5 7 6 4 2 1
39	1 2 5 8 7 6 4 2 3 5 7 4 1	79	1 4 7 8 5 7 6 4 2 3 5 2 1
40	1 2 5 8 7 6 4 7 5 3 2 4 1	80	1 4 7 8 5 7 6 4 2 5 3 2 1

последовательность редукиций.

Проводя дальнейшую редукицию, исключим у графа  $v8e12$  вершины 6 и 8, соединив вершину 1 с вершиной 6, а вершину 3 с вершиной 8. Это уменьшит в графе число вершин на две. Редукиция будет представлять собой граф  $v6e12$  (рисунк б).

Подсчет числа ЭМ методом перебора на графе  $v6e12$  дает 312 ЭМ за время 4376,7  $\approx$  1 час 13 минут на двухядерном компьютере. Приведенное время расчета позволяет оценить время расчета

методом перебора маршрутов на исходном (нередуцированном) графе  $v8e16$ . Так как число вершин у графа  $v8e16$  больше чем у  $v6e12$  на две, то при переборе циклы увеличиваются на две итерации и возрастает время до значения:

$$4376,7 * 8 * 8 = 644376,1 \text{ сек} = 192548,4 \text{ сек} / 3600 = 53,49 \text{ часов.}$$

Так как в графе  $v8e16$  на четыре ребра больше, то время увеличится и станет равным:

$$53,49 \text{ час} * 8 * 8 * 8 \approx 219136 \text{ час} \approx 9130,7 \text{ суток} / 365 \approx 25 \text{ лет.}$$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Этот расчет выполняемый на 16 ядерном компьютере приведет к уменьшению времени счета в 8 раз и получим время счета равное  $\approx 3,125$  лет., т.е. это NP задача по времени счета. Число маршрутов 312 на графе  $v_{6e}12$  является достаточно большим. Сокращенный состав ЭМ приведен в *таблице 5*.

В *таблице 5* полужирным шрифтом выделены пары одинаковых вершин в тех ЭМ графа  $v_{6e}12$ , которые являются МНМ с  $n_{МНМ}=5$ .

Восстановим из первого ЭМ графа  $v_{6e}12$  (1 2 3 5 2 4 1 4 7 3 5 7 1) маршрут на графе  $v_{8e}16$ . Для этого надо вставить по две вершины 6 и 8 в каждый маршрут *таблицы 5*. Вершина 6 вставляется между вершинами (1 7) и (1 4), а вершина 8 между вершинами (3 5) и (3 7). После подстановки по две вершины 6 и 8 в первый маршрут (1 2 3 5 2 4 1 4 7 3 5 7 1) получим четыре различных маршрута на графе  $v_{8e}16$ :

- (1 2 3 **8** 5 2 4 1 **6** 4 7 **8** 3 5 7 **6** 1),
- (1 2 3 **8** 5 2 4 **6** 1 4 7 **8** 3 5 7 **6** 1),
- (1 2 3 5 2 4 **6** 1 4 7 **8** 3 **8** 5 7 **6** 1),
- (1 2 3 5 2 4 1 **6** 4 7 **8** 3 **8** 5 7 **6** 1)

Так как из каждого 312 маршрутов получается по четыре различных маршрута на ЭГ  $v_{8e}16$ , то на нем существует  $312 \cdot 4 = 1248$  маршрутов. Если рассмотреть подъем маршрута  $m_{60} = (1 2 5 3 7 1 4 2 3 5 7 4 1)$  с числом мониторинга  $n_{МММ} = 5$ , то из него получим:

- (1 2 5 **3** 8 7 **6** 1 4 2 **3** 8 5 7 4 **6** 1),
- (1 2 5 **8** 3 8 7 **6** 1 4 2 3 5 7 4 **6** 1),
- (1 2 5 **8** 3 8 7 **6** 1 **6** 4 2 3 5 7 4 1),
- (1 2 5 **3** 8 7 **6** 1 **6** 4 2 3 8 5 7 4 1).

Первый из четырех ЭМ на графе  $v_{8e}16$  является МНМ с числом  $n_{МНМ} = 6$ .

Преобразование маршрутов редукции  $v_{6e}12$  в ЭМ графа  $v_{8e}16$  может быть осуществлено автоматически с помощью программы.

К МНМ графа редукции  $v_{6e}12$  из *таблицы 8* относятся 8 ЭМ:

- $m_1 = (1 2 3 5 7 1 4 2 5 3 7 4 1)$ ,
- $m_2 = (1 2 5 3 7 1 4 2 3 5 7 4 1)$ ,
- $m_3 = (1 4 2 3 5 7 4 1 2 5 3 7 1)$ ,
- $m_4 = (1 4 2 5 3 7 4 1 2 3 5 7 1)$ ,
- $m_5 = (1 4 7 3 5 2 4 1 7 5 3 2 1)$ ,
- $m_6 = (1 4 7 5 3 2 4 1 7 3 5 2 1)$ ,
- $m_7 = (1 7 3 5 2 1 4 7 5 3 2 4 1)$ ,
- $m_8 = (1 7 5 3 2 1 4 7 3 5 2 4 1)$ .

Здесь выделены пары одинаковых вершин, которые отстоят друг от друга на минимальное расстояние равное  $5 = n_{МММ}$ . Поднимая эти ЭМ до маршрутов на графе  $v_{8e}16$ , получим из  $m_1$ :

- $m_{11} = (1 2 3 5 7 6 1 6 4 2 5 8 3 8 7 4 1)$ ,
- $m_{12} = (1 2 3 5 7 6 1 4 2 5 8 3 8 7 4 6 1)$ ,
- $m_{13} = (1 2 3 8 5 7 6 1 6 4 2 5 3 8 7 4 1)$ ,
- $m_{14} = (1 2 3 8 5 7 6 1 4 2 5 3 8 7 4 6 1)$ .

Из  $m_2$  получим ЭМ маршруты на графе  $v_{8e}16$ :

- $m_{21} = (1 2 5 8 3 8 7 6 1 6 4 2 3 5 7 4 1)$ ,
- $m_{22} = (1 2 5 8 3 8 7 6 1 4 2 3 5 7 4 6 1)$ ,
- $m_{23} = (1 2 5 3 8 7 6 1 6 4 2 3 8 5 7 4 1)$ ,
- $m_{24} = (1 2 5 3 8 7 6 1 4 2 3 8 5 7 4 6 1)$ .

Из  $m_3$  получим ЭМ маршруты на графе  $v_{8e}16$ :

- $m_{31} = (1 6 4 2 3 8 5 7 4 1 2 5 3 8 7 6 1)$ ,
- $m_{32} = (1 4 2 3 8 5 7 4 6 1 2 5 3 8 7 6 1)$ ,
- $m_{33} = (1 6 4 2 3 5 7 4 1 2 5 8 3 8 7 6 1)$ ,
- $m_{34} = (1 4 2 3 5 7 4 6 1 2 5 8 3 8 7 6 1)$ .

**Таблица 5**

Эйлеровы маршруты на графе  $v_{6e}12$

№	Упорядоченные наборы ЭМ методом перебора		
1	1 2 3 5 2 4 1 7 5 3 7 4 1	1 4 1 7 3 5 7 4 2 3 5 2 1	1 4 7 3 5 7 1 2 5 3 2 4 1
2	1 2 3 5 2 4 7 3 5 7 1 4 1	1 4 1 7 3 5 7 4 2 5 3 2 1	1 4 7 3 5 7 1 4 2 3 5 2 1
3	<b>1 2 3 5 7 1 4 2 5 3 7 4 1</b>	1 4 1 7 5 3 7 4 2 3 5 2 1	<b>1 4 7 5 3 2 4 1 7 3 5 2 1</b>
4	1 2 4 7 5 2 3 5 3 7 1 4 1	<b>1 4 2 3 5 7 4 1 2 5 3 7 1</b>	1 7 3 2 4 7 5 3 5 2 1 4 1
5	1 2 5 3 5 7 4 2 3 7 1 4 1	1 4 2 5 3 7 1 4 7 5 3 2 1	1 7 3 5 2 1 4 2 3 5 7 4 1
6	1 2 5 <b>3 7 1 4 2 3 5 7 4 1</b>	<b>1 4 2 5 3 7 4 1 2 3 5 7 1</b>	<b>1 7 3 5 2 1 4 7 5 3 2 4 1</b>
7	1 4 1 2 5 3 5 7 3 2 4 7 1	1 4 2 3 7 4 1 7 5 3 5 2 1	1 7 5 3 2 1 4 2 5 3 7 4 1
8	1 4 1 2 5 3 5 7 4 2 3 7 1	1 4 2 3 7 5 3 5 2 1 4 7 1	<b>1 7 5 3 2 1 4 7 3 5 2 4 1</b>
9	1 4 1 2 3 7 5 3 5 2 4 7 1	1 4 7 3 <b>5 2 4 1 7 5 3 2 1</b>	1 7 5 3 2 4 1 2 5 3 7 4 1
10	1 4 1 2 4 7 3 2 5 3 5 7 1	1 4 7 3 5 3 2 1 4 2 5 7 1	1 7 5 3 2 4 1 4 7 3 5 2 1
...	...	...	...
98	1 4 1 2 5 7 4 2 3 5 3 7 1	1 4 7 3 5 2 4 1 2 3 5 7 1	1 7 5 3 5 2 4 7 3 2 1 4 1
99	1 4 1 7 3 2 4 7 5 3 5 2 1	1 4 7 3 5 3 2 1 7 5 2 4 1	1 7 5 3 7 4 1 2 3 5 2 4 1
100	1 4 1 7 3 2 5 3 5 7 4 2 1	1 4 7 3 5 3 2 4 1 2 5 7 1	1 7 5 3 7 4 1 2 5 3 2 4 1
101	1 4 1 7 3 5 2 3 5 7 4 2 1	1 4 7 3 5 3 2 4 1 7 5 2 1	1 7 5 3 7 4 1 4 2 3 5 2 1
102	1 4 1 7 3 5 2 4 7 5 3 2 1	1 4 7 3 5 3 2 5 7 1 2 4 1	1 7 5 3 7 4 1 4 2 5 3 2 1
103	1 4 1 7 3 5 3 2 4 7 5 2 1	1 4 7 3 5 3 2 5 7 1 4 2 1	1 7 5 3 7 4 2 3 5 2 1 4 1
104	1 4 1 7 3 5 3 2 5 7 4 2 1	1 4 7 3 5 7 1 2 3 5 2 4 1	1 7 5 3 7 4 2 5 3 2 1 4 1

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Из  $m_4$  получим ЭМ маршруты на графе  $v8e16$ :

- $m_{41} = (1 \mathbf{6} 4 2 5 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 7 4 1 2 3 5 7 \mathbf{6} 1),$
- $m_{42} = (1 4 2 5 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 7 4 \mathbf{6} 1 2 3 5 7 \mathbf{6} 1),$
- $m_{43} = (1 \mathbf{6} 4 2 5 3 \mathbf{8} 7 4 1 2 3 \mathbf{8} 5 7 \mathbf{6} 1),$
- $m_{44} = (1 \mathbf{4} 2 5 3 \mathbf{8} 7 \mathbf{4} \mathbf{6} 1 2 3 \mathbf{8} 5 7 \mathbf{6} 1).$

Из  $m_5$  получим ЭМ маршруты на графе  $v8e16$ :

- $m_{51} = (1 \mathbf{6} 4 7 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 5 2 4 1 \mathbf{6} 7 5 3 2 1),$
- $m_{52} = (1 4 7 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 5 2 4 \mathbf{6} 1 \mathbf{6} 7 5 3 2 1),$
- $m_{53} = (1 \mathbf{6} \mathbf{4} 7 \mathbf{8} 3 5 2 \mathbf{4} 1 \mathbf{6} 7 5 \mathbf{8} 3 2 1),$
- $m_{54} = (1 4 7 \mathbf{8} 3 5 2 4 \mathbf{6} 1 \mathbf{6} 7 5 \mathbf{8} 3 2 1).$

Из  $m_6$  получим ЭМ маршруты на графе  $v8e16$ :

- $m_{61} = (1 \mathbf{6} \mathbf{4} 7 5 \mathbf{8} 3 2 \mathbf{4} 1 \mathbf{6} 7 \mathbf{8} 3 5 2 1),$
- $m_{62} = (1 \mathbf{6} 4 7 5 3 2 4 1 \mathbf{6} 7 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 5 2 1),$
- $m_{63} = (1 4 7 5 3 2 4 \mathbf{6} 1 \mathbf{6} 7 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 5 2 1),$
- $m_{64} = (1 4 7 5 \mathbf{8} 3 2 4 \mathbf{6} 1 \mathbf{6} 7 \mathbf{8} 3 5 2 1).$

Из  $m_7$  получим ЭМ маршруты на графе  $v8e16$ :

- $m_{71} = (1 \mathbf{6} 7 \mathbf{8} 3 5 2 1 \mathbf{6} \mathbf{4} 7 5 \mathbf{8} 3 2 \mathbf{4} 1),$
- $m_{72} = (1 7 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 5 2 1 \mathbf{6} \mathbf{4} \mathbf{6} 7 5 3 2 4 1),$
- $m_{73} = (1 7 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 5 2 1 4 7 \mathbf{6} 5 3 2 4 \mathbf{6} 1),$
- $m_{74} = (1 \mathbf{6} 7 \mathbf{8} 3 5 2 1 4 7 5 \mathbf{8} 3 2 4 \mathbf{6} 1).$

Из  $m_8$  получим ЭМ маршруты на графе  $v8e16$ :

- $m_{81} = (1 \mathbf{6} 7 5 \mathbf{8} 3 2 1 \mathbf{6} \mathbf{4} 7 \mathbf{8} 3 5 2 \mathbf{4} 1),$
- $m_{82} = (1 \mathbf{6} 7 5 3 2 1 \mathbf{6} 4 7 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 5 2 4 1),$
- $m_{83} = (1 \mathbf{6} 7 5 3 2 1 4 7 \mathbf{8} 3 \mathbf{8} 5 2 4 \mathbf{6} 1),$
- $m_{84} = (1 \mathbf{6} 7 5 \mathbf{8} 3 2 1 4 7 \mathbf{8} 3 5 2 4 \mathbf{6} 1).$

Черным полужирным шрифтом выделены вставленные пары вершин при подъеме эйлеровых маршрутов графа  $v6e12$  в ЭМ графа  $v8e16$ .

Красным шрифтом выделены пары одинаковых вершин, которые отстоят в ЭМ графа  $v8e16$  друг от друга на минимальное расстояние равное  $6 = n_{\text{МНМ}}$ . Здесь наблюдается преобразование между маршрутами наибольшего мониторинга графа  $v6e12$  и  $v8e16$ : при подъеме маршрута наибольшего мониторинга меньшего графа он порождает маршрут наибольшего мониторинга графа большего графа.

На графе  $v6e12$  из таблицы эйлеровых маршрутов графа  $v6e12$  при подъеме до ЭМ графа  $v8e16$  порождают  $3 \cdot 2^4 = 1248$  ЭМ.

Метод редукции является наиболее эффективным по сравнению с применением в цикле генетического алгоритма и метода перебора при нахождении эйлеровых маршрутов на графах большой размерности.

Граф  $v6e12$  (рисунк 6) является гамильтоновым и на нем восемь ГМ, которые можно получить из ГМ таблицы 1 отбрасывая вершины 6 и 8.

Из подсчета ГМ на графе  $v8e14$  с помощью ре-

дукции можно отметить, что башней редукций [5] является последовательность графов

$$v4e4 \rightarrow v6e12 \rightarrow v8e14. \quad (11)$$

На графе  $v4e4$  (рисунк 3) два гамильтонова маршрута:  $(1 2 4 5 1)$  и  $(1 5 4 2 1)$ , на графе  $v6e12$  (рисунк 6) согласно таблице 6 – восемь гамильтоновых маршрутов, на графе  $v8e14$  (рисунк 2б) – 18 гамильтоновых маршрутов.

### Выводы

Генетический алгоритм применяемый в цикле позволяет с помощью целевых функции графов находить эйлеровы или гамильтоновы маршруты [8,9,10]. Ограниченное число ЭМ или ГМ, полученное ГА, может быть увеличено в несколько раз за счет преобразований  $\gamma_{\text{обр}}, \gamma_{\text{раз}}$  и применения автоморфизмов графа  $\{\gamma_{\text{авт}}\}$ .

Редукция графа с большим числом вершин и ребер, примененная несколько раз приводит к последовательности редукций графов с меньшим числом вершин и ребер, на которых эйлеровы или гамильтоновы маршруты могут быть известны или подсчитаны методом перебора. Поднятие маршрутов позволяет за счет вставки номеров вершин получить большое число маршрутов на графах большой размерности. При этом время, затраченное на расчет, может быть полиномиальным [5].

Число полученных маршрутов (эйлеровых или гамильтоновых) зависит от проведенной редукции. Это число может быть в несколько раз меньше, чем общее число маршрутов на большом графе.

Редукция графов на рассмотренных примерах показывает, что она не позволяет вычислить все маршруты, как это получается у алгоритма перебора, но позволяет найти большое множество маршрутов за полиномиальное время.

### Литература

1. Дараган А.Д. Системы искусственного интеллекта. Монография / А.Д. Дараган, Э.М. Руденко, В.С. Залогин, А.А. Ефремов, А.С. Андреев, М.А. Финогенов, В.В. Чуринов. Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. 205 с.
2. Руденко Э.М., Семикина Е.В. Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, трансцендентные целевые функции графа и генетический алгоритм // Научные технологии в космических

**Таблица 6**  
Гамильтоновы маршруты на графе  $v6e12$

1	1 2 3 5 7 4 1	3	1 4 2 3 5 7 1	5	1 4 7 5 3 2 1	7	1 7 5 3 2 4 1
2	1 2 5 3 7 4 1	4	1 4 2 5 3 7 1	6	1 4 7 3 5 2 1	8	1 7 3 5 2 4 1

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

исследованиях Земли, 2021. Т.13. №1. С. 6-16.

3. Руденко Э.М., Семикина Е.В. Математическое обеспечение расчета маршрутов по графу реперов на местности генетическим алгоритмом // I-methods, 2022. Т.14. №3. С. 1-27.

4. Руденко Э.М., Семикина Е.В. Определение маршрута максимального мониторинга на графе реперов на местности // I-methods, 2023. Т.15. №1. С. 1-32.

5. Арсан Л.Ф. Существуют ли нерешенные проблемы? Математика, сложность и вычисление // Мир математики, 2014. Т.43. 144 с.

6. Алгоритмы. Руководство по разработке. 2- изд.: Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2017. 720 с.

7. Руденко Э.М., Семикина Е.В., Радунцев А.В.,

Ильин Д.В. Расчет эйлеровых маршрутов на графе с помощью редукции и методом перебора / Научно-технический сборник. ФВА РВСН им. Петра Великого, 2023. Ч.1. С. 170-175.

8. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика: Учеб. пособ. СПб.: ГУап, 2008. 164 с.

9. Руденко Э.М., Семикина Е.В. Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, трансцендентные целевые функции графа и генетический алгоритм // Научно-технический сборник. ФВА РВСН им. Петра Великого, 2021. Т.13. №1. С. 4-14.

10. Herrera F. Tackling real-coded genetic algorithms: operators and tools for the behaviour analysis / F. Herrera, M. Lozano, J.L. Verdegay // Artificial Intelligence Review, 1998. V.12. № 4.





**Валерий Александрович Коломбет**  
кандидат физико-математических наук  
заведующий лабораторией  
Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл.,  
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3  
Тел.: +7(4967)73-92-62  
E-mail: v.kolombet@rambler.ru

УДК 004.8+615.214+612.821+616.89+629.8

### **ПЕРСПЕКТИВА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В БИОФИЗИЧЕСКОМ ПСИХОАНАЛИЗЕ PERSPECTIVE OF PHYSIOLOGICAL RESEARCH IN BIOPHYSICAL PSYCHOANALYSIS**

**Вадим Николаевич Лесных**  
младший научный сотрудник  
Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики РАН  
E-mail: 1253vadim@mail.ru

**Александр Владимирович Елистратов**  
ведущий инженер научного подразделения  
Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики РАН  
Тел.: +7 (4967) 73-94-64  
E-mail: unenlagia@yandex.ru

#### **Аннотация**

Фармакология – наука о физиологически активных веществах. В статье представлены результаты физиологического воздействия психоактивного вещества, выбранного из стандартного арсенала современной медицины. Новизна в том, что воздействие этого вещества тестировалось посредством т.н. биофизического варианта психоанализа. В рамках этого подхода мы исследовали феномен мышления и нашли, что спектр вербальных, т.е. словесных ассоциаций, вызванных любым объектом внимания, жёстко связан с настроением: при каждой смене объекта внимания происходит скачок в соседнее состояние настроения. При выполнении специально разработанного цепного вербального теста теперь можно выявить последовательность переключений по обнаруженной восьмерке состояний настроения. Многомесячные серии таких тестов позволяют отслеживать тренды процессов мышления, и, что особенно важно на практике, отслеживать в том числе у людей с ментальными проблемами. Один пример подробно рассмотрен в статье. Он, в частности, показал, что в процессе применения выбранного фармакологического вещества может возникать наряду с доминирующим позитивным также и кратковременный негативный эффект – депрессия. Для её компенсации мы предложили использовать специальные антидепрессанты. В более широкой перспективе использования всего этого подхода, возникает возможность уточнения свойств т.н. человеческого фактора, нередко проявляющегося в авариях и техногенных катастрофах. С другой стороны, понимание особенностей структуры естественного интеллекта человека может оказаться основой для применения в робототехнике и, возможно, в новых версиях искусственного интеллекта, а также при профессиональном отборе специалистов. Ну и, конечно, достаточно хорошо выражены перспективы использования этого подхода в фармакологии и медицине. Например, в статье предложен способ объективного определения аномалий мышления, не зависящий от воли претендента (например, кандидата на пост оператора системы, чреватой катастрофами).

**Ключевые слова:** психоанализ, фармакология, объект внимания, настроение, цепной вербальный тест.

#### **Summary**

Pharmacology is the science of physiologically active substances. This article presents the results of the physiological impact of a psychoactive substance selected from the standard arsenal of modern medicine. The novelty lies in the fact that the impact of this substance was tested using the so-called biophysical variant of psychoanalysis. Within this approach, we investigated the phenomenon of thinking and found that the spectrum of verbal, i.e., word associations, triggered by any object of attention, is tightly linked to mood: each shift in the object of attention results in a jump to an adjacent mood state. By performing a specially developed chain verbal test, it is now possible to identify the sequence of switches through the discovered eight states of mood. Multi-month series of such tests allow tracking the trends of thought processes and, importantly, monitoring individuals with mental issues. One example is examined in detail in the article. It specifically showed that during the application of the

selected pharmacological substance, a short-term negative effect – depression – may arise alongside the dominant positive effect. To compensate for this, we proposed the use of special antidepressants. In a broader perspective, the use of this entire approach offers the possibility of refining the properties of the so-called human factor, which often manifests in accidents and technological disasters. On the other hand, understanding the peculiarities of the structure of natural human intelligence may serve as a basis for application in robotics and possibly in new versions of artificial intelligence, as well as in professional selection of specialists. And, of course, the prospects for using this approach in pharmacology and medicine are quite well expressed. For example, the article proposes a method for objectively determining thought anomalies, independent of the will of the candidate (e.g., a candidate for the position of an operator of a system prone to disasters).

**Keywords:** psychoanalysis, pharmacology, object of attention, mood, verbal chain test.

### Введение

При решении задач, связанных с традиционными взглядами на природу т.н. человеческого фактора, на повышение возможностей робототехники, искусственного интеллекта, медицины и пр. ещё не учитываются достижения т.н. биофизического психоанализа [1,2]. Мы исследовали влияние на настроение человека тех вербальных ассоциаций, которые вызываются объектом внимания. Оказалось, что эти ассоциации настолько тесно связаны с настроением человека, что при смене объекта внимания настроение изменяется крупным скачком. Нейрофизиологическую основу этого явления можно обнаружить в работах [3,4], где показано, что внимание реализуют две взаимосвязанные подсистемы мозга; одна из них, скажем так, следит за лейтмотивом, т.е. поддерживает цель, а вторая резко переключает внимание и при этом сильно изменяет настроение.

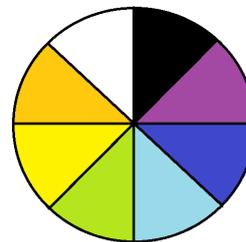
Идея о двух отдельных сетях внимания в человеческом мозге – т.н. дорсальной и вентральной: для, соответственно, произвольного распределения внимания и для переориентации внимания на неожиданные события [3], соответственно, – вдохновила огромное количество исследований за последние годы [4].

Эту систему взаимосвязанных систем внимания легко превратить в удобный механизм исследования мышления, заставив её постоянно перезапускаться. Для этого достаточно выходной сигнал второй системы направить на вход первой. По-видимому, на животных это можно сделать различными способами, мы же при изучении мышления человека используем т.н. цепной вербальный тест [5]. В начале теста мы просим испытуемого принять предлагаемый алгоритм тестирования, где, выбрав произвольное слово, он начнёт выписывать к этому слову ассоциации, а после  $\sim 5 \div 10$  ассоциаций завершить этот этап, и, заикливая тестирование, в качестве следующего, на этот раз уже не произвольного слова выбрать последнее из только что записанных слов и выписывать следующие ассоциации уже к этому слову. И так далее. В настоящий момент мы обрабатываем каждый из

таких очередей ассоциаций программой оценки тональности слов, а серию численных итогов оценок тональности обрабатываем уже другой программой («программой раскраски» в последовательные цвета *рисунка 1*).

Легко увидеть грубую техническую аналогию этой системы: переключения положений вала шагового двигателя. Там точно так же учитывается положение угла поворота перед следующим шагом, а также имеется стандартная величина шага и возможность иногда изменять направление шага. Наши исследования показали, что с вероятностью около 0.99 в системе переключения внимания у человека найдётся именно восемь выделенных состояний, как может быть и в специально подобранном шаговом двигателе. На *рисунке 1* феномен зависимости состояния настроения от объекта внимания оформлен в виде круга ментальных состояний.

Относительно безэмоциональные входное и выходное ментальные состояния, позволяющие на сравнительно спокойном эмоциональном фоне отслеживать физическую реальность (это особенное ментальное состояние «бодрствование») и корректировать доступную часть физической реальности изменением собственного поведения (это уже особенное ментальное состояние «действие»), изображены, соответственно,



**Рис. 1.** Круг ментальных состояний. Два почти безэмоциональных состояния («входное» и «выходное») представлены двумя бесцветными секторами – белым и черным, а остальные состояния – это секторы на рисунке, окрашенные в различные цвета радуги; они отчетливо связаны с хорошим и плохим настроением разной интенсивности и специфики. Сектора экстремумов хорошего и плохого настроения покрашены, соответственно, желтым и синим

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

как белый и черный сектора круга. Остальные ментальные состояния более отчетливо связаны с эмоциями. Соответствующие секторы покрашены на *рисунке 1* в разные цвета радуги и концентрируются возле желтого и синего секторов – центров позитивного и негативного настроения. Центр негативного настроения помогает выжить, а центр позитивного ещё и решить центральную биологическую задачу: производство потомства [5]. Позитивный сектор и пара его соседей окрашены на *рисунке 1* в теплые цвета: оранжевый, желтый и зеленый, а негативный и его ближайшие соседи окрашены в холодные цвета: голубой, синий и лиловый. По сути, этой простой картиной мы совсем мало отличаемся от примитивных микроорганизмов, чей набор соответствующих цветов – черный, белый, желтый и синий – лишь немного попроще; два последних – это известные положительный и отрицательный таксисы.

В биофизическом психоанализе эмпирически обосновано, что верхнюю точку окружности ментального круга (точку стыка белого и черного секторов) можно отождествить с точкой биологического самоосознания (Я) человека: сначала это определенное Фрейдом бесполое ИД младенца, потом это самоосознание подростка, которое мы назвали Я-маугли, перерастающее затем в кинестетическое Я, важный фрагмент составного Супер-Эго взрослого человека [6,7]. Нижняя точка окружности ментального круга у человека как биосоциального существа связывается с осознанием человеком себя членом сообщества – семьи, нации, человечества; это т.н. социальное Я.

На *рисунке 2* представлен вид характерных блоков ассоциаций: **pipo**, **nipo**, **nino** и **pino**, которые, как оказалось, легко выделить в результатах тестирования. Здесь буквы **p** и **n**, происходят от слов, соответственно, **positive** и **negative**, а буквы **i** и **o** от **in** и **out**. Например, фрагмент – **po** – расшифровывается как **positive out**, т.е. как «находящийся в области позитивного настроения,

выходной фрагмент»). Дополнительные символы «+» и «-» (см. *таблицы 2, 3 и 4*) указывают на присутствие «лишних» тем ассоциаций и, соответственно, на их недостаток.

Предметом этой статьи является один из прикладных аспектов применения биофизического варианта психоаналитического метода свободных ассоциаций – чувствительность этой техники к изменениям хода ментальных процессов у человека.

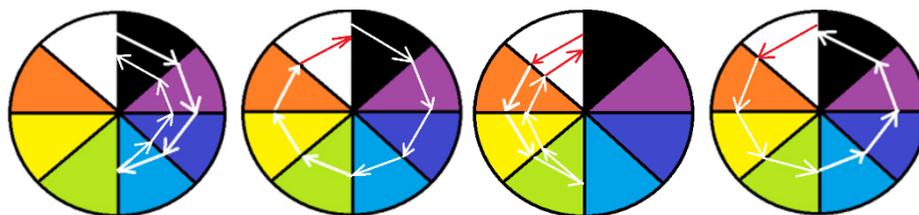
### Результаты

Картину своего мышления в образах биофизического психоанализа каждый легко определит, например, используя Интернет-ресурс [golosaVgolove.ru](http://golosaVgolove.ru) [7]. Там приведена 300-страничная монография первого автора этой статьи, дающая описание процесса цепного вербального тестирования, где последняя из серии ассоциаций определяет тему следующей серии ассоциаций. На этом же сайте приводится автоматизированный вариант цепного вербального теста, который позволяет облегчить и стандартизовать процесс тестирования.

Обучающим примером успешного тестирования может быть *таблица 1*.

Расшифровку этой записи теста можно записать в виде длинного ментального кода **po-piporiponiporipo**. Однако все такие коды мы дополнительно прерываем пробелом в момент пересечения верхней точки ментального круга. В результате этот код принимает более удобочитаемый вид **po pipo pipo nino pipo**. Этот код также может быть представлен в форме рисунка-ментограммы (*рисунк 3*).

На основе компьютерного анализа эмоциональной тональности слов (в данном случае посредством метода VADER) накоплена следующая числовая оценка положительного эмоционального содержания слов более достоверной (левой) половины ментограммы: **0.13**, **0.25**, **0.43**, **0.18**. Как и предполагается в биофизическом психоанализе, максимум хорошего настроения при-



**Рис. 2.** Четверка фрагментов мышления **pipo**, **nipo**, **nino** и **pino**, выявляемых т.н. цепным вербальным тестом при сканировании мышления в биофизическом варианте психоаналитического метода свободных ассоциаций [7-13]. Серии стрелок указывают на расположение и на направление переключений настроения, сопровождающих процесс тестирования. По сути, **pipo**, **nipo**, **nino** и **pino** – это варианты рейда мышления здорового взрослого человека из фундаментального биологического Я в его социальное Я и обратно

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

Таблица 1

Раскрашенный в соответствии с *рисунком 1* пример результата тестирования [7], дополненного разбиением преимущественно на 8-строчные фрагменты (ср. с *рисунком 2*). Слева см. вербальные объекты внимания, в центре вербальные ассоциации к ним, справа – коды

<b>Любовь:</b>	Жизнь, Мечты, Отношения, Люди, Объятия, Забота,	po
<b>Забота:</b>	Тепло, Бережно, Уют, Помощь, Поддержка,	
<b>Поддержка:</b>	Плечо, Опора, Друг, Брат, Опора,	
<b>Опора:</b>	Рука, Спина, Тело, Я, Пара,	
<b>Пара:</b>	Второй, Друг, Муж, Семья, Друзья,	piro
<b>Друзья:</b>	Сила, Развитие, Отдых, Разговоры, Путешествия, Встреча,	
<b>Встреча:</b>	Свидание, Поход, Прогулка, Дружба, Любовь, Приветствие,	
<b>Приветствие:</b>	Рукопожатие, Объятия, Привет, Встреча, Знакомство,	
<b>Знакомство:</b>	Неловкость, Новое, Имя, Человек, Разговор,	
<b>Разговор:</b>	Свидание, Встреча, Диалог, Визави, Доверие,	
<b>Доверие:</b>	Вера, Тепло, Руки, Близко, Раскрываться, Говорить, Молчать, Признание,	
<b>Признание:</b>	Правда, Истина, Честность, Чувства,	piro
<b>Чувства:</b>	Злость, Гнев, Грусть, Радость, Счастье,	
<b>Счастье:</b>	Мурашки, Сердце, Тепло, Цветы, Ощущения, Любовь,	
<b>Любовь:</b>	Радость, Согласие, Принятие, Счастье, Поцелуй,	
<b>Поцелуй:</b>	Нежность, Дети, Мужчина, Свидание, Чувства, Касание,	
<b>Касание:</b>	Пальцы, Нежность, Руки, Тело, Душа, Любовь,	
<b>Любовь:</b>	Касаться, Дружба, Страсть, Сердце, Нежность, Жизнь,	
<b>Жизнь:</b>	Росток, Рост, Движение, Кризис, Счастье, Принятие,	
<b>Принятие:</b>	Жизнь, Развитие, Плохое, Хорошее, Правда, Боль, Радость,	piro
<b>Радость:</b>	Чувство, Эмоция, Эндорфины, Серотонин, Мурашки, Улыбка, Смех, Момент,	
<b>Момент:</b>	Здесь, Сейчас, Жизнь, Чувствовать, Тело, Мир,	
<b>Мир:</b>	Планета, Человек, Рождение, Смерть, Наука, Созидание, Разрушение,	
<b>Разрушение:</b>	Крах, Обнуление, Осколки, Развалины, Пепел, Остов,	
<b>Остов:</b>	Корабль, Обломки, Развалины, Скелет, Основа,	
<b>Основа:</b>	База, Фундамент, Знания, Скелет, Спина,	
<b>Спина:</b>	Опора, Позвоночник, Мышцы, Сила, Род,	
<b>Род:</b>	Семья, Колено, Родители, Сила, Энергия, Дети,	piro
<b>Дети:</b>	Семья, Муж, Любовь, Ответственность, Коляска, Школа, Обучение,	
<b>Обучение:</b>	Уроки, Знания, Наука, Опыт, Жизнь, Развитие, Созидание,	
<b>Созидание:</b>	Создавать, Рождение, Новое, Наука, Реализация, Предназначение,	
<b>Предназначение:</b>	Реализация, Намерение, Зов, Природа, Дело, Душа, Сердце,	
<b>Сердце:</b>	Душа, Тепло, Кровь, Любовь, Доверие, Семья,	
<b>Семья:</b>	Жизнь, Свет, Любовь, Дружба, Доверие, Забота,	
<b>Забота:</b>	Уют, Помощь, Поддержка, Друг, Нежность,	
<b>Нежность:</b>	Любовь, Касаться, Обнимать, Любить, Заботиться,	

шёлся на желтый сектор. Вычисления были выполнены посредством искусственного интеллекта – чат-бота, использующего языковую модель gpt-3.5-turbo для численных оценок эмоционального содержания ассоциаций в тестах. Графическое представление многонедельной эволюции

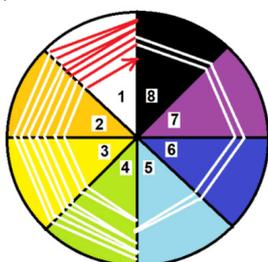
восьмёрки настроений см. на *рисунке 4*. Для этого использован 35-дневный фрагмент серии ментальных кодов, извлечённый из многомесячной серии тестов волонтера (см. *таблицу 2*).

Кстати, этот волонтер оказался хорошо мотивированным молодым человеком. Задавшись

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

целью избавиться от вставших перед ним грозных ментальных проблем, он решительно отказался от продолжения соблазнительной практики курения наркотических средств и попытался избавиться от шизофрении, обнаруженной у него вскоре после окончания университета. Для спасения, он целенаправленно искал любые методики, в том числе те, которые можно сейчас попытаться назвать паллиативными. Он жаловался «...я ходил в церковь, и там мне сказали, что таких как я раньше сжигали на кострах, и я отрекался от сатаны. Я также обращался в психиатрическую больницу, и там меня кололи уколами. И к магам из Москвы я ездил, что дало временный и не долгий результат...». Важно, что при этом он не прерывал поддерживающего лечения в психоневрологическом диспансере. В период нашего чисто эпистолярного общения, ввиду сложности возможных проблем, нам пришлось сохранить взаимное инкогнито и ограничить общение обменом электронными письмами. Не получив тогда немедленной помощи, волонтер переключился на тесное взаимодействие в Интернете с сайтом, объединившим больных шизофренией. Архив, содержащий записи тестов безымянного волонтера, а также журнал его ежедневных самонаблюдений за этот период понадобился лишь после того, когда биофизический психоанализ вышел на качественно новый уровень (см. [7-13]), используя, среди прочего, возможность вычисления количественных оценок тональности слов. Дополнительно была использована информация с сайта golosaVgolove.ru.

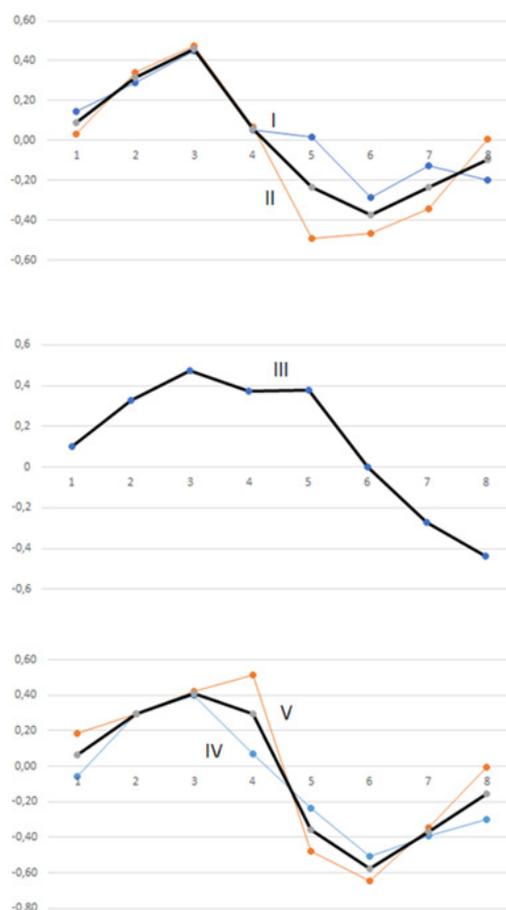
В таблице 2 достаточно информации для накопления удовлетворительно достоверных численных оценок эмоциональной тональности по всем секторам ментального круга. Рисунок 4 иллюстрирует, что на первой (I) и второй (II) неделях этой серии тестирования у волонтера была выявлена волнообразная форма кривой настроения. К рисунку добавлена также волна, получен-



**Рис. 3.** Ментограмма – графическое представление ментального кода (в данном случае кода **ро ро ро ро ро ро ро**). Если рисунок 2 иллюстрирует «слова», то в данном примере ментальное движение начинается с «полуслова»; суть этого явления будет пояснена ниже. Цифрами 1÷8 помечены номера, присвоенные состояниям настроения

ная в результате усреднения по I и II неделям. На третьей неделе (III) правильное волнообразное изменение настроения заметно нарушилось. Отчасти это стало следствием оскудения тестов в результате воздействия использованного психоактивного вещества: в начале III недели в соответствующем медицинском учреждении волонтеру был сделан плановый укол галоперидола деканоата. На четвертой (IV) и пятой (V) неделях восстановилась правильная волнообразная форма кривой настроения. К этой части рисунка тоже добавлена волна, полученная в результате усреднения по IV и V неделям.

```
import nltk
from nltk.sentiment.vader import SentimentIntensityAnalyzer
```



**Рис. 4.** Накопленные волны настроения (в данном случае волны значений оценок эмоциональной тональности) за I и II недели 5-недельного цикла, за III неделю (в начале которой был сделан укол), а также за IV и V недели цикла. Это волны, пролегающие вдоль восьмёрки соседними точками составляет 45 градусов. По вертикали представлена усреднённая численная оценка настроения, достигающая при предельно плохих ассоциациях значения  $-1$ , а при предельно хороших значения  $+1$

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

Таблица 2

Пятинедельный фрагмент множества тестирований, выполненных волонтером в свободное время по вечерам ежедневно с 18 декабря 2010 года по 28 апреля 2011 года. Жирным шрифтом выделены коды завершенных 8-строчных участков ментального процесса (см. рисунок 2). Именно они были востребованы ниже для построения рисунков 4 и 5

Дата опыта	Код ментограммы
08.01.2010	<b>pipo</b> pipo--
09.01.2010	--pipo <b>pino</b> +++
10.01.2010	<b>nipo</b> ++ <b>pipo</b> +
11.01.2010	--pino <b>pino</b> pi
12.01.2010	<b>nipo</b> <b>pino</b>
13.01.2010	<b>pino</b>
14.01.2010	<b>nipo</b> -pino
15.01.2010	<b>pino</b> pipo--
16.01.2010	+++ <b>nino</b> <b>pipo</b> <b>nipo</b>
17.01.2010	nipo- -pino-- --nipo-
18.01.2010	-po ni+
19.01.2010	+ <b>pipo</b> <b>nino</b>
20.01.2010	+++ <b>pino</b> +++++
21.01.2010	+po <b>pipo</b> pi++
22.01.2011	<b>pipo</b> nino--
23.01.2011	<b>pipo</b> <b>pipo</b>
24.01.2011	<b>pipo</b> pi
25.01.2011	po <b>pino</b> nino--
26.01.2011	+nino--
27.01.2011	не интерпретируемо
28.01.2011	не интерпретируемо
29.01.2011	<b>pino</b> +
30.01.2011	+ <b>nipo</b> <b>nino</b>
31.01.2011	-nipo <b>pino</b> ni+
01.02.2011	<b>nipo</b> nino-
02.02.2011	-nipo <b>pino</b> <b>nipo</b>
03.02.2011	po <b>nipo</b> <b>pino</b> ++
04.02.2011	++ <b>nino</b> +++
05.02.2011	-pino nipo-
06.02.2011	-pino nipo-
07.02.2011	<b>nipo</b> pino-
08.02.2011	-no <b>nino</b> ni
09.02.2011	++++ <b>pipo</b> ++++
10.02.2011	+ <b>nipo</b> <b>nipo</b>
11.02.2011	<b>nino</b> <b>pipo</b> +

```
# Инициализируем анализатор тональности
sid = SentimentIntensityAnalyzer()
```

```
# Список слов для анализа
words = ["Cars, Rabbit, Plastic, Teddy Bear, Toy Soldiers"]
```

```
# Проходимся по каждому слову, оцениваем его тональность и выводим результат
```

```
for word in words:
    ss = sid.polarity_scores(word)
    print(f»{word}: {ss}»)
```

Волны оценок эмоциональной тональности (рисунок 4) накоплены по тем 35 тестам, ментальные коды которых представлены в таблице 2. Вычисления выполнены на языке python посредством программы, использующей метод VADER. Так как база данных, на которую опирается метод VADER, создана на английском языке, возникшие в тестах серии русских слов и выражений сначала переводились на английский, и только потом вычислялись численные оценки тональности. Итогом вычисления было число, помеченное как «compound».

На рисунке 4 хорошо выражены ожидаемые экстремумы настроения в третьем и в шестом секторах ментограммы. Изменения в пятом-восьмом секторах, искажившие правильную форму волны на III неделе тестирования, можно попытаться отнести либо к оскудению статистики, либо к изменению состояния мышления волонтера; так или иначе, оно вызвано применением лекарства.

Поскольку после такой обработки результаты I и II недель тестирования сильно напоминают результаты IV и V недель тестирования, по этой четверке недель было выполнено дополнительное усреднение, и этот усреднённый результат был сопоставлен с итогом III недели тестирования, когда больной находился под действием недавно введенного лекарства. Из рисунка 5 можно заключить, что в секторе бодрствования (1) и в «тёплых» секторах (2÷4), т.е. в левой стороне ментограммы никакого воздействия препарата фактически не наблюдалось. Зато результаты правой половины ментограммы (её «холодных» секторов (5÷7) и сектора действия (8)) порожда-

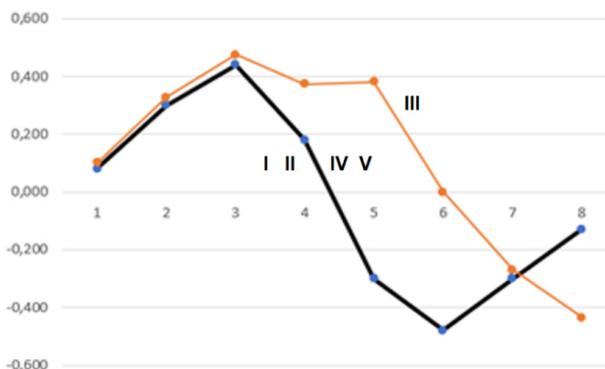


Рис. 5. Сравнение среднего результата тестирования по I, II, IV и V неделям, который можно считать контрольным, с результатом III недели, когда больной подвергался влиянию новой порции психоактивного препарата. Оси как на рисунке 4

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

**Таблица 3**

IIIa – недельный фрагмент тестирования, первый аналог III недели опыта

26.02.2011	no <b>piro</b> ++
27.02.2011	po <b>nino</b> piro--
28.02.2011	po pi-
01.03.2011	<b>piro</b> piro--
02.03.2011	+po piro--
03.03.2011	-nipo
04.03.2011	<b>piro</b>

**Таблица 4**

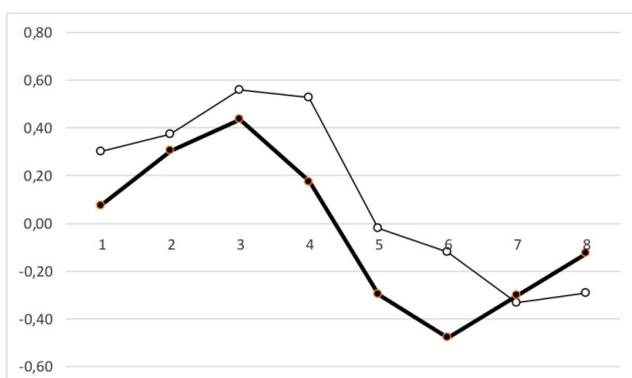
IIIb – недельный фрагмент тестирования, второй аналог III недели опыта

02.04.2011	<b>nipo</b> +++
03.04.2011	<b>piro</b>
04.04.2011	+ <b>nipo</b>
05.04.2011	no <b>pino</b> +
06.04.2011	+ <b>piro</b>
07.04.2011	+ <b>piro</b> +
08.04.2011	+ <b>nino</b> ++

ют надежду на выявление эффекта, хотя именно эти секторы оказались слабо обеспеченными статистически.

Поскольку введение волонтеру галоперидола деканоата является в данном случае процессом с 5-недельным периодом, то улучшить статистику картины III недели тестирования можно за счёт результатов последующих периодов этого многомесячного опыта, а именно за счёт двух имеющих в архиве более поздних полных аналогов III недели (см. таблицы 3 и 4).

При улучшении статистики за счёт добавления двух аналогов III недели видно, что в седьмом состоянии настроения сохранился исходный уровень негативных эмоций. В биофи-



**Рис. 6.** Картина модификации результата III недели после добавления результатов второго и третьего аналогов III недели (см. таблицы 3 и 4), когда волонтер точно так же подвергался влиянию очередных новых порций лекарства. Оси как на рисунках 4 и 5

зическом психоанализе это может означать возникновение самоосознания в подавленном состоянии, практически депрессию, а также, возможно, специфическую активизацию слуха. Этот необычный слуховой образ может пониматься больным как «голос в голове». По медицинским рекомендациям применение очередных порций галоперидола деканоата выполняется через 2-4 недели, но волонтер регулярно затягивал этот интервал до 5 недель. Возможно, поэтому вместо ожидаемого минимума в шестом секторе ментограммы, после улучшения статистики минимум попал в седьмой сектор. Новая кривая на рисунке 6 приняла в результате накопления тоже волнообразную форму и стала походить на волну, построенную по I, II, IV и V неделям.

В другие четыре недели рассмотренного 5-недельного периода (см. рисунок 5) нет наблюдаемого на рисунке 6 экстремума негативных эмоций в седьмом ментальном состоянии, и встаёт вопрос, каким образом смогли сохраниться «голоса в голове» волонтера в период I, II, IV и V недель, а также в соответствующие им недели других 5-недельных периодов болезни (см. таблицу 5).

Конечно же, момент написания отчета не совпадает с моментом тестирования, поэтому связь «голосов», косвенно проявляющихся в ежедневных тестах, и «голосов», упоминаемых в ежедневных дневниковых записях волонтера, является лишь следом положительной корреляции этих ментальных процессов в околосуточном масштабе времени.

Вторая, третья и четвертая колонки в таблице 5 содержат количество упоминаний в дневнике о «голосах» в течение трёх 5-недельных периодов наблюдения. Из таблицы 5 видно, что суммы за неделю количества упоминаний в дневнике о «голосах в голове» имеют хорошо выраженный максимум в середине 5-недельного периода (т.е. в III неделю (в «неделю укола») и в аналогах этой недели в двух следующих 5-недельных периодах); речь теперь идёт о накопленных значениях 6, 9, 15, 14 и 9 упоминаний «голосов» в дневнике только в те дни, когда тесты стартовали в окрестности нижней точки ментального круга. Пиковое значение 15 (в «неделю укола») больше соседних значений (11 и 14), а те, в свою очередь, больше значений из середины интервала между уколами (6 и 9).

Возникает интересная перспектива: если примерно половину или даже 2/3 пикового значения «15» попытаться отнести на счёт влияния особенной ситуации на III неделе (рис. 6), то значения 15 и 14 становятся нормой, а тогда уже потребует объяснения наблюдаемый минимум

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

Таблица 5

Количество употреблений слов «голос», «голоса» и пр. в ежедневных утренних и вечерних отчётах волонтера о своём самочувствии за три 5-недельных периода тестирований. Введение препарата волонтеру его лечащим врачом в специализированном медицинском стационаре производилось в первый день третьей недели (в 15-е сутки рассматриваемых 5-недельных периодов). Жирным шрифтом в колонках 2÷4 выделены те особенные дни, когда тесты стартовали из окрестности нижней точки ментограммы, т.е. из социального Я

Номер суток в 3 периодах	1-й период	2-й период	3-й период	Отбор аномалий	Сумма аномалий	Всего, штук
1	2	9	1		6	2
2	4	4	1			
3	0	2	2			
4	1	2	4	4		
5	0	2	0			
6	2	1	2	2		
7	3	0	2			
8	1	3	4	3	9	4
9	2	5	2			
10	7	2	6			
11	2	4	0	2		
12	0	2	3	3		
13	1	2	1			
14	2	1	1	3		
15	3	3	1	3	15	7
16	6	4	4	4		
17	2	2	3	2		
18	1	1	3	4		
19	1	2	2	2		
20	3	2	4	3		
21	4	2	0	4		
22	5	1	0		14	4
23	4	4	3	7		
24	2	1	4			
25	5	0	2			
26	1	2	0	2		
27	1	0	2	1		
28	3	1	3	4		
29	1	0	3		9	4
30	2	1	4	1		
31	11	4	4			
32	6	2	1	6		
33	2	0	3			
34	3	1	1	1		
35	1	0	1	1		

упоминаний о «голосах» в середине временного интервала между уколами, т.е. значения **6** и **9**. Значения **14** и **9**, т.е. значения в IV и V недели (значения после укола) превышают соответствующие значения в I и II недели (значения до укола) **6** и **9**, и могут интерпретироваться как хотя и относительно слабо обоснованный, но всё же довод в пользу всё ещё продолжающегося следового эффекта от введения лекарства. Слегка повышенное значение **9** в неделю непосредственно *перед* уколom может оказаться следстви-

ем нарушения медицинской рекомендации применения галоперидола деканоата с периодом 14÷28 дней, а вовсе не 35 дней. Таким образом, если повышенное значение **9** во II неделе можно попытаться списать на это обстоятельство или посчитать случайностью, то в итоге получится, что в центре интервала *между* уколами частота упоминаний волонтером «голосов в голове» снижалась реально от **15** до **6**, т.е. в 2,5 раза. Больной «почти выздоравливал» между уколами – настолько положительным оказывался результат

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

лечения через две недели.

Можно дополнительно отметить, что эмоциональный минимум на *рисунке 6*, наводящий на мысль о «голосах», выявлен в итогах III недели и в их аналогах после усреднения по полноценным фрагментам ментального кода, совершенная форма которых была проиллюстрирована на *рисунке 2*. В то же время *таблица 5*, дающая информацию о «голосах», построена уже по дневникам волонтера; а также она дополнительно привлекает данные о неполноценных ментальных кодах – кодах тех тестирований, которые стартуют в окрестности нижней точки окружности ментального круга как в примере *таблицы 1*.

Отсюда мысль, что в этих двух разных случаях под «голосами» в его голове волонтер мог путать объекты разного происхождения: по всей видимости, первые порождаются системой, обслуживающей работу слухового рецептора в депрессивном режиме самоосознания, а вторые при уже нормально работающем слухе не слышны и являются лишь слуховыми образами, запомнившимися во время режима работы слуха в депрессии и извлекаемыми из памяти для попыток автоматического осмысления когда-то непонятой информации.

Психоаналитическое основание выделения больным именно «голосов» среди множества других слуховых образов может состоять в следующем: в момент запечатления системой слуха образа «голоса в голове» самоосознание у депрессивного человека уже смещено из нормального кинестетического Я (из верхней точки окружности ментального круга) в депрессивное Я (в «самую правую» точку окружности ментального круга), и связано именно с системой слуха. На ментограмме это выглядит как перемещение момента «бодрствующего» самоосознания из окрестности эмоционально нейтрального стыка состояния 1 с состоянием 8 в окрестность стыка состояния 7 с состоянием 6, характеризующуюся сильными негативными переживаниями. Именно об этом смещении самоосознания (т.е. Я) в слуховую зону могут свидетельствовать такие сообщения больных шизофренией, как «по телевизору говорили со мной», «голоса ругали меня и мою семью» и т.п. Отсюда предложение: если в нужный момент дать больному подходящий антидепрессант, т.е. хотя бы временно избавить его от депрессии, то приток новых «голосов» прекратится, а старые голоса будут естественным образом продолжать постепенно забываться и со временем совсем исчезнут, так как окончательно забудутся. Для полного излечения от «голосов в голове» волонтеру можно было посоветовать приём антидепрессантов, причем именно на III

неделе и во время её аналогов в других 5-недельных циклах.

В *таблице 5* выделены жирным шрифтом данные об интенсивности проявления «голосов» в те дни, когда тесты стартовали в узкой окрестности социального Я, т.е. нижней точки ментограммы. Пример теста с таким аномальным кодом приведен в *таблице 1* и изображен на *рисунке 3*. Именно такой аномальный старт теста может считаться «инструментально определённым» признаком наличия «голосов в голове». Здесь надо отметить, что в данном случае речь идёт уже о «голосах» второй природы. Теперь это уже не фантомные порождения акцентуированной слуховой системы депрессивного человека, а совершенно безнадёжные попытки взаимодействия социального Я с принципиально безответными пустыми порождениями бывшего депрессивного Я.

*Таблица 5* позволяет также выполнить грубую оценку количества тестов, нужных для уверенного выявления наличия «голосов в голове». В последней колонке этой таблицы приведены значения, позволяющие оценить вероятность появления теста, характерного для этого случая. Там показано, что из всех 105 тестов Таблицы 5 «голосам в голове» отвечает 21 тест. Вероятность того, что тест окажется аномальным, можно оценить как  $21/105$ , т.е. 0.2. Вероятность же того, что тест окажется нормальным равна 0.8. Вероятность того, что окажутся нормальными  $N$  независимых тестов волонтера равна  $(0,8)^N$ . При росте номера  $N$  это, соответственно, 0,8, 0,64 и т.д. Легко посчитать, что, если в первых 10 тестах не обнаружится ни одного аномального, вероятность отсутствия «голосов в голове» в дальнейших тестах достигнет 0,9; а когда  $N$  станет уже больше 20, то вероятность отсутствия «голосов в голове» в дальнейших тестах превысит 0,99.

### Обсуждение результатов

Из приведенных примеров следует важный прикладной момент: можно сказать, что в биофизическом психоанализе не только введен новый способ описания мышления, но и опробован новый способ (практически, предложен экспериментально) исследования воздействия на мышление человека фармакологических веществ из соответствующего медицинского арсенала.

Или сам галоперидол деканоат или процедура его применения, или даже они вместе имеют очевидный недостаток: на первой неделе после введения этого физиологически активного вещества происходит не уменьшение проявлений «голосов», а, наоборот, учащение, то есть словно невольное запускается вовсе не обязательный

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

(его можно назвать паразитным) параллельный процесс активации «голосов». Поскольку в биофизическом психоанализе эмпирически установлена связь нижней точки окружности ментального круга с социальным самоосознанием, то соответствие мышления волонтера нижней точке ментограммы в момент старта тестирования может означать, что непосредственно перед тестированием волонтер уже «якобы социально» общался, т.е. у него были фиктивные голоса в голове. Иными словами, если тестирование начинается в момент «якобы социального» общения, то точка старта теста оказывается в окрестности нижней точки ментального круга, и запись теста начинается «с полуслова» подобно записи теста, представленной выше в *таблице 1*.

Наше исследование частного случая физиологически активного вещества – синтетического (т.е. дешевого) психоактивного препарата галоперидола деканоата – подтвердило его эффективность как лекарства, на больших масштабах времени стабилизирующего процесс мышления. Об этом свидетельствует (см. *рисунок 5*) высоко-симметричная, можно сказать, здоровая форма модуляции настроения, накопленная по I, II, IV и V неделям мышления на фоне непрерывного поступления в кровь чистого галоперидола, выделяющегося при гидролизе галоперидола деканоата из его масляного раствора. Специфическое искажение формы кривой модуляции настроения, накопленной по совокупным результатам III недели («недели укола») и её аналогов (*рис. 6*) говорит о том, что это лекарство действует в 1÷6 состояниях настроения ещё и как почти универсальный антидепрессант, но в седьмом и восьмом состояниях настроения, лежащих именно на пути смещения самоосознания из состояния здоровья в состояние депрессии, это лекарство не действует как антидепрессант. Поскольку именно депрессия (т.е. перемещение самоосознания в слуховую зону) может приводить к слуховым аномалиям, вскоре после очередного введения галоперидола деканоата «заселяющим» мышление депрессивного больного новой порцией «голосов в голове», лечение галоперидолом деканоатом снимает вопрос для 1-го ÷ 6-го состояний настроения, а для 7-го и 8-го состояний настроения придется использовать специальные антидепрессанты: «антидепрессанты для 7-го и 8-го состояний настроения». Это потребует либо специальной разработки антидепрессантов такого типа, либо выявления их из спектра уже существующих лекарств.

Как должно быть ясно из этой статьи, для выполнения дальнейших исследований в этой перспективной области нужны новые добровольцы,

способные подобно нашему волонтеру дисциплинированно выполнять ежедневное однократное тестирование в течение ряда месяцев.

### Выводы

1. В биофизическом психоанализе открывается широкая перспектива фармакологических исследований. В частности, предложен основанный на биофизическом психоанализе экспресс-метод изучения влияний на мышление физиологически активных препаратов из арсенала современной медицины.

2. Предложен тест на выявление у больного «инструментально определённого» признака наличия «голосов в голове», то есть признака, не зависящего от второстепенных факторов. Для этого испытуемому нужно выполнить достаточно длинную серию тестов и выявить ментальные коды. Если в первом десятке кодов этих тестов обнаружится код, стартующий в окрестности социального Я, то этот испытуемый может иметь «голоса в голове».

3. Предложена «дуальная трактовка» природы феномена «голосов в голове». В её основе лежит представление, что человеку как представителю мира животных биологической эволюцией поставлена задача пребывать преимущественно в биологическом Я, то есть преимущественно отслеживать изменения в физической реальности, и по мере возможности реагировать на них. Для решения же задач социального аспекта, иногда особенно сложного и не очень естественного, т.е. трудного, не имеющего очевидных аналогов в природе, человек использует свои дополнительные «лобно-дольные» способности социального самоосознания/взаимодействия. Как показано на *рисунке 2*, в процессе мышления взрослый человек регулярно попадает в социальное Я. Активизация социального Я расширяет возможности социального общения, но она также создаёт возможность трудно контролируемого «якобы социального», т.е. фиктивного общения. Это объясняет причину некой успешности «лечения физическим трудом», т.е. в ущерб социальному Я насильственной активизации биологического Я человека, его кинестетического самоосознания. Однако, существует пока всё ещё недостаточно разрекламированный альтернативный лёгкий способ получения того же самого эффекта: в биофизическом психоанализе удобной альтернативой «лечению физическим трудом» является выполнение цепного вербального теста. Уже многократно проверено, что выполнение теста приводит к желательному финишированию ментальной траектории в биологическом Я (см. *рисунок 3*). В основе этого явления лежит

родственность природы феноменов мышления, цепного вербального тестирования и обычного сновидения, судя по всему, опирающаяся на наличие двух взаимосвязанных систем внимания – т.н. дорзальной и вентральной. Впрочем, у нашего волонтера «голоса» не уменьшили свою активность, несмотря на ежевечернее тестирование в течение ряда месяцев. Таким образом, здесь нужны дополнительные исследования. Возможно, избавлению волонтера от «голосов» помешало то, что в депрессивной средней неделе каждого 5-недельного периода между уколами его память регулярно «заселялась» новыми «голосами», и во избежание этого надо было в это особенное время принимать специальные антидепрессанты.

4. Предложено разделение «голосов в голове» на две категории по их происхождению. Первые являются пустыми порождениями сбоев в акцентуированной слуховой системе, и они могли возникать у каждого человека, кто либо без видимых причин, либо ятрогенно (под влиянием лекарств) впадал в депрессию. Вторые «голоса» возникают в ходе принципиально безнадежных попыток человеческого общения с этой пустотой; именно придание «голосам» самостоятельного статуса – это переход за грань безумия. Гомологом «голоса» является обычная тень: она тоже существует объективно, и она так же не самостоятельна. Если человек общается с тенью, не безумен ли он?

5. Вопрос об усовершенствовании метода лечения шизофрении галоперидолом деканоатом поднимает вопрос о желательности дополнительного использования неких «антидепрессантов для 7-го и 8-го состояний настроения» (см. рисунок 6). До создания биофизического психоанализа «антидепрессанты для 7-го и 8-го состояний настроения» были немислимы: тогда речь шла лишь о хорошем и плохом настроении, то есть, шкала настроений была слишком грубой, примитивной. Для попыток достижения радикального прогресса в лечении шизофрении (и, возможно, депрессий) теперь может потребоваться либо специальная разработка (возможно, химический синтез) антидепрессантов именно такого особого типа, либо, что легче, выявление этих антидепрессантов из спектра уже существующих лекарств. Со сканирования (по изложенному в этой статье образцу) спектра существующих антидепрессантов, по-видимому, можно будет начать финальный этап этого исследования.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Соблюдение этических стандартов

Настоящая работа не содержит описания каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов. Работа основывается на использовании бесконтактного тестирования процесса мышления людей. Все соответствующие материалы были предложены этими людьми, во-первых, добровольно и, во-вторых, инкогнито, то есть их права не могут быть ни заявлены, ни доказаны. Этические стандарты таким образом соблюдены.

### Литература

1. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В. Психоанализ как биофизический метод // Известия Института инженерной физики, 2023. №4(70). С.2-5.
2. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет В.В. Представление структуры естественного интеллекта в биофизическом психоанализе // Известия Института инженерной физики, 2024. №1(71). С.13-17.
3. M. Corbetta, G. L. Shulman. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain // Nature Reviews Neuroscience, 2002. V.3. Pp.201-215.
4. S. Vossel, J.J. Geng, G.R. Fink. Dorsal and ventral attention systems: distinct neural circuits but collaborative roles // The Neuroscientist, 2014. V.20. Issue 2. Pp.150-159. <https://doi.org/10.1177/1073858413494269>.
5. Коломбет В.А., Панчелюга В.А., Лесных В.Н. Самовоспроизводящиеся автоматы во вселенной: жизнь, универсальная система утраивающихся периодов, фундаментальные взаимодействия // Известия Института инженерной физики, 2022. №2(64). С.2-4.
6. Фрейд З. Введение в психоанализ. Лекции. М.: Наука, 1995. 384 с.
7. Коломбет В.В. Сайт golosaVgolove.ru в сети Интернет.
8. Коломбет В.А. Ментальные миры // Сознание и физическая реальность, 1997. Т. 2. №4. С. 15-24.
9. Коломбет В.А. Трансфизические миры. В кн.: В.А. Коломбет. Трансфизические миры. Происхождение имен. М.: КРОН-ПРЕСС, 2001. С. 8-525.
10. Коломбет В.А. «Синдром Стендаля» в свете гипнографии // Прикладная психология и психоанализ, 2003. №2. С. 11-27.
11. Коломбет В.А. ВММ – вычислительная машина мозга // Вестник Калужского университета, 2006. №2. С. 21-29.
12. Коломбет В.А. Введение в гипнографический психоанализ. М.: ООО Мэйлер, 2008. 240 с.
13. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В., Тараненко А.М.. Базовый ментальный сценарий и его использование при оценке качества работы операторов сложных систем / XLI Всероссийская НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». Филиал ВА РВСН (г. Серпухов), 2022. С. 63-67.

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

УДК 004.056

### НАНОПОРОВОЕ СЕКВЕНИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ. КАК МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПОЛУЧАЕТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НУКЛЕОТИДОВ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ БЕЛКОВЫХ НАНОПОР

### NANOPORE SEQUENCING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE. HOW MACHINE LEARNING OBTAINS NUCLEOTIDE SEQUENCES FROM THE ELECTRIC CURRENTS OF PROTEIN NANOPORES

**Артем Михайлович Ермаков**

кандидат биологических наук  
начальник отдела генетической инженерии и геномных исследований  
ООО «Нанопорус»  
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино,  
ул. Институтская, д. 3  
Тел. +7 (4967) 73-94-28  
E-mail: beoluchi@yandex.ru

**Ольга Николаевна Ермакова**

кандидат биологических наук  
ведущий специалист отдела генетической инженерии и геномных исследований  
ООО «Нанопорус»  
Тел. +7 (4967) 73-94-28  
E-mail: ao\_ermakovy@rambler.ru

**Денис Сергеевич Руднев**

специалист отдела генетической инженерии и геномных исследований  
ООО «Нанопорус»  
Тел.: +7 (985) 090-07-52  
E-mail: denissrudnef@gmail.com

#### Аннотация

В работе описывается процесс преобразования электрических токов белковых нанопор в последовательность нуклеотидов с дальнейшей перспективой применения искусственного интеллекта для точности получаемых данных.

**Ключевые слова:** нанопоровое секвенирование, искусственный интеллект, машинное обучение, белковые нанопоры.

#### Summary

The paper describes the process of converting electric currents of protein nanopores into a sequence of nucleotides with the further prospect of using artificial intelligence for the accuracy of the data obtained.

**Keywords:** nanopore sequencing, artificial intelligence, machine learning, protein nanopores.

Секвенирование ДНК и РНК является очень важным аналитическим инструментом в медицинских и биологических исследованиях, а в ближайшем будущем – в медицинской диагностике, эпидемиологии, криминалистике и во многих других областях, где требуется быстрая расшифровка последовательностей нуклеиновых кислот. С тех пор как в 1977 году был предложен первый метод идентификации нуклеотидов в цепях ДНК с помощью нанопор был достигнут значительный прогресс в развитии данной технологии секвенирования [1]. Развитие микроэлектроники и биоинженерии привело к созданию все более совершенных поколений

нанопоровых секвенаторов, с помощью которых возможно получить большое количество данных быстрого масс-параллельного, экономически выгодного секвенирования с большой точностью получаемых данных [2].

Значительные улучшения качества и точности получаемых данных о последовательности нуклеиновых кислот достигнуты не только за счет улучшения электроники, типов белковых нанопор и сопутствующих ферментов, но и в значительной степени в этом сыграло роль развитие алгоритмов распознавания электрического сигнала, получаемого с пор, с помощью искусственного интеллекта [3]. Одним из самых популяр-

лярных поставщиков устройств, основанных на технологии нанопорового секвенирования, является Oxford Nanopore Technologies (ONT) [4]. В настоящее время в России уже представлен отечественный аналог подобных устройств – Нанопоровый секвенатор «Нанопорус» (производства ООО «Нанопорус») [5].

Нанопоровое секвенирование основано на измерении ионного тока в белковой нанопоре при протягивании через нее цепочки ДНК или РНК. Затем значения токов преобразуются в последовательность нуклеотидов, и этот процесс называют бейзколином [6]. Стоит отметить одну важную деталь – принцип нанопорового секвенирования и последующий бейзколининг сигналов электрического тока позволяет определять не только стандартные нуклеотиды, но и их модификации (например, метилированный аденозин, оксогуанин и т.д.) [7]. Сам процесс бейзколининга можно математически представить в виде функции, описанной в уравнении (1), и представляет собой задачу обработки от последовательности к последовательности.

$$F(X)=Y \quad (1)$$

где  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x_i \in \mathbb{R} \geq 0$   
 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_m\}, y_j \in \{A, C, G, T\}$   
 $m < n$  (typically  $n \approx 8m$ )

Бейзколининг – важный этап, в основном отвечающий за получаемые данные от секвенатора и читаемые им последовательности нуклеотидов. Программы, которые идентифицируют нуклеотиды и их последовательность по результатам измерений ионного тока, называются бейзколерами.

В зависимости от структуры биологической поры измерения ионного тока в ней соответствуют току от цепочки нуклеотидов преимущественно от пяти (РНК) или шести (ДНК) оснований-нуклеотидов, и этот участок называется k-мером. Сам сигнал электрического тока сильно зашумлен, что затрудняет определение ассоциативных k-мер, основанных исключительно на данных сигнала, поскольку многие из k-меры порой имеют сходные диапазоны значений сигнала ионного тока. Это явление проявляется, когда в поре находится последовательность в виде гомополимера – повторяющихся подряд одних и тех же нуклеотидах.

Бейзколера раннего поколения использовали подверженный ошибкам и требующего много времени процесс сегментации. Этот процесс обеспечивает деление исходной серии данных на соответствующие k-мерным сегментам и преобразует эти сегменты сигнала в k-меры [8]. Точность определения последовательности нуклеотидов у таких алгоритмов была не более

85%. Эти бейзколера, например первый облачный сервис Metrichor от Oxford Nanopore и программное обеспечение с открытым исходным кодом Nanocall [9] (автономная альтернатива Metrichor), использовали для декодирования данных электрических сигналов скрытую марковскую модель (НММ). Предполагая, что нуклеиновая кислота перемещается через пору по одному нуклеотиду за раз, эти бейзколера обрабатывали сигналы ионного тока как цепочку наблюдаемых событий, в то время как k-меры здесь рассматривались как состояние внутри НММ. Поскольку первые нуклеотиды каждого состояния перекрываются с последними нуклеотидами предыдущего состояния, то они могут быть вычислены как совместные вероятности последовательности нуклеотидов. Путь с максимальной суммарной совместной вероятностью представляет собой конечную предсказанную последовательность [10].

Поскольку бейзколера на основе НММ предсказывали последовательности на основе краткосрочных зависимостей одного k-мера от последующего, то при нанопоровом секвенировании они могут не учитывать долгосрочные зависимости. Кроме того, использование модели нуклеотидной последовательности, которая не точно описывает ожидаемые текущие значения k-мер, конечно же приводит к ошибкам во время бейзколининга [11]. Эти ограничения пытались преодолеть с помощью новых алгоритмов с использованием структуры на основе рекуррентной нейронной сети (RNN). У Oxford Nanopore были разработаны программы использующие RNN – Albacore и nanonet, а также сторонними разработчиками было представлено программное обеспечение с открытым исходным кодом DeepNano и BasecRAWler [12]. Последняя программа применяла однонаправленную RNN, которая использует информацию из входного вектора ионного тока и предыдущего скрытого состояния для вычисления текущего скрытого состояния и связанного с ним распределения вероятностей нуклеотидов. Albacore, nanonet и DeepNano использовали двунаправленную RNN, которая позволяла включать информацию о предыдущих и будущих состояниях входного вектора ионного тока для повышения точности прогнозирования [11].

Как было сказано выше, этап сегментации во время бейзколининга требует много времени и вычислительных ресурсов. Для решения этой проблемы были разработаны бейзколера без сегментации, такие как Albacore версии 2.0.1 (Oxford Nanopore) и программное обеспечение с открытым исходным кодом Chiron [8]. Чтобы

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

исключить этап сегментации, Chiron объединяет сверточную нейросеть (CNN) для выделения признаков сигнала и RNN для прогнозирования вероятности появления нуклеотидов. Затем он использует декодер временной классификации соединений (СТС) для выбора нуклеотида с наибольшей вероятностью в каждой позиции и выполняет сопоставление «многие к одному» для завершения полной последовательности [8]. Несмотря на то, что подход Chiron, основанный на отсутствии сегментации, превосходил методы бейзколинга, основанные на сегментации, зависимость платформы RNN от результатов предыдущих периодов времени приводило к увеличению времени выполнения задач бейзколинга. Для решения этой проблемы были попытки применения смешанных алгоритмов бейзколинга. Например, программа Causalcall позволяла выполнять параллельную обработку, вводя сегментированные измерения ионного тока в виде матрицы во временную сверточную сеть, а также моделировала сигнал ионного тока и вычисляла вероятность появления нуклеотидной основы в каждый момент времени. Она использовала также и декодер СТС для вывода базовой последовательности с наибольшей вероятностью для каждого входного сигнала фиксированного размера и перекрывает базовые последовательности для получения полной последовательности [16]. Развитие этого подхода в виде комбинации декодера CNN и СТС реализовалось в виде исследовательского бейзколера от ONT – Bonito. Применение такого подхода в данной программе позволило достичь беспрецедентно высокой точности бейзколинга – 99%, что сделало точность нанопорового секвенирования сопоставимой с точностью секвенирования NGS, до этого времени считающегося эталоном.

Используемые до настоящего времени подходы и алгоритмы бейзколинга показали, что они могут отлично работать в средах, где исторические точки данных существенно влияют на будущие прогнозы. Однако они обрабатывают данные последовательно, что может ограничить скорость обучения и вывода. При этом они должны сжимать временную информацию в вектор состояния фиксированного размера, что может ограничить масштабируемость. Эти факторы могут стать критическим при стремлении достичь наивысшей точности бейзколинга в среде вывода с ограниченными вычислительными возможностями. Поэтому в настоящее время исследователи совершили переход к бейзколерам на основе моделей-трансформеров, которые за счет архитектуры обеспечивают параллельную обработку всех точек данных в последовательности и

прямую связь между любыми двумя из них с помощью механизма, известного как attention [17].

Модели-трансформеры способствовали прогрессу во многих областях, включая языковое моделирование, например, с помощью GPT от OpenAI и семейства моделей Llama от Meta, а также моделирование структуры белка и языка белков с помощью AlphaFold от Google DeepMind и моделей эволюционного масштабного моделирования (ESM) от Meta.

Модель бейзколера-трансформера представляет собой глубокую нейронную сеть, которая может быть разделена на три группы уровней, служащих различным целям:

1) Предварительная обработка: Значение исходного сигнала в любой момент времени приблизительно определяется относительно коротким участком нуклеотидной последовательности, находящимся в данный момент в нанопоре. Значение сигнала изменяется по мере перемещения ДНК или РНК через пору, и часто наблюдаются отчетливые скачки между различными значениями сигнала. Исходный сигнал подвергается начальной обработке с помощью небольшого набора одномерных сверточных слоев. Эти слои преобразуют скалярный сигнал в более короткую последовательность векторов признаков, содержащих локальную информацию, подготавливая входные данные для более сложных операций.

2) Трансформер: Набор блоков преобразовательного кодера обрабатывает выходные данные с уровней предварительной обработки, содержащих локальную информацию, в форму, пригодную для декодирования. Блоки кодера обмениваются информацией с соседними позициями, используя механизм самоанализа, и независимо друг от друга преобразуют вектор признаков с высокой степенью размерности в каждой позиции, используя компонент прямой связи. Блоки энкодера используют встроенные функции изменения положения (RoPE), post-RMSNorm, SwiGLU и масштабирование остаточных ветвей DeepNet.

3) Декодирование: Выходной сигнал трансформера в каждой позиции проецируется на вектор, содержащий оценку перехода между состояниями. Состояния здесь соответствуют k-мерам – группам из k нуклеотидных оснований, а оценки являются частью выходной таблицы условного случайного поля временной классификации (СТС-CRF). Часть СТС позволяет выводить последовательность k-меров короче, чем входная последовательность, а часть CRF обеспечивает зависимость между оценками в каждой позиции. Выходная часть обучена

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

максимизировать вероятность того, что целевая последовательность к-меров не выровнена, учитывая фрагмент сигнала. Во время вывода используется лучевой поиск, чтобы найти хорошее приближение к наиболее вероятной последовательности к-меров, и затем она преобразуется в последовательность нуклеотидов.

Последние модели, основанные на архитектуре типа трансформер, разработанные Oxford Nanopore, позволили еще более увеличить точность байсколинга и приблизить ее 99,9% [18].

### Заключение

Развитие технологий машинного обучения применительно к такому сложному и требовательному процессу как нанопоровое секвенирование позволило в относительно короткие сроки сделать эту технологию самой передовой и востребованной в мире. Причем это произошло без существенных изменений в плане электроники, использования новых типов нанопор и сопутствующих ферментов. Таким образом дальнейший прогресс развития моделей искусственного интеллекта в нанопоровом секвенировании позволит приблизиться к максимальной точности определения последовательности нуклеотидов и совершит революцию в генетических исследованиях.

### Литература

1. Sanger F., Nicklen S., Coulson A.R. DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1977, 74, 5463-5467.
2. Lee H., Gurtowski J., Yoo S., Nattestad M., Marcus S., Goodwin S., McCombie W.R., Schatz M.C. Third-generation sequencing and the future of genomics. *BioRxiv* 2016, 048603.
3. Rang F.J., Kloosterman W.P., de Ridder J. From squiggle to basepair: Computational approaches for improving nanopore sequencing read accuracy. *Genome Biol.* 2018, 19, 90.
4. Weirather J.L.; de Cesare M., Wang Y., Piazza P., Sebastiano V., Wang X.J., Buck D., Au K.F. Comprehensive comparison of Pacific Biosciences and Oxford Nanopore Technologies and their applications to transcriptome analysis. *F1000Research* 2017, 6, 100.
5. <https://www.skygen.com/novosti/novosti-kompanii-skygen/nanoporovyy-sekvenator-nanoporus/>
6. Ермаков А.М. Нанопоровое секвенирование ДНК и РНК – передовая технология определения нуклеотидных последовательностей / А.М. Ермаков, Д.С. Руднев, Е.А. Царькова // Известия Института инженерной физики, 2023. №1(67). С.92-96.
7. Novoa E.M., Mason C.E., Mattick J.S. Charting the unknown epitranscriptome. *Nature Reviews Molecular Cell Biology.* 2017 Jun;18(6):339-40.
8. Teng H., Cao M.D., Hall M.B., Duarte T., Wang S., Coin L.J. Chiron: translating nanopore raw signal directly into nucleotide sequence using deep learning. *GigaScience.* 2018 May;7(5):giy037.
9. David M., Dursi L.J., Yao D., Boutros P.C., Simpson J.T. Nanocall: an open source basecaller for Oxford Nanopore sequencing data. *Bioinformatics.* 2017 Jan 1;33(1):49-55.
10. Timp W., Comer J., Aksimentiev A. DNA basecalling from a nanopore using a Viterbi algorithm. *Biophysical journal.* 2012 May 16;102(10):L37-9.
11. Boža V., Brejová B., Vinař T. DeepNano: deep recurrent neural networks for base calling in MinION nanopore reads. *PloS one.* 2017 Jun 5;12(6):e0178751.
12. Stoiber M., Brown J. BasecRAWller: Streaming nanopore basecalling directly from raw signal. *BioRxiv.* 2017 May 1:133058.
13. Zeng J., Cai H., Peng H., Wang H., Zhang Y., Akutsu T. Causalcall: Nanopore basecalling using a temporal convolutional network. *Frontiers in Genetics.* 2020 Jan 20;10:1332.
14. <https://arxiv.org/pdf/1706.03762>
15. <https://nanoporetech.com/platform/accuracy>

УДК 519.21

## ПОДХОД К АНАЛИЗУ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО- ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ НАУКОГРАДОВ AN APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE ACTIVITIES OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL

**Николай Михайлович Емелин**

заслуженный деятель науки и техники РФСР  
доктор технических наук, профессор  
главный научный сотрудник  
ФГБУ «Научно-технический институт  
межотраслевой информации» «НТИМИ»  
Адрес: 125252, Москва, ул. Зорге, д. 22, к. 1  
Тел.: +7 (499) 943-11-17



### Аннотация

В статье рассматривается методический подход к анализу деятельности научно-производственных комплексов наукоградов. Определена структура проведения анализа: результативность – эффективность – сбалансированность и приведены примеры использования предлагаемого методического подхода.

**Ключевые слова:** наукограды, научно-технологическое развитие, показатели, сбалансированность.

### Summary

The article considers a methodological approach to the analysis of the activities of scientific and industrial complexes of science towns. The structure of the analysis is defined: effectiveness – efficiency – balance and examples of the use of the proposed methodological approach are given.

**Keywords:** science cities, scientific and technological development, indicators, balance.

Продолжая обсуждать вопросы анализа деятельности научно-производственных комплексов (НПК) наукоградов [1], мы возвращаемся к необходимости не только выбора показателей, позволяющих проводить такой анализ, но и подхода к его проведению, который должен отражать как деятельность НПК, так и сбалансированность развития НПК и социально-экономического развития наукоградов.

Из множества показателей, используемых при оценке самих НПК [1-5] и сбалансированности научно-технологического, социально-экономического развития муниципальных образований и регионов [6-9], выберем такие, которые четко ориентированы на результаты деятельности НПК:

- общий объем произведенных НПК товаров (выполненных работ, оказанных услуг);
- общий объем произведенных наукоградом товаров (выполненных работ, оказанных услуг);
- среднесписочная численность работников НПК.

Абсолютные значения представленных показателей характеризуют деятельность НПК

каждого наукограда, но для понимания, за счёт чего же достигнуты эти результаты, а также для сравнительной оценки НПК наукоградов необходимо использовать относительные показатели, такие (по аналогии с оценкой деятельности государственных научных центров [10]), как:

- доля общего объема произведенных НПК товаров в общем объеме произведенных товаров наукоградом (её можно рассматривать как результативность деятельности НПК),
- общий объем произведенных НПК товаров, приходящийся на одного работника НПК (его можно рассматривать как удельную результативность деятельности НПК);
- отношение объема произведенных НПК товаров (выполненных работ, оказанных услуг) к объёму финансирования НПК (это отношение можно рассматривать как эффективность деятельности НПК);
- отношение объема произведенных НПК товаров (выполненных работ, оказанных услуг), приходящихся на одного работника НПК, к объёму финансирования НПК (это отношение можно рассматривать как удельная эффектив-

ность деятельности НПК).

Используя данные федерального статистического наблюдения, а также данные, приведенные в ежегодной справке о деятельности наукоградов [11], рассчитаем вышеприведенные показатели для шести, произвольно выбранных, наукоградов, построим соответствующие им рейтинги и проанализируем, какие выводы можно делать, применяя предлагаемый подход к анализу деятельности НПК наукоградов, при этом претендуя лишь на методический подход к анализу деятельности наукоградов (но ни в коей мере на оценивание наукоградов, для чего необходимо использовать не только единичные, но и комплексные (интегральные) показатели).

Можно предложить следующие направления проведения анализа деятельности наукоградов:

1. По результативности деятельности НПК наукоградов.

Как пример: показатели результативности (таблица 1) позволяют судить, в частности, о весе объема произведенных товаров НПК в общем объеме произведенных товаров в наукограде в целом, другими словами, значимости НПК. Например, несмотря на то, что общий объем произведенных товаров (выполненных работ, оказанных услуг) НПК Обнинска максимальный, по вкладу в общий объем произведенных наукоградом товаров (выполненных работ, оказанных услуг), занимает предпоследнее место. В то же время можно отметить достаточно высокий объем товаров, приходящийся на одного работника НПК Обнинска (удельная результативность). И наоборот: объем произведенных наукоградом Черногловка товаров – минимальный, а результативность (можно сказать, «вес» работника НПК) – высокая. Есть над чем подумать: а почему это так?

2. По эффективности деятельности НПК наукоградов.

Анализируя показатели эффективности (таблица 2), может возникнуть не меньше вопросов. К примеру, мы видим:

- рейтинг НПК наукограда по эффективности и рейтинг по удельной эффективности разнятся, что лишь подтверждает, что не всегда больший объем финансирования определяет как большую эффективность НПК, так и большую удельную эффективность;

- рейтинги НПК наукоградов по результативности и эффективности в большинстве своем не совпадают. Так, по удельной результативности у Черногловки низкий рейтинг, а по удельной эффективности – самый высокий.

3. По сбалансированности развития НПК наукоградов и их социально-экономического развития.

Известны различные подходы к использованию понятия «сбалансированности». Рассматривая уровень баланса (таблица 3) как близость к равенству рейтингов НПК наукограда и его социально-экономического развития (по выбранным показателям «Объем произведенных НПК товаров на одного работника НПК» и «Среднемесячная заработная плата работников НПК»), видно, что самым сбалансированным наукоградом является Мичуринск. Но при этом он имеет самые низкие рейтинги по выбранным показателям. Нужно ли стремиться к этому? Таким же вопросом можно задаться, анализируя работы [12,13].

Можно использовать пропорциональный подход к оценке сбалансированности развития наукоградов, в частности, определения золотой пропорции между рассматриваемыми показателями развития [14]. Задача может быть поставлена и как классическая задача условной оптимизации, где один из показателей (к примеру, показатель НПК) является целевой функцией, а ограничениями – другие показатели.

**Таблица 1**  
Показатели результативности деятельности НПК наукоградов

Показатель Наукоград	Среднесписочная численность работников НПК (чел.)	Общий объем произведенных НПК товаров (выполненных работ, оказанных услуг) (тыс.руб.)	Объем произведенных НПК товаров (выполненных работ, оказанных услуг) на одного работника НПК (тыс.руб./чел.)	Результативность НПК (%)	Рейтинг по результативности НПК	Рейтинг по удельной результативности НПК
Жуковский	11175	26336359	2479	37	6	4
Мичуринск	5619	10943572	2056	86	3	6
Обнинск	12374	75444089	6365	79	5	3
Реутов	4551	54611140	12485	82	4	1
Фрязино	12185	75154116	6758	98	1	2
Черногловка	3339	6662926	2106	96	2	5

**Таблица 2**  
Показатели эффективности деятельности НПК наукоградов

Показатель Наукоград	Финансирование НПК (мероприятий стратегии социально-экономического развития) (тыс.руб.)	Общий объем произведенных НПК товаров (выполненных работ, оказанных услуг) (тыс.руб.)	Эффективность НПК	Рейтинг НПК по эффективности	Удельная эффективность НПК (тыс.руб./чел.)	Рейтинг НПК по удельной эффективности
Жуковский	3884462	26336359	6.8	5	0.0006	6
Мичуринск	1174210	10943572	9.3	3	0.002	5
Обнинск	10437567	75444089	7.2	4	0.006	3
Реутов	1801320	54611140	30.3	2	0.007	2
Фрязино	1435419	75154116	52.3	1	0.004	4
Черноголовка	1437571	6662926	4.6	6	0.02	1

**Таблица 3**  
Показатели сбалансированности деятельности НПК наукоградов

Показатель Наукоград	Среднесписочная численность работников НПК (чел.)	Общий объем произведенных НПК товаров (выполненных работ, оказанных услуг) (тыс. руб.)	Объем произведенных НПК товаров (выполненных работ, оказанных услуг на одного работника НПК (тыс. руб./чел.)	Рейтинг по объему произведенных НПК товаров на одного работника НПК	Среднемесячная заработная плата работников НПК (руб.)	Рейтинг по среднемесячной заработной плате работников НПК	Сбалансированность	Рейтинг по сбалансированности
Жуковский	11175	26336359	2479	4	69991	3	1	2-3
Мичуринск	5619	10943572	2056	6	37188	6	0	1
Обнинск	12374	75444089	6365	3	55168	5	-2	4-5
Реутов	4551	54611140	12485	1	71797	2	-1	2-3
Фрязино	12185	75154116	6758	2	66824	4	-2	4-5
Черноголовка	3339	6662926	2106	5	79326	1	4	6

В заключение отметим, что это всего лишь подходы, но их использование позволит дать более глубокую оценку деятельности наукоградов России.

### Литература

1. Емелин Н.М. Мониторинг и совершенствование показателей деятельности наукоградов // Информатика и инновации, 2023. Т.18. №4. С.38-46.
2. Федеральный закон от 07.04.1999 №70-ФЗ «О статусе наукограда Российской Федерации».
3. Емелин Н.М., Артамонов Ю.Н. Многоуровневый синтез индикативных показателей мониторинга научно-технологического и инновационного потенциала территориальных образований // Мониторинг. Наука и технологии, 2024. №1(59). С.62-70.
4. Емелин Н.М., Рябов П.А., Смирнова К.А. Оценка вклада наукоградов в научно-технологическое развитие Российской Федерации // Двойные технологии, 2020. №1(90). С.60-65.
5. Емелин Н.М., Мелихов В.О. Инновационная

деятельность наукоградов как фактор обеспечения стабильности экономики муниципального образования // Стратегическая стабильность, 2016. №1(74). С.42-49.

6. Уханова А.В. Обзор методических подходов к оценке сбалансированности региональной экономики // HumanProgress, 2023. Т.9. Вып.4. С.12-29.
7. Садыков А.И. Методика оценки сбалансированного социально-экономического развития региона // Экономические науки, 2022. №11(216). С.153-158.
8. Управление сбалансированным развитием территориальных систем: вопросы теории и практики // Ред. кол.: академик А.И. Татаркин (руководитель). Челябинск: ЧелГУ, 2016. 295 с.
9. Ендовицкий Д.А., Сироткина Н.В., Гончаров А.Ю. Анализ дуализма экономических интересов в контексте проблемы обеспечения сбалансированного развития региона // Регион: системы, экономика, управление, 2014. №3(26). С.19-26.
10. Картунин Д.Н. Научно-методическое обеспечение мониторинга деятельности государствен-

## НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ • НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ • ОТЗЫВЫ

ных научных центров Российской Федерации // Интеллектуальная собственность. Промышленная собственность, 2024. №3. С.39-45.

11. Справка о результатах анализа соответствия показателей научно- производственных комплексов наукоградов Российской Федерации требованиям, установленным пунктом 8 статьи 2.1 Федерального закона №70-ФЗ «О статусе наукограда Российской Федерации», и достижения результатов, предусмотренных планами мероприятий по реализации стратегий социально-экономического развития наукоградов Российской Федерации в 2022 году .

12. Клейнер Г.Б.; Рыбачук М.А. Системная сба-

лансированность экономики России. Региональный разрез // Экономика региона, 2019. Т.15. Вып.2. С.309-323.

13. Медведев В.В. Выявление дисбаланса в системе социально-экономического, научно-технологического развития регионов и муниципальных образований на основе сопоставления их рейтингов // Глобальный научный потенциал, 2020. №9. С.89- 95.

14. Герасёва А.П. Оценка сбалансированности региональной экономики на основе принципа золотого сечения //Труды БГТУ. Серия 5. Экономика и управление, 2021. №2. С.76-82.





**Alatortsev Alexey I.** Doctor of Technical Sciences. Head of the department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Bakmaev Sabir M.-K.** Candidate of Physics and Mathematics. Head Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Butrina Elena P.** Head of the LISZI group, Interregional Educational Institution. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Dobkacz Leonid Y.** Chief Specialist, Joint Stock Company Center for Ground-Based Space Infrastructure Facilities Operation (TsENKI). Moscow, Tkatskaya street, 7.

**Elistratov Alexander V.** Leading engineer. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Emelin Nikolay M.** Honored Scientist of the RSFSR, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Federal State Budgetary Institution «STIII». Moscow, Zorge street, 22.

**Ermakov Artem M.** Candidate of Biological Sciences. Head of the Department of Genetic Engineering and Genomic Research LLC «Nanoporus». Moscow reg., Pushchino, st. Institutskaya, 3.

**Ermakova Olga N.** Candidate of Biological Sciences. Leading specialist of the Department of Genetic Engineering and Genomic Research LLC «Nanoporus». Moscow reg., Pushchino, st. Institutskaya, 3.

**Glebov Sergey A.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, Bazhenov str., 2.

**Gribunin Vadim G.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Science. Associate Professor. Chief Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Kazakov Rafael' R.** Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of the Department of «Tactics of units and subdivisions of rocket and space defense». Military space Academy named after A.F. Mozhaysky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Kolombet Valeriy A.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Kurguzov Valery V.** Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Kvashennikov Vladislav V.** Doctor of Technical Sciences. Leading Researcher. JSC «Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices». Kaluga, ul. K. Marx, 4.

**Lesnykh Vadim N.** Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Loskutov Sergey A.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, Bazhenov str., 2.

**Mazin Anatoly V.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Head of «Information Security». Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Murashko Alexander A.** Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher. Research and development support department scientific and methodological management. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Nakonechny Andrey B.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

**Nefedov Mikhail V.** Candidate of Sciences in Technology, Deputy Director for Science, Joint Stock Company «State center for standardization, certification and metrology on electromagnetic compatibility» (SC EMC). Moscow, Volgogradsky prospect, 42.

**Okov Igor A.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Leading Researcher Branch of JSC Radio Engineering Concern Vega. St. Petersburg, st. Academician Pavlova, 14 A.

**Oleinikov Vladimir P.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate Professor. An expert LISZI. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.



## AUTHORS

**Pankov Boris B.** Candidate of Technical Sciences. Senior lecturer of the department. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Podvigin Sergey V.** Candidate of technical Sciences. Head of laboratory quantum informatics technology. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Ponomarev Yuriy A.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. Associate Professor of the Department of Tactics and Units of Missile and Space Defense. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Potapov Alexey V.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, Bazhenov str., 2.

**Rudenko Edvard M.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Mathematics. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Rudnev Denis S.** Specialist of the Department of Genetic Engineering and Genomic Research LLC «Nanoporus». Moscow reg., Pushchino, st. Institutskaya, 3.

**Samburov Nikolay V.** Head of the microwave laboratory JSC Research and Production Enterprise Kaluga Instrument-Making Plant «Typhoon». Kaluga, Grabtsevskoe highway, 174.

**Semikina Elena V.** Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Smirnov Dmitriy V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, associate professor. Full member of the Academy of Engineering Sciences.

Professor of the Department FSBEI of HE MAI (NRU). First Vice President of the Institute – Deputy Chairman of the Board of the Institute of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Smurov Sergey V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor. First Vice President of the Institute – Chief Designer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Tikhonov Alexander M.** Postgraduate student. Financial university under the Government of the Russian Federation. Team leader of Naumen Consulting LLC. Moscow, st. Vorontsovskaya, 35b, building 3.

**Ustinov Andrey A.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Leading Researcher FSUE «GosNIIPP». St. Petersburg, Obvodny Canal embankment, 29.

**Volkov Gennadiy G.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Zakharov Vladimir L.** Doctor of Military Sciences, professor. Full member of the Academy of Military Sciences. Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

**Zelenevsky Vladimir V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Zelenevsky Yury V.** Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.



## ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

**Редактор в своей деятельности обязуется:**

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

### ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

**Решение о публикации.**

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

### Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

### Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

### Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

### ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

#### Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

#### Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

#### Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

#### Подтверждение источников.

Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

#### Авторство материала.

Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

#### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

#### Ошибки в опубликованных работах.

Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность – незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издательство и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

#### НАРУШЕНИЯ

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, без привлечения лиц, которые могут иметь конфликт интересов с одной из сторон.

Если материал, содержащий значительные неточности, был опубликован, он должен быть незамедлительно исправлен в форме, доступной для читателей и систем индексирования.

## ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

**Тексты** должны быть представлены:

○ в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!

○ на бумажном носителе формата А4.

**Текст статьи** должен быть набран через 1,5 интервала (гарнитура «Times New Roman»), кегль 14.

**Простые символы и формулы не набирать в математическом редакторе!**

Напечатанный текст должен иметь поля: верхнее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см.

Вверху первой страницы статьи размещаются:

- рубрика журнала (см. Приложение 1);
- УДК;
- название статьи с переводом на английский язык;
- имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

**Список литературы (Литература)** размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:

○ список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):

- ФИО;
- ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;
- адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес.

**Обращаем особое внимание на:**

○ точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);

- выверенность статьи в компьютерном наборе;
- полное соответствие файла на электронном носителе и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

#### Приложение 1

### РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА «Известия Института инженерной физики»

#### Постоянные рубрики

- **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.**
- **Радиотехника и связь.**
- **Информатика, вычислительная техника и управление.**

#### Разовые рубрики

- **Техника специального назначения.**
- **Инновационные проекты.**
- **Техническое регулирование.**
- **Профессиональное образование.**
- **Искусственный интеллект и робототехника.**
- **Современная медицина и фармацевтика.**
- **Наукометрия.**
- **Диагностические системы.**
- **Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.**

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.



## CONTENTS

### **INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS**

**Nefedov M.V.**

Problematic issues of development, operation and metrological support of reverberation chambers for testing radio-electronic equipment for electromagnetic compatibility and solving measurement problems ..... 2

**Zakharov V.L., Smirnov D.V., Ponomarev Y.A., Pankov B.B.**

Methodology for assessing the effectiveness of reflecting air defense UAV strikes in conditions of information impact ..... 8

**Loskutov S.A., Samburov N.V., Potapov A.V., Glebov S.A.**

Analysis of antenna measurement methods and measurement systems for their implementation ..... 12

### **RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION**

**Zelenevsky V.V., Zelenevsky Y.V., Kurguzov V.V., Nakonechny A.B.**

Noise immunity of Rayleigh radio data transmission channels with uncorrelated signal fading at spatial diversity of receiving antennas ..... 16

**Alatortsev A.I., Podvigin S.V., Bakmaev S.M.-K.**

Resonator system of a quantum emitter based on a nitrogen vacancy in diamond ..... 21

**Mazin A.V., Loskutov S.A., Potapov A.V.**

The algorithm for forming a consistent filter ..... 25

### **INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT**

**Okov I.A., Ustinov A.A., Gribunin V.G., Murashko A.A.**

Analysis of directions for the development of methods for steganographic authentication of images in transmission channels of complexes with unmanned aerial vehicles ..... 29

**Dobkacz L.Y.**

Problems of formal representation of complex information security tools ..... 39

**Zakharov V.L., Smirnov D.V., Kazakov R.R., Ponomarev Y.A.**

Methodology for assessing the effectiveness of reflecting air defense UAV strikes in conditions of information impact ..... 43

**Kvashennikov V.V.**

Some pattern recognition mechanisms in coordinated neural networks ..... 48

**Smurov S.V., Volkov G.G.**

On spin-photon entanglement protocols in the creation of remote quantum networks ..... 55

**Tikhonov A.M.**

Platform for creating a distributed infrastructure of decoys as part of a layered defense system ..... 65

**Butrina E.P., Oleynikov V.P.**

Expert models for assessing the probability of an event occurring ..... 72

**Rudenko E.M., Semikina E.V.**

The method of calculating eulerian and hamiltonian routes for UAVS using reduction (ending) ..... 82

### **MODERN MEDICINE AND PHARMACEUTICS**

**Kolombet V.A., Lesnykh V.N., Elistratov A.V.**

Perspective of physiological research in biophysical psychoanalysis ..... 88

### **INNOVATIVE PROJECTS**

**Ermakov A.M., Ermakova O.N., Rudnev D.S.**

Nanopore sequencing and artificial intelligence. How machine learning obtains nucleotide sequences from the electrical currents of protein nanopores..... 99

### **SCIENTIFIC REVIEWS. SCIENTIFIC CRITIQUES.**

#### **COMMENTS**

**Emelin N.M.**

An approach to analyzing the activities of research and production complexes of science cities ..... 103

#### **AUTHORS**

..... 107

#### **THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS**

..... 109

#### **REQUIREMENTS TO AUTHORS**

..... 110

Учредитель и издатель – АНО «Институт инженерной физики».

Адрес: 142210,

Московская обл., г.о. Серпухов, г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а, стр. 1.

Подписной индекс: 59190  
по каталогу «Урал-Пресс»

Адрес редакции: 142210, Московская обл.,  
г.о. Серпухов, г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а, стр.1.  
Тел: +7 (4967) 35-31-93, 35-13-71

Факс: +7 (4967) 35-44-20 <http://www.iifrf.ru>  
E-mail: [info@iifmail.ru](mailto:info@iifmail.ru)

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС 77-84007 от 30.09.2022  
Отпечатано на полиграфической базе АНО «Институт инженерной физики».

Адрес: 142210, Московская обл., г.о. Серпухов, г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а, стр. 1.  
Подписано в печать 12.08.2024.

Дата выхода в свет 18.08.2024. Тираж 2000 экз. Цена свободная.  
© Автономная некоммерческая организация  
«Институт инженерной физики», 2024.



**Автономная некоммерческая организация  
“Институт инженерной физики”**

142210, Московская обл., г. о. Серпухов, г. Серпухов, Большой Ударный переулок, д. 1а, стр. 1  
<http://www.iifrf.ru> e-mail: [info@iifmail.ru](mailto:info@iifmail.ru)  
Тел.: +7(4967) 35-31-93, 35-13-71, +7 (499) 400-05-75, факс: +7(4967) 35-44-20