№2 +0
2023 [68]

научно-технический журнал

Известия

ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ

27 апреля

3 ЛЕТ

АНО «ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ» • ОСНОВАН 27 АПРЕЛЯ 1993 ГОДА •

ИИФ РФ

РАБОТЫ НА БЛАГО РОДИНЫ

Автономная некоммерческая организация
“Институт инженерной физики”

В НОМЕРЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО–ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

2 **Алаторцев А.И., Фуров А.Н., Нищаков И.С.**
Особенности перехвата метеоритных осколков в атмосфере

5 **Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Казаков Р.Р., Ключкин А.К.**
Подход к формированию требований к точностным характеристикам измерительных средств системы селекции бортового специального комплекса космического аппарата

9 **Николаев А.В.**
Модель технико-экономической оценки эффективности синхронного генератора с возбуждением пульсирующим током для дизель-электрического агрегата с переменной частотой вращения системы автономного электроснабжения специальных комплексов военного назначения

13 **Коломбет В.А., Шарпан Д.А., Лесных В.Н.**
Перспектива поиска релятивистских эффектов в универсальной системе утраивающихся периодов

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

18 **Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Попов А.В., Наконечный А.Б., Панин А.Е.**
Статистическая оценка имитозащищенности передаваемых сообщений стеганографическими методами в системах радиосвязи

23 **Квашенников В.В.**
Метод мягкого итеративного декодирования линейных помехоустойчивых кодов

29 **Таганов Н.С., Бессонов М.А.**
Способы противодействия скрытым каналам передачи информации, встраиваемым в алгоритмы электронно-цифровых подписей

34 **Мазин А.В., Потапов А.В., Сычёв М.П., Сычёв А.М., Спивак В.И., Крылов В.О.**
Формализованное представление процесса перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов паразитной (авто) генерации в технических средствах объекта разведки

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

41 **Мамонтов А.Н., Роговой А.В., Горанов М.З., Малышев А.Ю., Орехов Р.В.**
Селекция инфразвуковых сигналов атмосферных ядерных взрывов на малобазовых акустических группах

45 **Колпаков Д.М., Сайфутдинов Н.А., Вершинин Е.В.**
Анализ алгоритмов групповой цветовой коррекции мультиспектральных спутниковых снимков

49 **Смуров С.В., Волков Г.Г.**
Особенности квантовых состояний NV-центров в нелокальности запутанности и телепортации

59 **Толстенко Л.С., Клейменов А.А., Али Б., Крынецкая Г.С., Коробков А.А.**
Анализ нейронных сетей для детектирования светофоров на изображениях

66 **Суворов Г.П., Смирнов Д.В., Коробков А.А., Елохин С.В., Аллилуева Н.В.**
Практическая реализация нейронной сети в проекте системы видеомониторинга и аналитики пассажиропотока на транспортных средствах

74 **Смуров С.В.**
Метод упорядоченной выборки элементов на основе массива управляющих переменных

81 **Атакищев О.И., Грибунин В.Г., Созыкин И.А., Пастухов В.Д.**
Обнаружение аномалий и выбросов в наборах данных машинного обучения

88 **Тимченко Д.К., Вершинин Е.В.**
Исследование применения методов машинного обучения в области lifestyle медицины

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

91 **Бугаков И.А., Царьков А.Н., Елистратов В.В., Бугаков А.И.**
О признаках и уровнях искусственного интеллекта. Концептуальные основания. Часть 2

102 **Бикмаев Р.Р.**
Определение нелинейной функции сравнения изображений с применением сиамской сверточной нейронной сети

СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

107 **Маевский Е.И., Богданова Л.А., Косякова Н.И.**
Возможное патогенетическое обоснование терапии постковидного синдрома

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

113 **Лесных В.В.**
К вопросу экспериментального исследования результирующего поля при взаимодействии постоянных магнитов

119 **AUTHORS**

121 **ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

122 **ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ**

Научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Института инженерной физики

№2 (68) 2023

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

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 РСФСР, 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

научно-технический журнал
Известия
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ
№ 2 2023
68

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 Смуров
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

Алексей Николаевич Царьков

Президент Института инженерной физики
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
почётный гражданин города Серпухова

Дорогие друзья!
27 апреля 2023 года Институту инженерной физики исполняется 30 лет!
От всей души поздравляю коллег, единомышленников, партнёров с юбилеем Института!

За эти годы Институт не только прошёл успешный путь становления, определения направлений развития, осваивания новых сфер деятельности, выстраивания отношений с партнёрами и заказчиками, но и внёс большой вклад в разработку и внедрение новейших образцов оборудования, высокоточных приборов, систем безопасности и связи, информационных технологий, военной экипировки и медицинских препаратов. Сформировался и сплотился коллектив профессионалов, расширилась материально-техническая база, сложились традиции и научные школы.

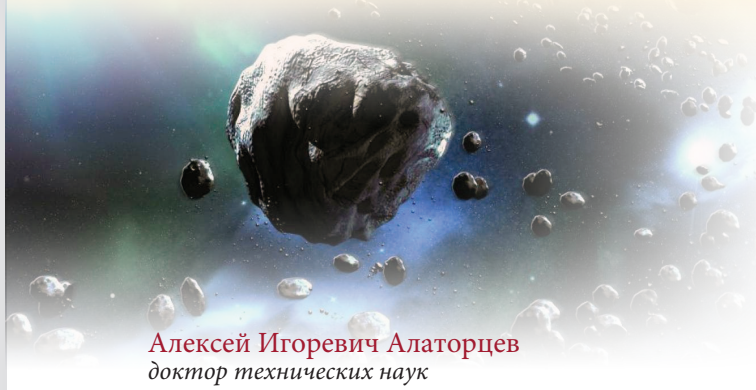
Сегодня, спустя 30 лет плодотворной работы, Институт – одно из ведущих предприятий оборонно-промышленного комплекса. Учёные Института трудятся в интересах повышения обороноспособности страны, для развития Московской области, городского округа Серпухов, на высоком уровне выполняют государственные заказы, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, внедряют инновационные разработки, оказывают населению услуги в области проектирования, инсталляции и обслуживания систем связи и технических систем безопасности, сертификации и аттестации объектов информатизации, занимаются подготовкой научных кадров.

Важнейшим достижением коллектива, высокой оценкой нашего труда и доверия к нам со стороны Правительства Московской области стало присвоение Институту в августе 2022 года статуса Технопарка в сфере высоких технологий. Уверен, что, благодаря профессиональной работе специалистов Института и наших партнёров, Технопарк в сфере высоких технологий «ТехноИнноватика» будет развиваться, привлекая новых резидентов, тем самым способствуя повышению инвестиционной привлекательности и экономическому развитию Серпухова и всего Южного Подмосковья.

Выражаю сердечную благодарность тем, с кем в далёкие 90-е годы начинали создавать Институт, тем, кто сегодня трудится на благо нашего общего дела, нашим партнёрам, коллегам и друзьям.

Институт инженерной физики – это сплочённый коллектив, который, несмотря на трудности, с уверенностью в своём профессионализме и в своих жизненных принципах, выполняет свой долг – работает на благо России.

В день 30-летия Института от всей души желаю нашему коллективу не останавливаться на достигнутом, желаю реализации научного и творческого потенциала, воплощения в жизнь всех задуманных планов и проектов, здоровья, благополучия, счастья, успехов и уверенности в завтрашнем дне!



УДК 629.191

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХВАТА МЕТЕОРИТНЫХ ОСКОЛКОВ В АТМОСФЕРЕ

FEATURES OF INTERCEPTION OF METEORITE FRAGMENTS IN THE ATMOSPHERE

Алексей Игоревич Алаторцев
доктор технических наук
начальник управления
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

Андрей Николаевич Фуров
кандидат технических наук
заместитель начальника кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Telephone: 8 (925) 791-29-42
E-mail.: afurov@gmail.ru

Иван Сергеевич Нищаков
кандидат технических наук
преподаватель
филиал ВА РВСН им. Петра Великого
(г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Telephone: 8 (916) 698-52-91
E-mail.: nishackov.iwan@yandex.ru

Аннотация
Настоящая статья посвящена рассмотрению вопросов перехвата метеоритных осколков или метеоритов в случае попадания их в атмосферу за счет применения наземных средств поражения. Описаны существующие модели движения наземных средств поражения к цели, которые позволяют осуществлять моделирование перехвата метеоритных осколков в атмосфере.
Ключевые слова: метеоритный осколок, наземное средство поражения, перехват, сложная техническая система.

Summary
This article is devoted to the consideration of the issues of interception of meteorite fragments or meteorites in case they enter the atmosphere due to the use of ground-based weapons. The existing models of the movement of ground-based weapons to the target are described, which allow modeling the interception of meteorite fragments in the atmosphere.
Keywords: meteorite fragment, ground-based means of destruction, interception, complex technical system.

Современные наблюдения за космическим пространством показывают, что периодически из космического пространства осуществляется падение на Землю метеоритных осколков (МО) или полноценных метеоритов различных геометрических размеров. Ввиду этого возникает необходимость осуществления наращивания средств и способов перехвата наземными средствами МО для обеспечения недопущения нанесения ущерба инфраструктуре государств и человечеству в целом. Таким образом, возрастает актуальность наращивания исследований по перехвату МО сложными техническими системами в плотных слоях атмосферы [1]. Хочется отметить, что процесс распознавания МО осуществляется на расстояниях от Земли, позволяющих в дальнейшем произвести процесс перехвата. С момента распознавания МО за ними осуществляется постоянное наблюдение и прогнозирование возможных траекторий полета. Под перехватом необходимо понимать уничтожение МО с помощью применения сложных технических систем (СТС). В ряде случаев он осуществляется как на дальних подступах к поверхности Земли, так на средних и ближних высотах, где эффективно осуществляется применение органов управления наземных средств поражения (НСП).

Описанная проблемная ситуация заставляет постоянно совершенствовать процесс моделирования движения МО с целью повышения эффективности их перехвата НСП.

При моделировании перехвата на электронных вычислительных машинах целесообразно применять две модели движения к цели. Первая - для имитации действительного ее движения и расчета промаха НСП в момент пролета

на минимальном расстоянии от цели. Вторая модель используется в алгоритмах системы наведения НСП для пролонгации, т.е. прогноза ее движения на некоторый интервал времени и определения координат упрежденной точки встречи в каждом цикле наведения [2].

Первую модель желательно иметь той же адекватности и точности, что и для наземных средств перехвата. Вторую – использовать для решения задачи пролонгации в системе наведения НСП исследуемого типа. Требующиеся для пролонгации начальные значения параметров движения МО определяются по результатам траекторных измерений. В условиях отсутствия точного знания о силах, действующих на цель, в алгоритмах наведения используются различные гипотезы о законе движения цели. Наиболее простой, очевидно, является гипотеза о прямолинейном и равномерном движении цели, начиная с момента последнего определения параметров ее координат и скорости движения. Возможна и аппроксимация траектории цели с помощью полиномов различного порядка по измерениям в нескольких точках. С каждым новым сеансом измерений прогнозируемые координаты цели уточняются, поскольку погрешность гипотезы на меньшем отрезке времени уменьшается. В ряде случаев прогнозирование ведется до заданной высоты. Однако на момент старта НСП, прогноз движения МО осуществляется на достаточно большой отрезок времени, и модель равномерного и прямолинейного ее движения или какая-либо полиномиальная модель, могут привести к значительным ошибкам определения положения упрежденной точки.

Рассмотрим сначала, вопрос о моделировании действительного движении цели в задаче перехвата. Под целью будем понимать МО.

Очевидно, вполне приемлемой может считаться модель в виде системы дифференциальных уравнений в той же системе координат и в том же виде, что и для НСП. Различия только в задании сил:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot V_{\eta\xi} \\ \dot V_{\eta\eta} \\ \dot V_{\eta\varsigma} \end{bmatrix} = -\frac{g_0 \cdot R_з^2}{r_\eta^3} \begin{bmatrix} \xi_\eta \\ \eta_\eta \\ \varsigma_\eta \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} \xi_\eta \omega + 2\eta_\eta \\ \eta_\eta \omega - 2\xi_\eta \\ 0 \end{bmatrix} + g_0 \cdot M_{\xi} \leftarrow \tau \begin{bmatrix} n_\tau \\ n_n \\ n_b \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot \xi_\eta \\ \dot \eta_\eta \\ \dot \varsigma_\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\eta\xi} \\ V_{\eta\eta} \\ V_{\eta\varsigma} \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (1)$$

где матрица направляющих косинусов определяется через координаты и компоненты вектора скорости цели так же, как при моделировании движения НСП.

Далее рассмотрим систему дифференциальных уравнений, позволяющую описывать движение НСП:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot V_\xi \\ \dot V_\eta \\ \dot V_\varsigma \end{bmatrix} = -\frac{g_0 \cdot R_з^2}{r^3} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \varsigma \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} \xi\omega + 2\eta \\ \eta\omega - 2\xi \\ 0 \end{bmatrix} + g_0 \cdot M_{\xi} \leftarrow \tau \begin{bmatrix} n_\tau \\ n_n \\ n_b \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot \xi \\ \dot \eta \\ \dot \varsigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\xi \\ V_\eta \\ V_\varsigma \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (2)$$

где матрица направляющих косинусов $M_{\xi}\leftarrow\tau$ определяется через координаты и компоненты вектора скорости цели.

Перегрузки, действующие на цель, n_τ, n_n, n_b – рассчитываются с помощью следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} n_\tau = -\frac{\rho(h_ц) \cdot V_ц^2}{2m_ц \cdot g_0} \cdot S_{мц} \cdot C_x(\alpha, \beta, M, h_ц) \\ n_n = -\frac{\rho(h_ц) \cdot V_ц^2}{2m_ц \cdot g_0} \cdot S_{мц} \cdot C_y(\alpha, M, h_ц) \\ n_b = -\frac{\rho(h_ц) \cdot V_ц^2}{2m_ц \cdot g_0} \cdot S_{мц} \cdot C_z(\beta, M, h_ц) \end{cases}, \quad (3)$$

где площадь миделя $S_{мц}$ и аэродинамические коэффициенты C_x, C_y, C_z в виде табличных функций должны быть заданы [3].

Интегрировать системы уравнений движения НСП (2) и цели (1) можно параллельно и с одинаковым шагом до момента пролета НСП на минимальном расстоянии от цели.

Так как во множестве случаев цель не осуществляет изменение направления вектора скорости, то в (3) можно допустить, что $\alpha=\beta=0$, и тогда:

$$n_\tau = -\frac{\rho(h_ц) \cdot V_ц^2}{2m_ц \cdot g_0} \cdot S_{мц} \cdot C_{xo}(M, h_ц), \quad (4)$$
$$n_n = n_b = 0.$$

Если цель осуществляет изменение вектора скорости, то в выражениях для перегрузок (3) должны быть заданы законы изменения углов атаки и скольжения:

$$\alpha=\alpha_{зад}(t) \text{ и } \beta=\beta_{зад}(t), \ (t_o \le t \le t_к). \quad (5)$$

В исследовательских целях можно задавать любые законы. Наиболее простыми будут: $\alpha_{зад}(t)$=const и $\beta_{зад}(t)$=const.

Рассмотренная модель удобна не только для исследования возможностей перехвата целей, осуществляющих изменение вектора скорости в процессе полета, но и для выбора эффективных видов маневров управляемых средств поражения при наведении их на цели.

Как было отмечено выше, в алгоритмах наведения НСП модель движения цели в задаче пролонгирования должна удовлетворять, прежде всего, требованиям быстродействия. Модель прямолинейного и равномерного движения, удовлетворяя по быстродействию, может

не удовлетворить требованиям точности. Более приемлемой можно считать кеплерову модель движения материальной точки. Дифференциальные модели с приближенным учетом аэродинамических сил тоже вполне возможны, но требуют высокого быстродействия вычислительных средств системы наведения НСП.

Рассмотрим задачу пролонгации в системе координат $O_н xyz$, начало которой совпадает с точкой старта наземных средств перехвата, ось $O_н y$ направлена вверх по продолжению радиуса Земли, ось $O_н x$ – в горизонтальной плоскости в направлении на цель в момент начала решения задачи пролонгации, ось $O_н z$ дополняет систему до правой. В реальной ситуации направление оси $O_н x$ в горизонтальной плоскости определяется азимутом A_x, который вычисляется после обнаружения цели и прогнозирования ее движения до заданной высоты. В исследовательских задачах азимут A_x задается. Уравнения движения материальной точки в поле центральной силы притяжения (кеплерова модель движения) в системе координат $O_н xyz$ запишутся в виде:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{V}_{цx} \\ \dot{V}_{цy} \\ \dot{V}_{цz} \end{bmatrix} = -\dfrac{g}{r_ц} \begin{bmatrix} x_ц \\ y_ц \\ z_ц \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_ц \\ \dot{y}_ц \\ \dot{z}_ц \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{цx} \\ V_{цy} \\ V_{цz} \end{bmatrix} \end{cases} \qquad (6)$$

где $r_ц = \sqrt{x_ц^2 + y_ц^2 + z_ц^2}, g = g_o \cdot R_з^2 / (R_з + y_ц)^2$, $R_з$ – средний радиус Земли.

Уравнения (6) имеют аналитическое решение, поскольку описывают движение материальной точки в рамках кеплеровой схемы движения материальной точки. Однако, допуская, что в реальной системе наведения используются аналитические решения, в исследовательских целях удобнее пользоваться результатами, полученными численным интегрированием системы уравнений (6).

Если быстродействие вычислителя системы наведения НСП позволяет, в алгоритме прогноза движения цели помимо гравитационной силы можно учесть и силу аэродинамического сопротивления. Тогда к правой части динамического уравнения системы (6) добавится еще слагаемое – составляющие перегрузки от действия аэродинамической силы лобового сопротивления:

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = g_0 \cdot Mx \leftarrow \tau \begin{bmatrix} -\dfrac{\rho(h_ц) \cdot V_ц^2}{2m_ц^* \cdot g_0} \cdot S_{мц}^* \cdot C_{xo}^*(M, h_ц) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad (7)$$

где значения $m_ц^*$, $S_{мц}^*$, $C_{xo}^*(M, h_ц)$ являются, строго говоря, неизвестными для реальной системы наведения, а потому могут быть заданы лишь весьма приблизительными величинами, руководствуясь аналогами характеристик типовых аппаратов, похожих на данную цель. Во всяком случае, при моделировании перехвата эти характеристики должны быть отличны по значениям от тех же характеристик в уравнениях (1), имитирующих реальное движение цели.

Матрица $Mx \leftarrow \tau$, входящая в выражение (7), может быть вычислена в виде произведения трех матриц:

$$Mx \leftarrow \tau = Mx \leftarrow x_N \cdot Mx_N \leftarrow \xi \cdot M_\xi \leftarrow \tau, \qquad (8)$$

где элементы матрицы $M_\xi \leftarrow \tau$, элементы которой обозначим γ_{ij} и рассчитываются по формулам:

$$\gamma_{ij} = \frac{V_\xi}{V}, \gamma_{ij} = \frac{V_\eta}{V}, \gamma_{ij} = \frac{V_\zeta}{V},$$

где V_ξ, V_η, V_ζ, – компоненты вектора скорости НСП в системе координат $O_{\xi\eta\zeta}$, а V – его модуль, в которых величина r вычисляется как $r = R_з + y$; матрица $Mx_N \leftarrow \xi$, имеет вид:

$$Mx_N \leftarrow \xi = \begin{bmatrix} \cos B_{cn} & -\sin B_{cn} & 0 \\ \sin B_{cn} & \cos B_{cn} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad (9)$$

где B_{cn} – широта позиции старта НСП, а матрица $Mx \leftarrow x_N$ определяется выражением:

$$Mx \leftarrow x_N = \begin{bmatrix} \cos A_x & 0 & \sin A_x \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_x & 0 & \cos A_x \end{bmatrix}, \qquad (10)$$

где A_x – азимут направления оси $O_н x$.

Путем заблаговременных многочисленных расчетов для НСП каждого типа, устанавливается приближенная зависимость между временем полета НСП (оно же является и временем движения типовой цели для нее) и координатами упрежденной точки в системе координат $O_н xyz$.

Таким образом, на основании описанного, можно сделать вывод, что рассмотренные особенности позволят осуществить уточнение расчетных условий при проведении моделирования движения МО и повысить эффективность перехвата их в плотных слоях атмосферы с целью недопущения падения МО на поверхность Земли.

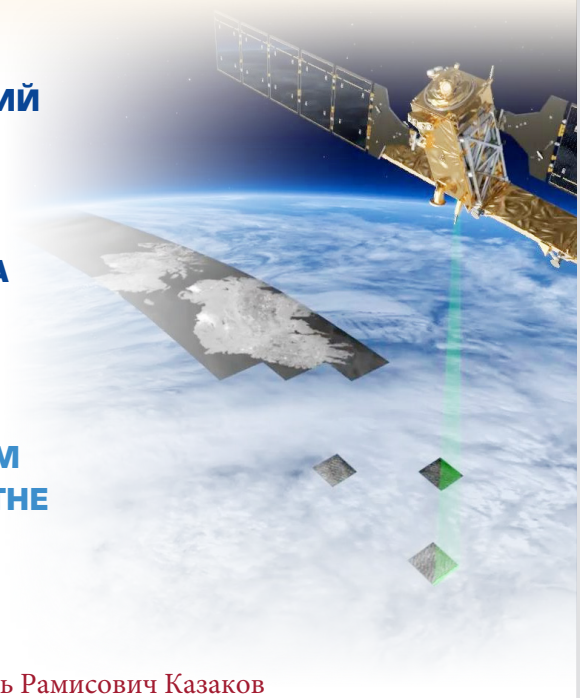
Литература

1. Алаторцев А.И., Фуров А.Н., Нищаков И.С. Оценка возможностей перехвата тел природного происхождения в плотных слоях атмосферы // Известия Института инженерной физики, 2022. №1(63). С.6-8.
2. Ануреев И.И. Оружие противоракетной и противокосмической обороны. М.: Воениздат, 1971. 303 с.
3. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика летательных аппаратов. М.: Наука, 1982. 352 с.

УДК 629.78

ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ СЕЛЕКЦИИ БОРТОВОГО СПЕЦИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

AN APPROACH TO THE FORMATION OF REQUIREMENTS FOR THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF THE MEASURING INSTRUMENTS OF THE SELECTION SYSTEM OF THE ONBOARD SPECIAL COMPLEX OF THE SPACECRAFT



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 АИН
профессор кафедры
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Первый Вице-президент Института АНО «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: dv_smr@iifmail.ru

Рафаэль Рамисович Казаков
кандидат технических наук
заместитель начальника кафедры
«Тактики частей и подразделений
ракетно-космической обороны»
ВКА им. А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (911) 223-59-67
E-mail: xoxlov1984@bk.ru

Александр Константинович Ключкин
адъюнкт кафедры «Бортовых информационных и
измерительных комплексов космических аппаратов»
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (908) 836-62-51
E-mail: anyska1996@mail.ru

Аннотация
Рассмотрены основные особенности инспектирования и селекции анализируемого космического объекта на основе его спектрально-энергетических характеристик. Предложено теоретико-множественное описание процесса функционирования оптико-электронных средств и предложен подход к формированию требований к точностным характеристикам космических аппаратов.
Ключевые слова: оптико-электронные приборы, анализируемый космический объект, космический аппарат-инспектор, селекция, орбитальная система, система координат.

Summary
The features of inspection and selection of the analyzed space object on the energy characteristics are considered. The theoretical-multiple description of the process of functioning of optical-electronic means is proposed and an approach is proposed to the formation of requirements for the accuracy characteristic of spacecraft.
Keywords: optoelectronic devices, analyzed space object, spacecraft-inspector, selection, orbital system, coordinate system.

Введение

При синтезе оптико-электронных средств (ОЭС), осуществляющего поиск и распознавание анализируемого космического объекта (АКО) на основе его спектрально-энергетических селективных признаков, существенным является выбор момента времени перехвата t_0, определяющего условия освещения АКО, а также выбор подлетной траектории космического аппарата-инспектора (КАИ), определяющего ракурс наблюдения цели [1]. При априорной неопределенности времени начала периода обнаружения и, как следствие, времени применения КАИ по назначению, существует необходимость прове-

дения анализа для каждого КО некоторого множества операционных ситуаций, определяющих величину признаков селекции. Под операционной ситуацией здесь понимается совокупность условий проведения селекции АКО, определяемых состоянием объектов окружающей среды (источников излучения) [1, 2], непосредственного участия в процессе селекции не принимающих, но влияющих на его исход, а также относительным угловым положением КАИ и АКО.

Постановка задачи

Итак, пусть имеется множество АКО $S_{\{K\}}$ подлежащих инспекции, каждый q-й из которых может быть представлен тройкой

$$\hat{W}^q_{\langle 3\rangle}(t)=\left\langle \hat{Y}^q_{\langle 3\rangle}(t),\hat{\theta}^q_{\langle 3\rangle}(t),\hat{L}^q_{\langle 3\rangle}(t,\lambda)\right\rangle, \quad (1)$$

где $\hat{Y}^q_{\langle 3\rangle}(t)$ – вектор положения центра масс q-го АКО в момент времени t в некоторой инерциальной системе координат (например, АГЭСК);

$\hat{\theta}^q_{\langle 3\rangle}(t)$ – вектор углового положения АКО в момент времени t относительно осей орбитальной системы координат;

$\hat{L}^q_{\langle 3\rangle}(t,\lambda)$ – оптико-геометрическая структура АКО в момент времени t, определяющая характер взаимодействия падающего излучения сторонних источников с элементами конструкции АКО, а также собственное излучение последних на длине волны λ.

Пусть КАИ применяется по q-му АКО, приближаясь к нему по некоторой подлетной траектории $\hat{Y}^{\text{П}}_{\langle 3\rangle}(t)$, заданной в той же системе координат, что и траектория цели $\hat{Y}^{\text{Ц}}_{\langle 3\rangle}(t)$. В момент времени t_0, соответствующий началу третьего этапа процесса наведения КАИ, ОЭС осуществляет селекцию АКО на фоне звезд и техногенных тел, после чего в его поле зрения на некотором угловом удалении друг от друга наблюдается M точечных излучающих объектов [1], среди которых имеется одна истинная цель (АКО), а остальные цели – ложные.

Наблюдаемые объекты

$$(V_{\{M\}}=\{1,2,3,...,j,...,M\}-$$

множество номеров объектов) образуют достаточно компактную группу, в которой каждый j-й объект движется в пространстве по некоторой траектории

$$\hat{Y}^j_{\langle 3\rangle}(t)=\hat{Y}^{\text{Ц}}_{\langle 3\rangle}(t)+\hat{\Delta}^j_{\langle 3\rangle}(t),$$

где $\hat{\Delta}^j_{\langle 3\rangle}(t)$ малы (до единиц километров) и слабо зависят от времени. Причем, следует отметить, что периодические перестроения АКО не позволяют указать, какой именно из наблюдаемых объектов является целью, и, следовательно, задание траектории движения АКО в значительной степени является условным.

Спектральная сила излучения j-го наблюдаемого объекта в направлении ОЭС определяется выражением

$$\hat{I}^j(t_0,\lambda)=H\left[\hat{L}^j_{\langle 3\rangle}(t_0,\lambda),\hat{R}^j_{\langle 3\rangle}(t_0),\hat{\theta}^j_{\langle 3\rangle}(t_0),\hat{F}_{\langle p\rangle}(t_0),\hat{E}_{\langle p\rangle}(t_0,\lambda)\right], \quad (2)$$

где $\hat{L}^j_{\langle 3\rangle}(t_0,\lambda)$ – оптико-геометрическая структура j-го объекта в момент времени t_0;

$\hat{R}^j_{\langle 3\rangle}(t_0)$ – ракурс наблюдения объекта, определяющий его ориентацию относительно линий визирования;

$\hat{\theta}^j_{\langle 3\rangle}(t_0)$ – углы, задающие ориентацию АКО в орбитальной системе координат;

$\hat{F}_{\langle p\rangle}(t_0),\hat{E}_{\langle p\rangle}(t_0,\lambda)$ – условия освещения объектов;

H – оператор решения прямой фотометрической задачи.

Оптико-геометрическая структура $\hat{L}^j_{\langle 3\rangle}(t_0,\lambda)$ представима тройкой

$$\hat{L}^j_{\langle 3\rangle}(t_0,\lambda)=\left\langle \hat{G}^j_{\langle S_g\rangle}(t_0),\hat{T}^j_{\langle S_T\rangle}(t_0),\hat{Q}^j_{\langle S_q\rangle}(t_0,\lambda)\right\rangle, \quad (3)$$

элементы которой представляют собой конечномерные вектор-функции соответственно

$\hat{G}^j_{\langle S_g\rangle}(t_0)$ – геометрической структуры;

$\hat{T}^j_{\langle S_T\rangle}(t_0)$ – теплового режима;

$\hat{Q}^j_{\langle S_q\rangle}(t_0,\lambda)$ – оптических характеристик покрытий.

Ракурс наблюдения представляет собой единичный вектор $\hat{R}^j_{\langle 3\rangle}(t_0)$, задающий направление на КАИ в связанной системе координат j-го объекта.

Условия освещения определяются также конечномерными вектор-функциями

$$\hat{F}_{\langle p\rangle}(t_0)=\left\langle \hat{f}^1_{\langle 3\rangle}(t_0),\hat{f}^2_{\langle 3\rangle}(t_0),...,\hat{f}^p_{\langle 3\rangle}(t_0)\right\rangle \text{ и}$$

$$\hat{E}_{\langle p\rangle}(t_0,\lambda)=\left\langle \hat{e}^1_{\langle 3\rangle}(t_0,\lambda),\hat{e}^2_{\langle 3\rangle}(t_0,\lambda),...,\hat{e}^p_{\langle 3\rangle}(t_0,\lambda)\right\rangle,$$

задающими соответственно единичные направления на p точечных источников излучения в орбитальной системе координат АКО, и спектральные освещенности, создаваемые этими источниками на его поверхности при нормальном падении излучения [1,3]. В силу малости приращений $\hat{\Delta}^j_{\langle 3\rangle}(t_0)$ по отношению к расстоянию между АКО и любым из p источников излучения условия освещения могут быть приняты одинаковыми для всех объектов множества $V_{\{M\}}$.

Теоретико-множественное описание процесса функционирования оптико-электронных средств

Будем считать, что связанная система координат АКО в режиме его функционирования по назначению повернута относительно орбитальной системы координат на известные углы $\hat{\theta}^{\text{Ц}}_{\langle 3\rangle}(t_0)$, определяемые условиями освещения АКО, (с точностью до амплитуды стабилизационных колебаний), а наведение КАИ осуществляется по одной k-ой траектории из множества подлетных траекторий $D_{\{S_R\}}$. Тогда ракурс

наблюдения АКО $\hat{R}^{\text{Ц}(k)}_{\langle 3\rangle}(t_0)$, наряду с условиями его освещения, определяет операционную ситуацию

$$\hat{\omega}_{rk} = \left\langle \hat{R}^{\text{Ц}(k)}_{\langle 3\rangle}, \hat{F}^{(r)}_{\langle p\rangle}, \hat{E}^{(p)}_{\langle p\rangle}(\lambda) \right\rangle. \quad (4)$$

Параметр t_0 здесь опущен и заменен на порядковый номер r элементарного интервала времени, в пределах которого элементы тройки $\hat{\omega}_{rk}$ могут считаться постоянными для данной подлетной траектории. В силу того, что время боевого применения КАИ t_0 заранее не определено ($t_0 \in [0, \infty)$), операционная ситуация $\hat{\omega}_{rk}$ в общем случае является элементом бесконечного счетного множества ситуаций $\Omega_{\{\infty\}}$. Очевидно, в этом случае решение задачи синтеза ОЭС селекции АКО не представляется возможным по причине разомкнутости области определения любого формализуемого функционала качества функционирования ОЭС.

Вследствие периодичности орбитального движения объектов, составляющих группу селектируемых источников излучения, а также объектов окружающей среды (Солнце, Земля, Луна, планеты и т.д.), существует вполне определенное конечное число их положений друг относительно друга. Помимо этого, существует также конечное число подлетных траекторий КАИ $d\hat{Y}_{\langle 3\rangle}(t) = \hat{Y}^{\text{О}}_{\langle 3\rangle}(t) - \hat{Y}^{\text{Ц}}_{\langle 3\rangle}(t)$, обусловливающих ракурс наблюдения АКО при проведении селекции, что позволяет говорить о множестве операционных ситуаций Ω как о счетном и конечном.

Каждой операционной ситуации $\hat{\omega}_{rk}$ может быть поставлена в соответствие оптико-геометрическая структура АКО $\hat{\text{L}}^{\text{Ц}(r)}_{\langle 3\rangle}(\lambda)$, определяемая его функциональным назначением и условиями освещения, и не зависящая от выбора подлетной траектории $d\hat{Y}_{\langle 3\rangle}(t)$, а также согласно (2), спектральная сила излучения АКО $\hat{I}^{\text{Ц}}_{rk}(\lambda)$.

В общем случае для одной ситуации $\hat{\omega}_{rk}$ в различные моменты времени (при одинаковом расположении источников излучения относительно АКО и КАИ, но относящейся к различному времени t_0) оптико-геометрическая структура $\hat{\text{L}}^{\text{Ц}(r)}_{\langle 3\rangle}(\lambda)$, будет различной вследствие протекания на поверхности КАЦ непериодических процессов, обусловленных деградационными свойствами покрытий АКО. Наличие таких процессов не позволяет с достаточной степенью корректности обосновать конечность множества операционных ситуаций (ограниченность времени активного функционирования АКО лишь в некоторой степени может выступать в качестве такого обоснования) [3], что требует дополнительного использования каких-либо искусственных приемов. Например, большая длительность протекания деградационных процессов может служить основанием для принятия характеристик покрытий АКО постоянными во времени.

При формировании множества Ω существенную роль играют особенности конструктивного исполнения ОЭС, определяющие критические области расположения источников излучения в его приборной системе координат. Направления на p источников излучения в этой системе координат могут быть определены исходя из известных элементов $\hat{R}^{\text{Ц}(k)}_{\langle 3\rangle}$ и $\hat{F}^{(r)}_{\langle p\rangle}$ для любой операционной ситуации $\hat{\omega}_{rk}$ и в случае попадания одного из источников излучения в соответствующую ему критическую область данная операционная ситуация может не рассматриваться.

Задание универсума Ω (множества элементарных событий) формально позволяет поставить в соответствие каждой операционной ситуации $\hat{\omega}_{rk}$ вероятность P_{rk} ее выбора из исходного множества при случайном задании времени селекции $t_0 \in [0, \infty)$. Однако, в силу того, что выбранному наугад времени t_0 может соответствовать несколько операционных ситуаций $\hat{\omega}_{rk}$, каждая из которых определяется подлетной траекторией $d\hat{Y}^{(k)}_{\langle 3\rangle}(t)$ выбор $\hat{\omega}_{rk}$ не является в полном смысле случайным. Обусловлено это наличием отношения предпочтения $R^{(r)}$, задаваемого на множестве подлетных траекторий $D_{\{S_R\}}$ для имеющихся условий освещения $\left\langle \hat{F}^{(r)}_{\langle p\rangle}, \hat{E}^{(r)}_{\langle p\rangle}(\lambda) \right\rangle$. Задание такого отношения является нетривиальной научной задачей, так как помимо спектрально-энергетических селективных признаков при селекции АКО могут использоваться и другие признаки, информативность которых также зависит от выбора подлетной траектории [2]. Помимо этого, необходимость обеспечения скрытности перехвата, а также ограниченные энергетические возможности КАИ также могут оказать существенное влияние на ранжирование траекторий, что требует использования системных методов при решении данной задачи.

Указанные замечания обусловливают сложность использования только вероятностного подхода при описании конкретной операционной ситуации, выбор которой определяется, с одной стороны, чисто случайным выбором времени применения КАИ t_0, а с другой – выбором одной из наиболее предпочтительных подлетных траекторий $d\hat{Y}^{(k)}_{\langle 3\rangle}(t)$, удовлетворяющей некоторому комплексному критерию. В этом случае целесообразно ввести нечеткое описание процесса выбора траектории КАИ и поставить в соответствие каждой подлетной траектории $d\hat{Y}^{(k)}_{\langle 3\rangle}(t)$ значение некоторой функции μ_{rk}, область значений которой ограничена интервалом [0, 1]. Тогда при фиксированном r имеющееся отношение предпочтения $R^{(r)}$ может быть заменено от-

ношением порядка, а «вероятность» выбора операционной ситуации P_{rk} из исходного множества будет определяться выражением $p_{rk} = b_r \cdot \mu_{rk}$ где b_r определяется из условия нормировки $\sum_k p_{rk} = p_r$. В последнем выражении p_r – вероятность появления r-й фотометрической ситуации $\left\langle \hat{F}^{(r)}_{\langle p \rangle}, \hat{E}^{(r)}_{\langle p \rangle}(\lambda) \right\rangle$, а кавычки в предыдущем предложении обусловлены семантической неточностью заключенного в них обозначения, однако необходимого в данном случае в силу того, что величина P_{rk} должна удовлетворять аксиоматике вероятностной меры.

Выводы

Таким образом, функционирование ОЭС селекции АКО протекает в условиях, которые невозможно задать в полной мере заранее, что обусловливает применение теоретико-множественного подхода к описанию процесса селекции АКО, заключающегося в построении для каждого q-го АКО конечного множества операционных ситуаций Ω^q и введении на этом множестве некоторого отношения (меры), ставящего в соответствие каждой ситуации вероятность ее выбора из исходного множества при случайном задании времени селекции t_0.

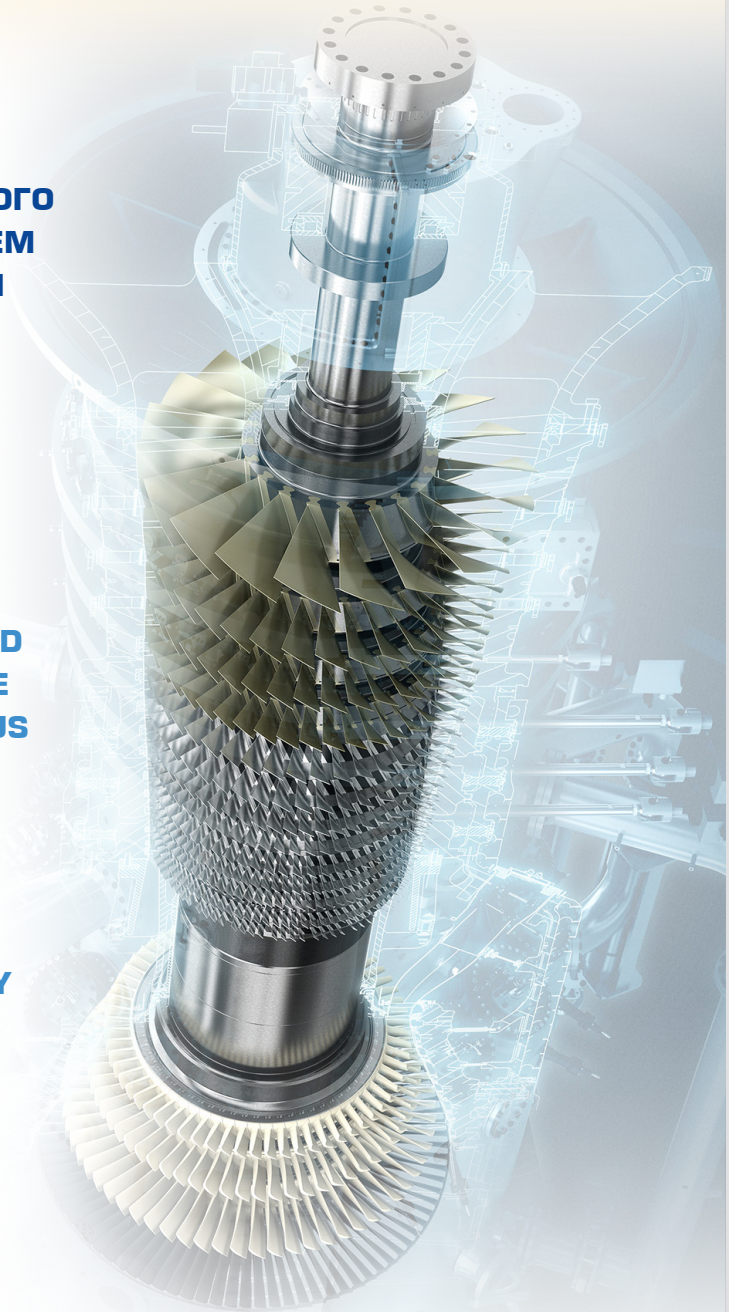
Литература

1. Казаков Р.Р. Прикладная оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / Р.Р. Казаков, Д.Л. Колыгин, И.А. Трофимов. Электрон. текстовые дан. (34.3 Мб). СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2021. 1 электрон, опт. диск (CD-ROM).
2. Казаков Р.Р. Программный комплекс по определению параметров звезд оптико-электронными приборами космических аппаратов / Р.Р. Казаков, Т.Н. Альдебергенов, В.Л. Захаров, Д.В. Смирнов // Известия Института инженерной физики», 2022. №1(63). С. 27-30.
3. Казаков Р.Р., Мингалиев Э.Р. Анализ влияния космического мусора на безопасность космических полетов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, 2015. №3(127). С.77-87.

УДК 621.316

МОДЕЛЬ ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ТОКОМ ДЛЯ ДИЗЕЛЬ–ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АГРЕГАТА С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

A MODEL FOR A TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A SYNCHRONOUS GENERATOR WITH PULSATING CURRENT EXCITATION FOR A DIESEL–ELECTRIC UNIT WITH A VARIABLE SPEED OF AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM FOR SPECIAL MILITARY COMPLEXES



Александр Владимирович Николаев
кандидат технических наук
доцент кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого
(г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (4967) 72-19-11.
E-mail: nikolaev_357@mail.ru

Аннотация

В статье предложена модель синхронного генератора дизель-электрического агрегата системы автономного электроснабжения специальных комплексов военного назначения, отличительной особенностью которой является возможность функционировать с заданным показателем качества электрической энергии в переходных процессах, когда приводной дизель работает в близком к холостому ходу режиме, с целью топливной экономичности, за счет возбуждения генератора пульсирующим током.

Ключевые слова: синхронный генератор, дизель-электрический агрегат, возбуждение генератора, математическая модель.

Summary

The article proposes a model of a synchronous generator of a diesel-electric unit of an autonomous power supply system for special military complexes, a distinctive feature of which is the ability to function with a given indicator of the quality of electrical energy in transients when the drive diesel operates in a near-idle mode, for the purpose of fuel efficiency, due to the excitation of the generator with a pulsating current.

Keywords: synchronous generator, diesel-electric unit, generator excitation, mathematical model.

Основное отличие синхронного генератора (СГ) с возбуждением пульсирующим током в том, что позволяет эксплуатировать приводной двигатель дизель-электрического агрегата (ДЭА) в широком диапазоне изменения скорости вращения с целью топливной экономичности, и обеспечить требуемое выходное напряжение в переходных режимах. Обеспечение требуемого качества выходного напряжения возможно за счет увеличения скорости изменения магнитного потока, создаваемого пульсирующим током возбуждения, позволяющего более чем в два раза увеличивать индуцируемым им в статорных обмотках ЭДС.

Постоянная составляющая тока возбуждения I_B имеет прежний характер и складывается из тока возбуждения холостого хода и тока возбуждения, формируемого системой фазового компаундирования и корректором напряжения. В эксплуатируемом СГ применяется параллельный способ возбуждения. В таком генераторе обмотка возбуждения через систему фазового компаундирования присоединена к обмоткам статора параллельно нагрузке. В таких конструкциях синхронных машин используется принцип самовозбуждения, при котором обмотка возбуждения питается непосредственно от самого генератора. Условием самовозбуждения является остаточный магнитный поток основных полюсов ротора $\Phi_{ост}$. При вращении ротора в его обмотке потоком $\Phi_{ост}$ индуцируется остаточная ЭДС $E_{ост}$, и по обмотке возбуждения начинает протекать ток. С увеличением скорости вращения ротора, увеличивается и магнитный поток, увеличивая ток возбуждения, достигая значения тока возбуждения холостого хода $I_B=I'_B$, зависящего от скорости вращения ротора и сопротивления обмотки возбуждения.

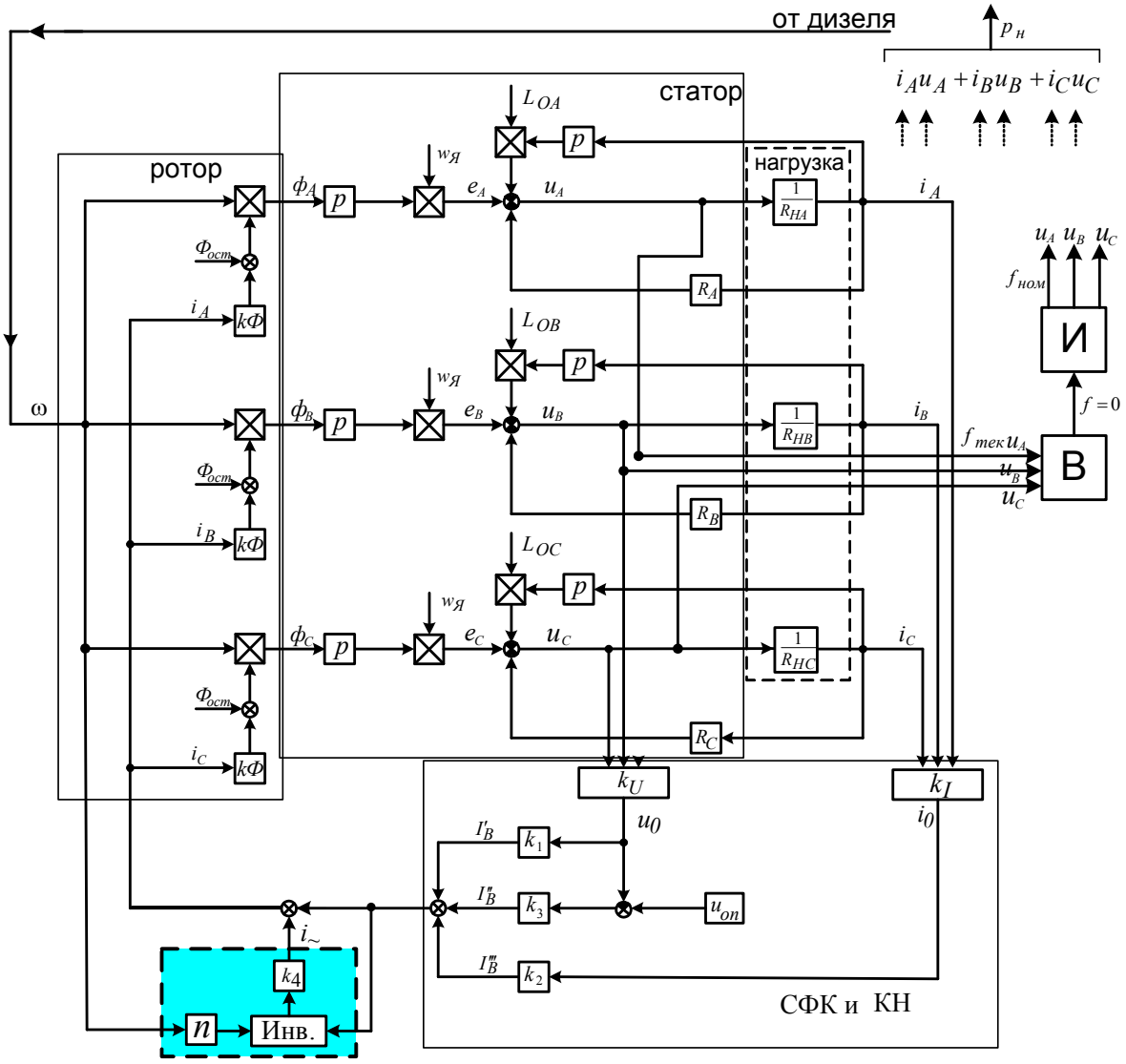


Рис. 1. Структурная схема математической модели генератора с возбуждением пульсирующим током

При появлении нагрузки система фазового компаундирования совместно с корректором напряжения, формируют ток возбуждения $I_{BH}=I''_B+I'''_B$, зависящий от характера нагрузки [1].

Результирующий ток возбуждения I_B на номинальной нагрузке создает магнитный поток и ЭДС такой величины, чтобы не было режима насыщения магнитной системы. Такие испытания и разработки ведутся на заводах – изготовителях электрических машин.

Таким образом, постоянная составляющая тока возбуждения I_B СГ с возбуждением пульсирующим током, аналогично формируется как в эксплуатируемых СГ и записывается в виде функции нескольких переменных

$$\left.\begin{aligned} I'_B &= k_U k_1\left(|e_A-e_B|+|e_B-e_C|+|e_C-e_A|\right)\\ I''_B &= k_I k_2\left(|i_A-i_B|+|i_B-i_C|+|i_C-i_A|\right)\end{aligned}\right\},$$

где k_U и k_I – коэффициенты по напряжению и току, трансформации и сопротивления обмотки возбуждения;

k_1, k_2 – коэффициенты усиления.

Переменная составляющая тока возбуждения реализуется управляемым инвертором, например, на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором обладающих высоким КПД и надежностью, которые формируют амплитуду составляющей в k меньше амплитуды постоянной составляющей и частоту в n раз больше частоты вращения ротора.

Таким образом, СГ с возбуждением пульсирующим током в установившемся режиме и в переходных процессах описываются следующей системой уравнений [2]:

- для цепи ротора

$$i_B=\left[k_U k_1\left(|e_A-e_B|+|e_B-e_C|+|e_C-e_A|\right)+k_I k_2\left(|i_A-i_B|+|i_B-i_C|+|i_C-i_A|\right)+\right.$$
$$\left.+k_3\left(k_U\left(|u_A-u_B|+|u_B-u_C|+|u_C-u_A|\right)-U_{on}\right)\right]\left(1-k_4\sin(n\omega t-\psi_\phi)\right).$$

- для цепи статора

$$\left.\begin{aligned} u_A &= e_A - L_{0A}\frac{di_A}{dt};\\ u_B &= e_B - L_{0B}\frac{di_B}{dt};\\ u_C &= e_B - L_{0C}\frac{di_C}{dt},\end{aligned}\right\},$$

где мгновенные значения ЭДС для каждой фазы имеет вид

$$e_{A,B,C}=w_Я\Phi_0\omega\left[\sin(\omega t-\psi_{A,B,C})+\right.$$
$$+\frac{k_4}{2}(\cos(\omega t(1-n)-\psi_{A,B,C})-\cos(\omega t(1+n)-\psi_{A,B,C})-$$
$$\left.-\frac{nk_4}{2}(\cos(\omega t(1-n)-\psi_{A,B,C})+\cos(\omega t(1+n)-\psi_{A,B,C})\right].$$

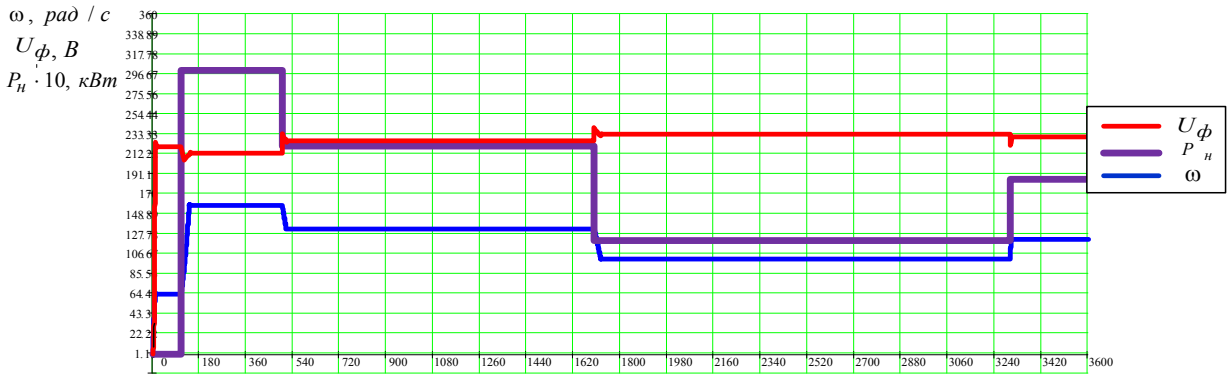


Рис. 2. Моделирование процессов функционирования в дизель-генераторе с регулируемой частотой вращения

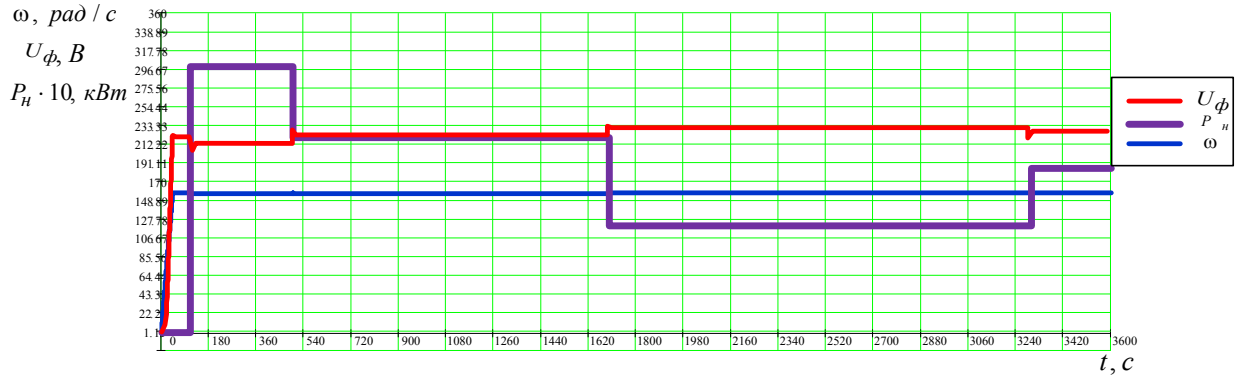


Рис. 3. Моделирование процессов функционирования в дизель-генераторе с постоянной частотой вращения

Мгновенное значение фазных токов в обмотках статора выражается аналогично существующему СГ.

Закон изменения скорости вращательного движения ротора ω в зависимости от мощности нагрузки P_H, обеспечивающий минимальный удельный расход топлива g_e, выражается зависимостью $\omega=f(g_e,P_H)$.

Таким образом, полная математическая модель СГ с системой возбуждения пульсирующим током, в виде функциональных зависимостей (с целью сокращения количества уравнений) имеет вид

$$\left.\begin{aligned}
\omega &= f(g_e,P_H)\\
P_H &= f(i_\phi,R_H,k_I,\psi_\phi)\\
i_B &= f(k_U,k_I,k_4,n,e_\phi,i_\phi,\psi_\phi)\\
e_\phi &= f(\Phi_0,\omega,k_4,n,\psi_\phi)\\
\Phi_\phi &= f(\Phi_0,\omega,i_B,\psi_\phi)\\
u_\phi &= f(e_\phi,L_{0\phi},i_\phi,\psi_\phi)\\
i_\phi &= f(u_\phi,R_H,\psi_\phi)
\end{aligned}\right\}.$$

Структурная схема математической модели СГ с возбуждением пульсирующим током представлена на *рисунке 1*, где выделенный элемент отличает разработанную модель СГ от существующей.

Таким образом, получена математическая модель СГ с возбуждением пульсирующим током в установившемся режиме, позволяющая стабилизировать мгновенное значение выходного фазного напряжения, при переменной частоте вращения ротора, в зависимости от мощности нагрузки.

Одним из основным показателей качества электрической энергии является отклонение выходного напряжения δU [3]

$$\delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100, \%$$

где U – действительное значение напряжения, В; $U_{ном}$ – номинальное значение напряжения, В.

Поэтому при моделировании, с точки зрения наглядности, удобно пользоваться не мгновенными и комплексными значениями, а действующими, которые выражаются

$$U_\phi = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u_\phi^2 dt}\ .$$

На основе математических моделей эксплуатируемой и разработанной СГ с регулируемой частотой вращения, проведем моделирование процессов функционирования ДГ (*рисунки 2* и *3*).

В соответствие с *рисунками 2* и *3*, значения действующих значений фазного напряжения для ДЭА с постоянной и регулируемой частотой вращения, представлены в *таблице 1*.

Данные таблицы демонстрируют допустимые отклонения действующего значения выходного фазного напряжения не более 5%.

Литература

1. Боровиков Ю.С. Автоматика энергосистем. Учебное пособие / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, М.В. Андреев, А.О. Сулайманов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 196 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2004. 606 с.
3. Войцеховский И.А. Основы конструкции и эксплуатации ракетного комплекса 15П155М1. Часть 7. Системы электроснабжения агрегатов и сооружений. Учебное пособие / И.А. Войцеховский, А.Ю. Куликов, О.Ю. Иващенко. М.: РВСН, 2016. 110 с.

Таблица 1

Минимальные и максимальные значения отклонения выходного напряжения

Показатель	ДЭА (*ω=const*)	ДЭА (*ω=var*)
$U_{\phi min}$, В	211.3	209.4
$U_{\phi max}$, В	227.8	230.6
δU_{min}, %	3.95	4.82
δU_{max}, %	3.54	4.82

УДК 53.023; 53.06; 781.1

ПЕРСПЕКТИВА ПОИСКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭФФЕКТОВ В УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УТРАИВАЮЩИХСЯ ПЕРИОДОВ

THE PROSPECT OF SEARCHING FOR RELATIVISTIC EFFECTS IN THE UNIVERSAL PERIOD TRIPLING SYSTEM

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

Дмитрий Александрович Шарпан
аспирант
Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
E-mail: dima, sharpan@yandex.ru

Вадим Николаевич Лесных
младший научный сотрудник
Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
E-mail: 1253vadim@mail.ru

Аннотация

Как и в любом физическом явлении, в универсальной системе утраивающихся периодов (в УСУП) должны при соответствующих условиях наблюдаться релятивистские эффекты. Периоды УСУП экспериментально определены с большой точностью: в эмпирической константе формулы Петца период $T_{0;0}$=114.572218767559 лет – число с 15-ю значащими цифрами. Эта точность обусловлена, по-видимому, экспоненциальным характером формулы $T_{k;m}=T_{0;0}\times(3^k/2^m)$, связывающей экспериментально измеряемые в различных масштабах времени периоды УСУП с целочисленными параметрами k и m и размерной константой $T_{0;0}$. Для сравнения: например, чтобы скомпенсировать релятивистский сдвиг, обусловленный как движением спутника относительно наземного приемника, так и разностью гравитационных потенциалов в окрестности спутника и приемника на поверхности Земли частота 10.23 МГц атомных часов GPS сдвинута к 13-значному значению 10.22999999543 МГц. Имея на руках лицензию на космическую деятельность, мы уже начинаем планировать экспериментальное отслеживание релятивистских эффектов в феномене УСУП.

Ключевые слова: утроение периода, универсальная система утраивающихся периодов, мониторинг частоты, темпоральный фрактал.

Summary

As in any physical phenomenon, relativistic effects should be observed in the universal system of tripling periods (in the UPTS) under appropriate conditions. The UPTS periods are experimentally determined with great accuracy: in the empirical constant of the Puetz formula, the period $T_{0;0}$=114.572218767559 years is a number with 15 significant digits. This accuracy seems to be due to the exponential character of the formula $T_{k;m}=T_{0;0}\times(3^k/2^m)$, which connects the UPTS periods experimentally measured at different time scales with the integer parameters k and m and the dimensional constant $T_{0;0}$. For comparison: for example, in order to compensate for the relativistic shift caused by both the movement of the satellite relative to the ground receiver and the difference in gravitational potentials in the vicinity both of the satellite and of the receiver on the Earth's surface, the frequency of 10.23 MHz of the GPS atomic clock is shifted to a 13-digit value of 10.22999999543 MHz. With a license for space activities in our hands, we are already beginning to plan experimental tracking of relativistic effects in the UPTS phenomenon.

Keywords: period tripling, universal period tripling system, frequency monitoring, temporal fractal.

Введение

В широчайшем диапазоне периодов, по крайней мере, от 10^{-15} сек до окрестности миллиарда лет наблюдается т.н. универсальная система утраивающихся периодов (УСУП). Сначала она была выявлена различными исследователями в астрономических, геофизических и биологических эволюционных явлениях, затем в особенностях памяти и слуха человека, далее в технических устройствах, таких, как, например, про-

цессор современного компьютера и, наконец, она проявилась в настройках зрения человека и животных. Беспрецедентную мультимасштабность УСУП можно принять за свидетельство функционирования как всех перечисленных, так и множества других объектов на фоне вселенского, как его назвали в статье [1], «темпорального фрактала». Этот вывод легко проверить, наблюдая за работой различных устройств, способных функционировать в широком диапазоне масштабов времени [2-6]. Периоды «темпорального фрактала» составляют дискретный спектр $T_{k;m}=T_{0;0}\times(3^k/2^m)$, где $T_{0;0}=114.572218767559$ лет, а целочисленные параметры k и m – небольшие целые числа [6-10]. След существования этого фрактала проявляется в форме УСУП. Удобной математической моделью универсальной системы утраивающихся периодов оказался треугольник Серпинского [11]. Для наглядности эксперимента мы выбрали релаксационные генераторы электрических колебаний, работающие в удобной для визуального контроля области периодов около 1 сек [12-16]. В ряде релаксационных генераторов этот диапазон сканировался за счет медленного изменения напряжения в источнике питания генератора, в других случаях сканирование достигалось программируемым через цифро-аналоговый преобразователь изменением напряжения, управляющего частотой генератора. В ходе сканирования не только про-

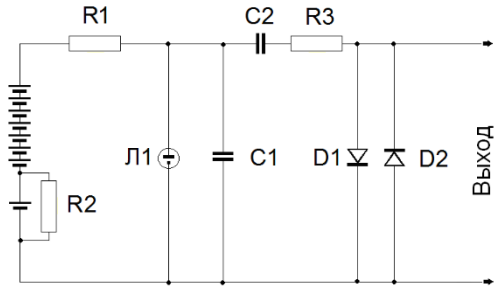


Рис. 1а. Принципиальная схема релаксационного генератора затягивающихся колебаний, основанного на разрядах конденсатора C1 через неоновую лампу Л1. Сканирование широкого диапазона периодов осуществляется за счет шунтирования резистором R2 одного из элементов питания, т.е. изменением питания всей схемы

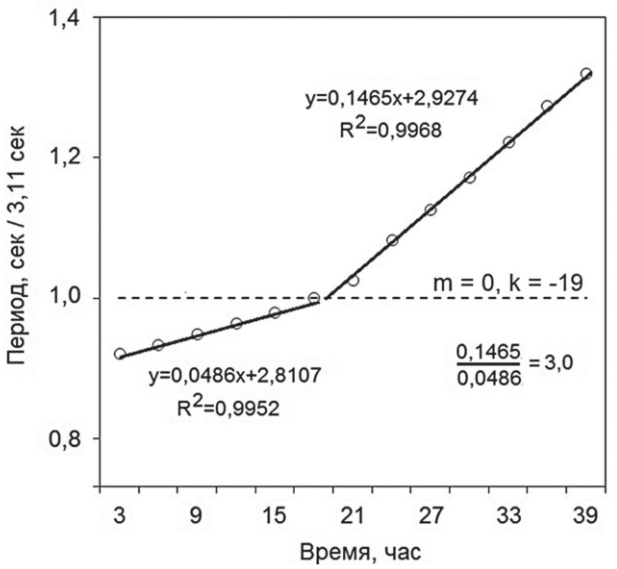


Рис. 1б. Пример резкого изменения скорости прироста длительности интервалов между вспышками неоновой лампы в генераторе затягивающихся релаксационных колебаний (*рисунок 1а*) при пересечении периода УСУП $T_{k;m}$=3.11 сек (k=-19, m=0). В данном примере интервал времени между соседними точками составляет три часа, каждая точка – это среднее арифметическое, вычисленное по 360 последовательным циклам полуминутных измерений периода. Масштаб времени по горизонтальной оси линейный. Линии регрессии проведены посредством программы Excel. Видно, что при пересечении периода УСУП производная увеличилась ровно в 3 раза [11]

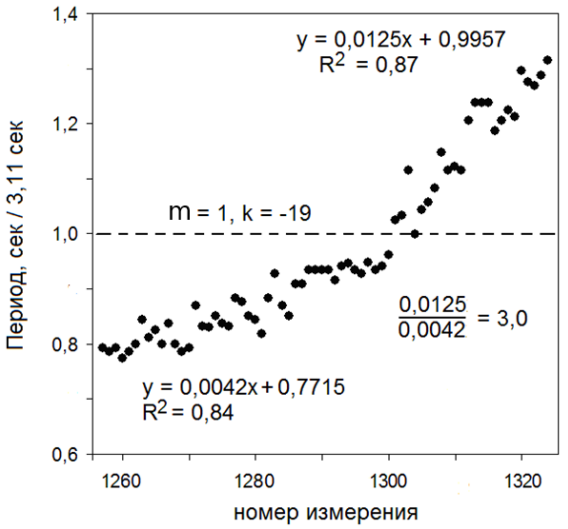


Рис. 1в. Утроение темпа вспышек лампы в генераторе релаксационных колебаний на неоновой лампе при пересечении периода УСУП $T_{-19;0}$=3.11 сек. Интервал времени между соседними измерениями в данном примере составляет половину минуты

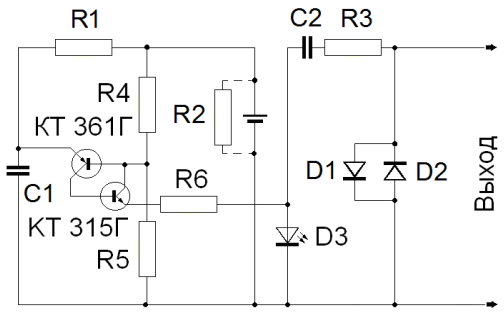


Рис. 2а. Принципиальная схема релаксационного генератора на тиристоре, реализованном посредством транзисторов КТ315Г и КТ361Г. Сканирование диапазона периодов обеспечивается наличием шунтирующего резистора R2. Светодиодом D3 обеспечивается визуальный контроль выполнения эксперимента

явились ожидаемые периоды УСУП, но и были выявлены характерные скачки производной, указывающий на тенденцию к дискретному изменению темпов процессов, происходящих в каждом последующем сегменте «темпорального фрактала». Интересно, что дрейфы температуры не только не мешали выявлению периодов УСУП, но даже были использованы для сканирования исследуемой области периодов: в формулу Петца, определяющей периоды, входят только вышеперечисленные константы. Целью данного этапа работы стал как сбор экспериментального материала для дальнейшей работы с ним, так и перспективное развитие техники эксперимента. В частности, это изучение возможности адаптации используемой измерительной установки к работе на орбите в условиях повышенного радиоактивного фона.

Методы измерений и результаты измерений

Ниже в сериях *рисунков 1-3* приведены примеры результатов мониторинга изменяющегося периода в различных генераторах релаксационных колебаний. Выход генератора подключался к линейному входу звуковой карты компьютера и обрабатывался специально созданной программой.

На *рисунке 1б* показан пример резкого изменения скорости прироста длительности интервалов между вспышками неоновой лампы в генераторе затягивающихся релаксационных колебаний (*рисунок 1а*) при пересечении периода УСУП $T_{k;m}$=3.11 сек (k=-19, m=0). Теоретическое

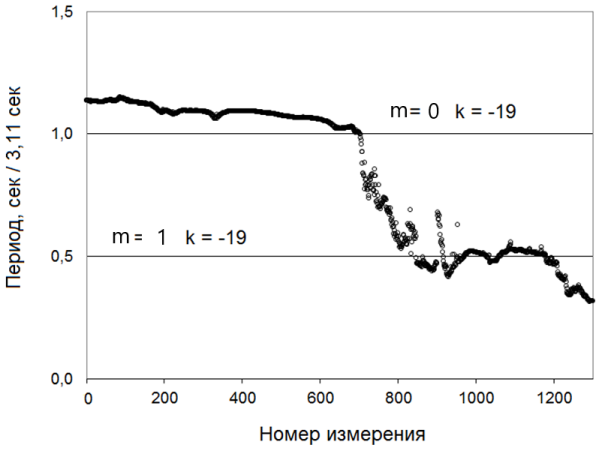


Рис. 2б. Уровни $T_{-19,0}$ и $T_{-19,1}$ в опыте на релаксационном генераторе, основанном на тиристоре, реализованном посредством транзисторов КТ315Г и КТ361Г

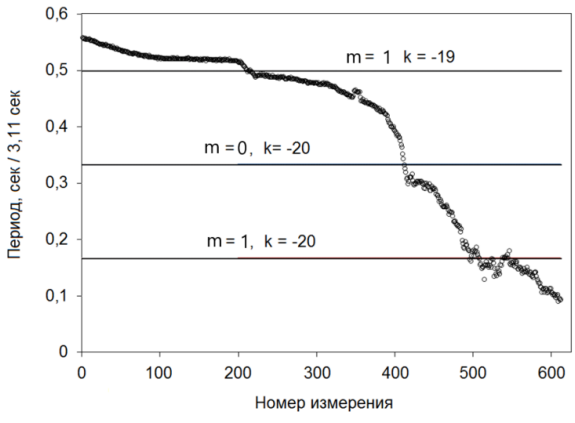


Рис. 2в. Уровни УСУП $T_{-19;1}$, $T_{-20;0}$ и $T_{-20;1}$, обнаруженные в опыте с релаксационным генератором на тиристоре

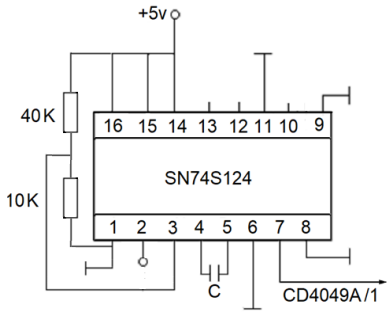


Рис. 3а. Генератор периодических колебаний на микросхеме КР531ГГ1 (аналоге микросхемы *SN74S124*). Чтобы начальный период генератора попадал в окрестность периода $T_{-20,0}$=1.037 сек, ёмкость С должна находиться в окрестности 400 *μF*. Сканирование периода осуществляется программируемым изменением потенциала на КР531ГГ1/2 (т.е. на 2-й ножке этой микросхемы). Перед подачей на вход звуковой карты меандр с выхода КР531ГГ1 подается на усилитель К561ЛН2 (аналог микросхемы CD4049*A*) и дальше на дифференцирующую цепочку, конденсатор которой не пропускает постоянную составляющую меандра, т.е. не нагружает вход звуковой карты

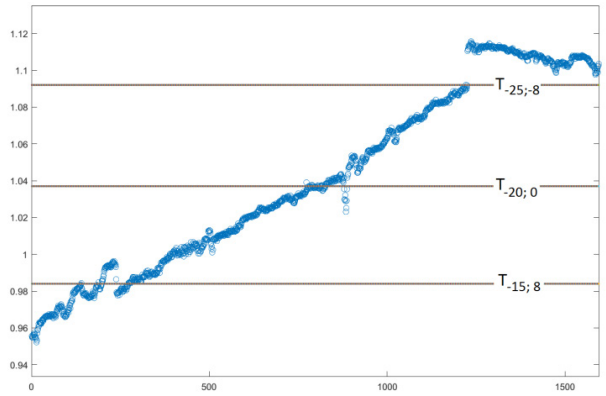


Рис. 3б. Изменения скорости прироста средней длительности периода при сканировании области периодов $T_{k;m}$ в широкой окрестности периода 1.037 сек (k=-20, m=0) в генераторе затягивающихся релаксационных колебаний, основанном на микросхеме КР531ГГ1. Интервал времени между соседними точками графика составляет 20 минут, каждая точка на *рисунке* – среднее арифметическое, вычисленное по 120 последовательным циклам десятисекундных измерений и усреднения околосекундного периода. При пересечении периода УСУП с m=0 тангенс угла наклона (как соотношения катетов соответствующих треугольников) прирос на 1/3 (от 61/125 до 63/97), т.е. производная по времени увеличилась скачком приблизительно в 1.33 раза [12]

значение положения этого уровня определяется по формуле Петца

$$T_{k;m}=114.572218767559\times(3^{-19}/2^{0}),$$ т.е.

3.110852724… сек.

Экспериментальное значение этого периода УСУП вычисляется как ордината точки пересечения двух аппроксимирующих прямых на *рисунке 1б*:

$y=0.1465x+2.9274$ и $y=0.0486x+2.8107$.

Точно так же анализируется система двух прямых на *рисунке 1в*:

$y=0.0125x+0.9957$ и $y=0.0042x+0.7715$.

На *рисунке 3б* отчетливо видны линейные участки, простирающиеся между моментами пересечения уровней страты УСУП. В частности, после пересечения уровня с $m=0$ наклон линии возрос приблизительно на 1/3.

Обсуждение результатов, а также перспектива исследований УСУП

На *рисунке 4* представлена картина т.н. страты УСУП. Соседние страты имеют периоды, отличающиеся ровно втрое. Таким образом, *рисунок 4* дает полное представление о спектре УСУП.

В генераторе, изображенном на *рисунке 3а*, отказано от использования микропроцессора, его заменяет аккумулятор (*рисунок 5а*), зашунтированный резистором с большим сопротивлением.

Упрощенная установка с генератором другого типа (*рисунок 5б*) может использоваться при выполнении орбитального эксперимента. В качестве процессора компьютера в экспериментах на МКС рекомендуется Intel 386, построенный еще по 90 нанометровому техпроцессу. Этот процессор, с одной стороны уже достаточно мощный, а с другой стороны еще оказывается достаточно неуязвимой мишенью при прохождении заряженных космических частиц через процессор; при этом он использует DOS. Однако, в последнее время на МКС появилось множество (около 80 шт.) ноутбуков. В основном это ноутбуки *Lenovo Thinkpad T61P*, главной особенностью которых оказалась надежность. Перед выпуском в продажу эти компьютеры проходят более 200 тестов, в том числе на вибростойкость, на падения, на испытания жарой и холодом. Их ударяют током через клавиатуру и через все разъемы, оставляют под электромагнитным излучением, и чтобы проверить прочность конструкции давят на край экрана с помощью специального пресса. На этих ноутбуках работают процессоры *Intel Core Duo* и ставится до 4 Гб ОЗУ. К ноутбуку прилагается адаптер для питания от бортовой сети МКС в 28 вольт по-

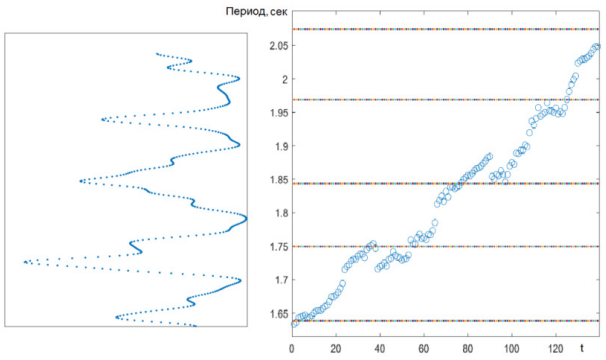


Рис. 3в. При попытках монотонного сканирования системы утраивающихся периодов (рисунок справа) в генераторе релаксационных колебаний можно наблюдать квазипериодичность распределения числа экспериментальных точек (рисунок слева; сглажено для подавления шума). Эта квазипериодичность отражает тяготение периода генератора к дискретным уровням УСУП. Однако, на *рисунке 3б* наблюдалась противоположная тенденция, т.е. период генератора тяготел к избеганию дискретных уровней УСУП

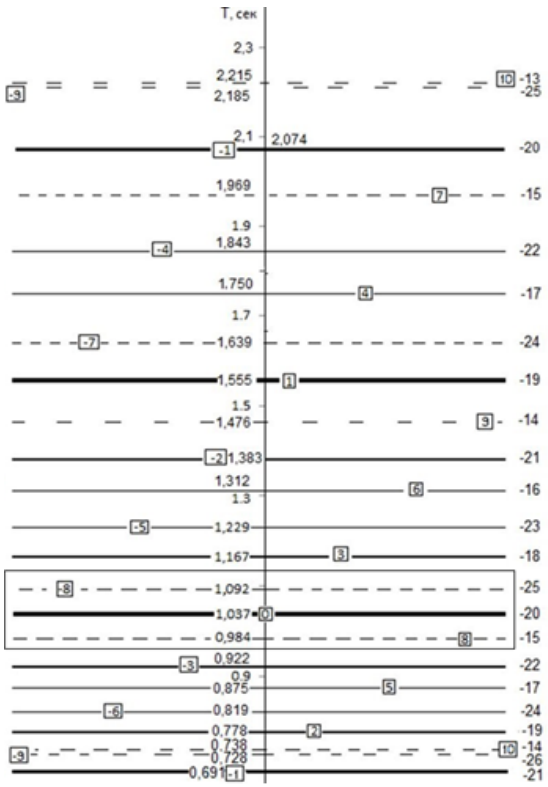


Рис. 4. Спектр периодов на примере страты с параметром *k*, равном -20: это достаточно значимые уровни УСУП, попавшие в окрестность периода 1 сек. На вертикальной оси отложены численные значения периодов УСУП, горизонтальная ось играет вспомогательную роль: периоды изображены здесь как горизонтальные «струны», толщина которых отвечает вероятности наблюдения этих периодов. Числа в квадратиках у каждой из «струн» показывают значения параметра *m* формулы Петца: вероятность обнаружить уровень $T_{k,m}$ заметно падает с ростом параметра *m*. Числа в колонке справа показывают номера страт, к которым принадлежали эти уровни при $m=0$. В широкую рамку в окрестности периода 1 сек вошли периоды, отметившиеся на *рисунке 3б*

стоянного тока. На ноутбуках установлен *Linux* и работает Матлаб; последнее важно, поскольку хорошо показавшая себя в наших экспериментах высокоспециализированная программа, обрабатывающая сигнал, поступающий на звуковую карту из генератора, написана на Матлабе.

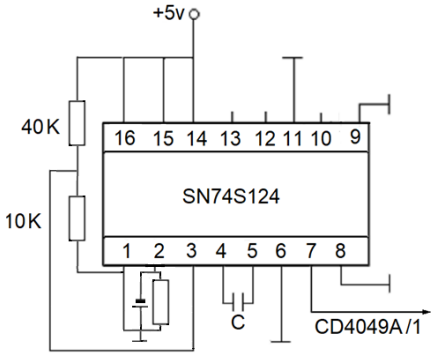


Рис. 5а. Упрощенный вариант установки, где однонаправленное сканирование периодов происходит за счет изменения напряжения на КР531ГГ1/2 при медленном разряде зашунтированного аккумулятора

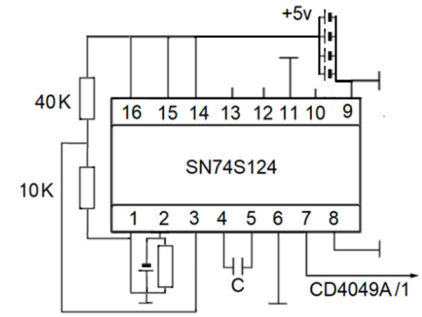


Рис. 5б. Предварительный вариант ядра еще более упрощенной установки, где не только сканирование широкого диапазона периодов происходит за счет аккумулятора, но микросхемы генератора питаются тоже от аккумуляторов

Вывод

После проведения соответствующих экспериментов и уточнения теоретических оценок, возникающих в контексте ориентации на подготовку к орбитальному эксперименту, мы сможем лучше оценить объем предстоящих работ, вопрос об их финансировании и пр. Выше показано, что в настоящий момент всё это выглядит сложным, но решаемым комплексом проблем.

Литература

1. S.J. Puetz, A. Prokoph, G. Borchardt et al, Chaos, Solitons & Fractals 62-63, 55 (2014).
2. Muller H. Fractal scaling models of resonant oscillations in chain systems of harmonic oscillators. Progress in physics. (2009) iss. 2. Pp.72-76.
3. Аршинов В.И., Буданов В.Г. / В сб. Самоорганизация и наука: опыт философского осмысления. Арго, ИФ РАН, 1994. 349 с.
4. Буданов В.Г. Синергетика ритмокаскадов в эволюционирующих системах. Труды юбилейной сессии РАЕН «Леонардо да Винчи XX века. К 100-летию А.Л. Чижевского». 27-28 февраля 1997. Москва. С.34-35.
5. Кулинкович А.Е. В кн. Вернадскианская революция в системе научного мировоззрения – поиск ноосферной модели будущего человечества в XXI веке. Коллективная монография под науч. ред. Субетто А.И. СПб.: Астерион, 2003. 352 с.
6. Буданов В.Г. Самоорганизация времени: эволюция партитуры / В сб. Синергетика времени. Под ред. Аршинова В.И. М., 2007. С. 46-72.
7. Puetz S.J. The Unified Cycle Theory: How Cycles Dominate the Structure of the Universe and Influence Life on Earth (2009). Outskirts Press, Denver, Colorado.
8. Puetz S.J. Unified Cycle Theory: Introduction & Data. (2010) Proceedings of the NPA, Long Beach 2010 Annual Conference.
9. Puetz S. J., Borchardt G. Quasi-periodic fractal patterns in geomagnetic reversals, geological activity, and astronomical events. Chaos Solitons & Fractals 81. Pp. 246-270 (2015).
10. Puetz S.J. Prokoph A., Borchardt G. Evaluating alternatives to the Milankovitch theory. Journal of Statistical Planning and Inference. 170, March 2016. Pp.158-165
11. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Бондарь А.Т. Треугольник Серпинского как удобная математическая модель для описания универсальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2018 №1(47). С. 63-68.
12. Коломбет В.А., Платонов А.О., Лесных В.Н. Мониторинг периода мультивибратора как способ изучения универсальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2022. №4(66). С. 13-19.
13. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // Биофизика, 2015. №60(6). С.1208.
14. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Федоров М.В. Обнаружение в технических устройствах фрактальной системы утраивающихся периодов, известной по своим физическим, геофизическим, биофизическим и биологическим манифестациям // Биофизика, 2016. №61(3). С. 615.
15. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В., Коломбет Е.В., Федоров М.В., Шноль С.Э. Экспериментальный подход к исследованию универсальной системы утраивающихся периодов // Биофизика, 2019. №64(2). С. 396.
16. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Шноль С.Э. Выявление дискретных состояний универсальной системы утраивающихся периодов при варьировании частоты генератора периодических колебаний // Биофизика, 2019. №64(6). С. 1163.

УДК 621.391

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИМИТОЗАЩИЩЕННОСТИ ПЕРЕДАВАЕМЫХ СООБЩЕНИЙ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ

STATISTICAL EVALUATION OF IMITATION PROTECTION OF TRANSMITTED MESSAGES BY STEGANOGRAPHIC METHODS IN RADIO COMMUNICATION SYSTEMS

Владимир Владимирович Зеленевский
почетный 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 Зеленевский
доктор технических наук, доцент
научный сотрудник
ВА РВСН им. Петра Великого
Адрес: 143900, Московская обл.,
г Балашиха, ул. Карбышева, д.8
Тел.: +7 (903) 721-12-61
E-mail: sys1434@mail.ru

Александр Владимирович Попов
адъюнкт кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (4967) 72-19-11

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

Александр Евгеньевич Панин
аспирант
АНО «Институт инженерной физики»
Адрес:142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

Аннотация

Решена задача повышения имитозащищенности канала передачи данных в системе радиосвязи с стеганографической защитой сообщений. Предложена структурная схема системы передачи с корректирующим кодированием данных и их кодовым уплотнением, которая реализует стеганографическую защиту сообщений. Получено новое аналитическое выражение для оценки вероятности подделки стеганоконтейнера сообщения, которое в отличие от известных, учитывает параметры корректирующего кода, стеганоконтейнера на основе ортогональных последовательностей Уолша-Адамара, условные вероятности имитации двоичных символов постановщиком имитирующих помех.

Ключевые слова: имитозащищенность, стеганоконтейнер, ортогональные последовательности Уолша-Адамара, корректирующее кодирование, кодовое уплотнение данных, частотный модем, вероятность подделки кодовой комбинации, условная вероятность имитации двоичных символов, имитирующая помеха, вероятность подделки стеганоконтейнера.

Summary

The problem of increasing the imitation security of a data transmission channel in a radio communication system with steganographic message protection has been solved. A block diagram of a transmission system with corrective data coding and their code compression, which implements steganographic message protection, is proposed. A new analytical expression has been obtained for estimating the probability of forging a message steganocontainer, which, unlike the known ones, takes into account the parameters of the correction code, the steganocontainer based on Walsh-Hadamard orthogonal sequences, and the conditional probabilities of imitation of binary symbols by the producer of simulating noise.

Keywords: imitation security, steganocontainer, orthogonal Walsh-Hadamard sequences, corrective coding, data code multiplexing, frequency modem, probability of code combination forgery, conditional probability of imitation of binary symbols, simulating noise, probability of steganocontainer forgery.

Решение задач по защите передаваемых данных от несанкционированного доступа в системах радиосвязи определяет скрытность и разведзащищенность информационного обмена. Такие задачи в настоящее время решаются криптографическими и стеганографическими методами. Криптографический метод реализует шифрование данных с целью скрытия информационного смысла передаваемого сообщения и не решает полностью задачу защиты информации от стороннего (несанкционированного) наблюдателя. В частности, наличие в радиосигнале шифрованного сообщения способствует активизации действий криптоаналитиков. Скрытие факта передачи конфиденциальных сообщений по радиоканалу, в котором мощность полученного полезного сигнала P_C меньше (или соизмерима) с мощностью канальных шумов $P_Ш (P_C \le P_Ш)$, может быть обеспечено стеганографическими методами [2].

Более того, стеганографический метод энергетического и структурного скрытия информационного смысла сообщения в радиоканале связи позволяет отказаться от поэлементного приема символов данных в пользу приема сигналов в целом и тем самым обеспечить повышенную достоверность информационного обмена в условиях воздействия как непреднамеренных, так и преднамеренных помех, которые способствуют вводу в радиосистему ложных сообщений [4].

Задача борьбы с навязыванием ложных сообщений (подделки передаваемых данных) имитирующей помехой в системах радиосвязи со стеганографической защитой данных в известной научной литературе не решалась [1-3]. Так как высокая вероятность подделки передаваемых данных в радиоканале приводит к непредсказуемым последствиям, то тема предложенной научной статьи является актуальной.

Цель статьи – повышение имитозащищенности канала передачи данных в системе радиосвязи с стеганографической защитой сообщений.

Исходя из анализа известных работ [1,2], при построении радиоканалов передачи данных со стеганографической защитой сообщений должны выполнятся ряд требований:

- скрытие факта передачи сообщения для несанкционированного наблюдателя;
- обеспечение требуемой пропускной способности радиоканала (скорость передачи данных источника сообщений $R_u = const$);
- обеспечение аутентичности и целостности передаваемой конфиденциальной информации для авторизованного пользователя;
- обнаружение скрытого сообщения несанкционированным наблюдателем не должно позволить ему извлечь (декодировать) скрытое сообщение до тех пор, пока принцип формирования сигнала стеганоконтейнера сохраняется в тайне.

Методы современной компьютерной стеганографии реализуются различными путями [2]. Например, встраивание сообщения в текст, изображения, аудиосигналы, основываясь на ключевых принципах, использование сигналов с расширенным спектром (реализация режима работы радиоканала под «шум», когда разведприемник не может обнаружить факта передачи радиосигнала), использование специальных хаотических последовательностей Чебышева, которые, в отличие от известных псевдослучайных последовательностей, обладают энергетическим спектром, подобным случайному процессу.

Для эффективной постановки имитирующей помехи несанкционированный наблюдатель исследует радиоканал со стеганографической защитой как источник информации. В этом случае он вынужден оперировать статистическими свойствами стеганоконтейнера для восстановления используемого стеганоалгоритма и параметров данных (сообщения). В идеальном случае параметры стеганоконтейнера не отличаются от параметров случайных последовательностей и не содержат никакой информации для несанкционированного наблюдателя. Очевидно, чем выше непредсказуемость (энтропия) стеганоконтейнера, тем сложнее несанкционированному наблюдателю определить используемый стеганоалгоритм защиты. Известно [2], что энтропия стеганоконтейнера на регулярных псевдослучайных последовательностях равна нулю, положительна для хаотических последовательностей и бесконечна для случайных процессов.

Предлагается обеспечить повышение имитозащищенности передаваемых сообщений стеганографическим методом, в основе которого лежит корректирующее кодирование данных и их кодовое уплотнение [3, 4].

Структурная схема системы передачи данных и их кодовым уплотнением представлена на *рисунке 1*, где обозначены:

КУ – кодер канала, использующий двоичный блочный код с параметрами (n,k,d_{min}), n – длина кода, k – число информационных символов, d_{min} – минимальное кодовое расстояние;

RG_1 – регистр сдвига, преобразующий последовательный код двоичных символов в параллельный n-разрядный код;

БКУД – блок кодового уплотнения данных, формирующий на своем выходе $(n+1)$ – уровневый групповой сигнал, который содержит n двоичных символов [4];

$G_{W\text{-}A}$ – генератор ортогональных n_w-разрядных последовательностей Уолша-Адамара [4];

ЧМ – частотный модулятор, который переносит спектр группового сигнала на рабочую частоту ω канала связи, где действует имитирующая сигнал помеха $n(t)$;

ЧД – частотный демодулятор, который выделяет из принятого сигнала переданный случайный групповой сигнал;

БКРД – блок кодового разделения данных выделяет на своем выходе n-разрядный параллельный код [4];

$G^{(П)}_{W\text{-}A}$ – генератор полярных ортогональных n_w-разрядных последовательностей Уолша-Адамара [4];

RG_2 – регистр сдвига, преобразующий параллельный n-разрядный двоичный код комбинации (n,k,d_{min}) в последовательный;

Таблица 1

Влияние параметров кодирования на зависимость $P_k=f(P_0)$

Параметры кода	Зависимость $P_k=f(P_0)$						
n=16, k=5, d_{min}=8, t=3, n_w=256, M=90	P_0	0,1	0,05	0,03	0,01	0,005	0,002
	P_k	$9{,}12\cdot10^{-8}$	$2{,}064\cdot10^{-8}$	$1{,}378\cdot10^{-8}$	$1{,}253\cdot10^{-8}$	$1{,}26\cdot10^{-8}$	$1{,}25\cdot10^{-8}$
n=16, k=5, d_{min}=8, t=3, n_w=256,M=256	P_0	0,1	0,05	0,03	0,01	0,005	0,002
	P_k	0,0776	0,01749	0,01172	0,01065	0,01064	0,01063
n=32, k=16, d_{min}=8, t=3, n_w=256, M=90	P_0	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,005
	P_k	$4{,}7\cdot10^{-7}$	$8{,}68\cdot10^{-8}$	$1{,}752\cdot10^{-8}$	$4{,}33\cdot10^{-9}$	$3{,}39\cdot10^{-10}$	$2{,}5\cdot10^{-11}$
n=32, k=16, d_{min}=8, t=3, n_w=256, M=256	P_0	0,1	0,05	0,03	0,01	0,005	0,002
	P_k	0,399	0,073	0,0149	$2{,}89\cdot10^{-4}$	$2{,}14\cdot10^{-5}$	$1{,}83\cdot10^{-6}$
n=64, k=30, d_{min}=13, t=6, n_w=256, M=90	P_0	0,1	0,05	0,03	0,01		
	P_k	$5{,}42\cdot10^{-7}$	$4{,}739\cdot10^{-8}$	$3{,}58\cdot10^{-9}$	$4{,}436\cdot10^{-12}$		
n=64, k=30, d_{min}=13, t=6, n_w=256, M=256	P_0	0,1	0,05	0,03	0,01	0,005	0,003
	P_k	0,461	0,04029	0,00304	$3{,}77\cdot10^{-6}$	$3{,}78\cdot10^{-8}$	$1{,}17\cdot10^{-9}$
n=128, k=64, d_{min}=21, t=10, n_w=256, M=90	P_0	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	
	P_k	$8{,}75\cdot10^{-7}$	$6{,}654\cdot10^{-8}$	$2{,}029\cdot10^{-9}$	$6{,}85\cdot10^{-11}$	$9{,}7855\cdot10^{-14}$	
n=128, k=64, d_{min}=21, t=10, n_w=256, M=256	P_0	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,005
	P_k	0,744	0,0566	0,00172	$5{,}824\cdot10^{-5}$	$8{,}32\cdot10^{-8}$	$6{,}95\cdot10^{-11}$
n=16, k=5, d_{min}=8, t=3, n_w=256, M=85	P_0	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,001
	P_k	$3{,}2\cdot10^{-9}$	$7{,}22\cdot10^{-10}$	$4{,}83\cdot10^{-10}$	$4{,}48\cdot10^{-10}$	$4{,}39\cdot10^{-10}$	$4{,}39\cdot10^{-10}$

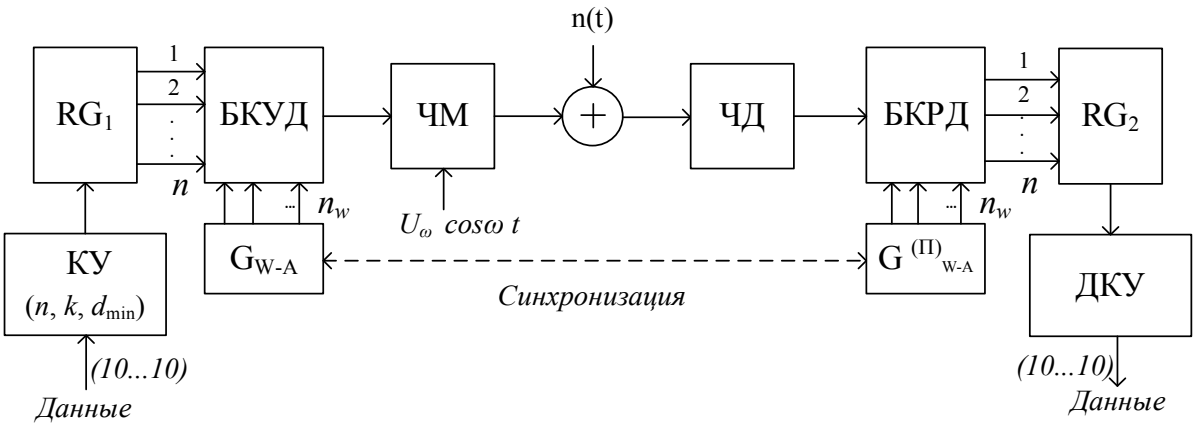


Рис. 1. Структурная схема системы передачи данных

ДКУ – декодер канала, который гарантированно исправляет $t \le \left[\frac{d_{\min}-1}{2}\right]$ двоичных ошибок.

Для такой структурной схемы передачи данных справедлива система трех уравнений, определяющих вероятность подделки стеганоконтейнера, состоящего из корректирующего кода и ортогональных последовательностей Уолша-Адамара:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{t} C_n^i P_0^i (1-P_0)^{n-i} + \sum_{i=t+1}^{n} C_n^i P_0^i (1-P_0)^{n-i} = 1, & (1) \\ \frac{1}{2^n}\sum_{i=0}^{t} C_n^i + \frac{1}{2^n}\sum_{i=t+1}^{n} C_n^i = 1, & (2) \\ \frac{1}{2^{n_w^2}}\sum_{i=0}^{M} C_{n_w^2}^i + \frac{1}{2^{n_w^2}}\sum_{i=M+1}^{n_w^2} C_{n_w^2}^i = \frac{1}{2^{n_w^2}}\sum_{i=0}^{n_w^2} C_{n_w^2}^i = 1. & (3) \end{cases}$$

Уравнение (1) отражает вероятность подделки кодовой комбинации, когда декодер выносит либо истинно правильное решение ($i \le t$), либо кажущееся (ложное) правильное решение ($i \ge t+1$) при вероятности поражения помехой элемента кода, равной P_0.

Уравнение (2) отражает условные вероятности имитации i двоичных символов на кодовую комбинацию $(n,k,d_{\min})$ постановщиком имитирующих помех.

Уравнение (3) отражает условные вероятности имитации i двоичных символов на ансамбль ортогональных двоичных последовательностей Уолша-Адамара, состоящий из n_w^2 двоичных символов, постановщиком имитирующих помех, которые поражают M элементов ансамбля последовательностей. Тогда вероятность подделки контейнера сообщения P_k будет определятся выражением

$$P_k = \left[\sum_{i=0}^{t} C_n^i P_0^i (1-P_0)^{n-i} \sum_{i=0}^{t} 2^{-n} C_n^i + \sum_{i=t+1}^{n} C_n^i P_0^i (1-P_0)^{n-i} \sum_{i=t+1}^{n} 2^{-n} C_n^i\right] \cdot \sum_{i=0}^{M} 2^{-n_w^2} C_{n_w^2}^i$$

Исследуем влияние параметров корректирующего двоичного кода $(n,k,d_{\min})$ на вероятность P_k при $n_w^2=16$ для $M=90$ и $M=256$.

Результаты расчетов представлены в *таблице 1*.

Анализ *таблицы 1* показывает:

- введение в структурную схему канала передачи данных стеганоконтейнера способствует повышению имитозащищенности (для всех представленных в таблице корректирующих кодов при отсутствии стеганоконтейнера ($M=n_w=256$) вероятность P_k значительно больше, чем при его наличии $n_w=256$, $M=90$) (*рисунок 2*);
- при наличии стеганоконтейнера ($n_w=256$, $M=90$) для всех $P_0>0{,}04$ наименьшее значение P_k позволяет получить двоичный код (16,5,8), который способен исправлять только 3 ошибки;
- при наличии стеганоконтейнера ($n_w=256$, $M=90$) для всех $P_0 \le 0{,}04$ наименьшее значение P_k позволяет получить двоичный код (128,64,21), который исправляет 10 ошибок в кодовой комбинации (*рисунок 3*);
- короткий двоичный код (16,5,8) не позволяет получить вероятность $P_k<1{,}25\cdot10^{-8}$ при $n_w=256$, $M=90$, однако при уменьшении M ($M=85$), $n_w=256$ вероятность $P_k<3{,}2\cdot10^{-9}$, но не снижается до $P_k<4{,}387\cdot10^{-10}$ (*рисунок 4*).

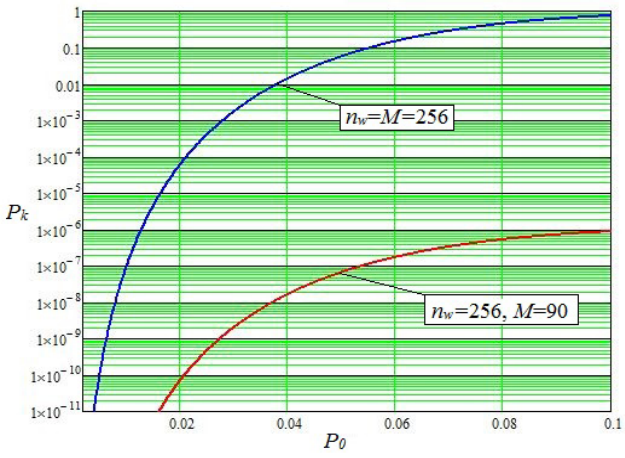


Рис. 2. Зависимость $P_k=f(P_0)$ двоичного кода (128,64,21)

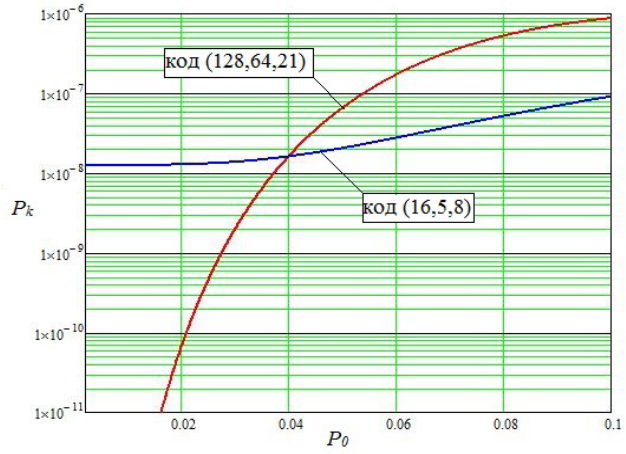


Рис. 3. Зависимость $P_k=f(P_0)$ при $n_w=256$, $M=90$

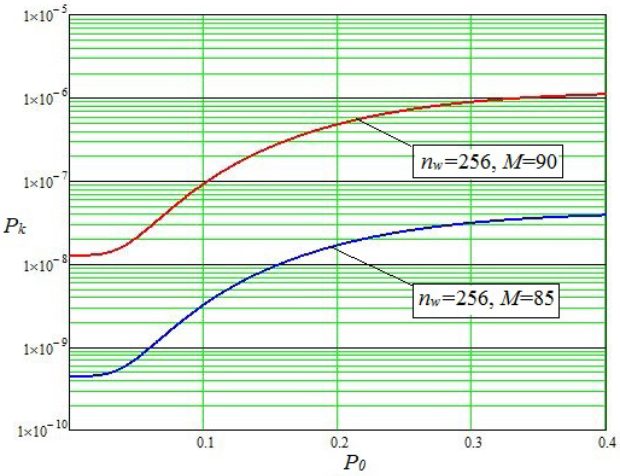


Рис. 4. Зависимость $P_k=f(P_0)$ двоичного кода (16,5,8)

Заключение

1. Введение стеганоконтейнера в канал передачи данных позволяет повысить имитозащищенность системы радиосвязи, при этом допускается угадывание 1/3 символов стеганоконтейнера (M=85 для n_w=256).

2. При отсутствии стеганоконтейнера (M=n_w=256) существуют корректирующие коды, которые позволяют получить наименьшую вероятность P_k (при P_0=0,01 таким кодом является код с параметрами n=128, k=64, d_{min}=21).

3. При наличии стеганоконтейнера (n_w=256, M=90) при P_0=0,1 наименьшее значение вероятности P_k можно получить при использовании кода (16,5,8).

4. Полученное выражение для определения вероятности P_k позволяет на стадии проектирования систем радиосвязи выбирать наилучшие параметры корректирующего кодирования и стеганоконтейнера.

Литература

1. Васюта К.С., Озеров С.В., Королюк А.Н. Особенности построения стеганографических систем радиосвязи. Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций» / http://pt.journal.kh.ua, 2012. № 3 (8). С. 94-104.

2. Конахович Т.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: «МК-Пресс», 2006. 288 с.

3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд: пер с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2017. 1100 с.

4. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Дурнов А.С. Статистические характеристики системы передачи данных с кодовым ортогональным уплотнением данных при воздействии гауссова шума // Электросвязь, 2018. №7. С. 42-45.

УДК 621.394

МЕТОД МЯГКОГО ИТЕРАТИВНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ

SOFT ITERATIVE METHOD DECODING OF LINEAR NOISE-RESISTANT CODES

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 предложен итеративный алгоритм, который может быть использован для декодирования линейных помехоустойчивых кодов с коррекцией ошибок. Алгоритм легко обобщается для мягкого декодирования кодов без существенного увеличения сложности. Для декодирования кода используется матрица проверочных соотношений наименьшего веса, с помощью которой вычисляют компоненты обобщенного синдрома ошибок. В зависимости от числа нулевых и единичных синдромов оценивают надежности символов кода. В итеративном алгоритме на первой итерации корректируют символ с наименьшей надежностью. Затем надежности символов пересчитывают, и на второй итерации также корректируют символ с наименьшей надежностью и т.д. При разреженной матрице проверок увеличение числа проверок приводит к возрастанию вероятности правильного декодирования символов, и при достаточно большом числе проверок минимального веса вероятность правильного декодирования будет приближаться к 1. Сложность декодирования будет оцениваться величиной $O(n_2)$, где n – блоковая длина кода.
Ключевые слова: линейные помехоустойчивые коды, декодирование с исправлением ошибок, мягкое декодирование кода, надежность символов кода.

Summary
The article proposes an iterative algorithm that can be used to decode linear noise-resistant codes with error correction. The algorithm is easily generalized for soft decoding of codes without a significant increase in complexity. To decode the code, a matrix of verification ratios of the lowest weight is used, with the help of which the components of the generalized error syndrome are calculated. Depending on the number of zero and single syndromes, the reliability of the code symbols is evaluated. In an iterative algorithm, the symbol with the least reliability is corrected at the first iteration. Then the reliability of the symbols is recalculated, and in the second iteration, the symbol with the least reliability is also corrected, etc. With a sparse matrix of checks, an increase in the number of checks leads to an increase in the probability of correctly decoding characters, and with a sufficiently large number of minimum weight checks, the probability of correct decoding will approach 1. The complexity of decoding will be estimated by $O(n_2)$, where n is the block length of the code.
Keywords: linear noise-resistant codes, error-correcting decoding, soft code decoding, code symbol reliability.

Введение

Основными критериями выбора метода декодирования кода являются помехоустойчивость и сложность алгоритма декодирования. Хороший метод декодирования должен гарантированно корректировать все ошибки в пределах минимального расстояния кода и часть ошибок, если возможно, за его пределами, а также допускать декодирование с мягкими решениями [1]. В настоящее время известно большое число различных алгоритмов жесткого декодирования линейных помехоустойчивых кодов: перестановочное декодирование Касами-Рудольфа, мажоритарное декодирование, алгебраическое декодирование и др. [2]. Однако значительную часть этих алгоритмов довольно сложно использовать для мягкого декодирования кодов. Алгоритмы Чейза мягкого декодирования требуют многократного применения жесткого декодирования кода и имеют большую сложность [3]. Итеративное мажоритарное (многопороговое) декодирование можно использовать для исправления ошибок за пределами минимального кодового расстояния и мягких решений, но его применение возможно только для ограниченного класса мажоритарно декодируемых помехоустойчивых кодов [4].

Эффективный, и в то же время довольно простой алгоритм декодирования предложен для

кодов Галлагера с малой плотностью проверок на четность. В этом алгоритме корректируют символы, для которых не выполняются проверочные соотношения кода [5]. С некоторыми изменениями аналогичное декодирование возможно для довольно большого класса линейных помехоустойчивых кодов, если в качестве проверочных соотношений кода использовать слова дуального кода минимального веса.

Рассмотренный в настоящей работе итеративный алгоритм может быть использован для декодирования линейных помехоустойчивых кодов с коррекцией ошибок. Алгоритм легко обобщается для мягкого декодирования кодов без существенного увеличения сложности. Для декодирования кода используется матрица проверочных соотношений наименьшего веса, с помощью которой вычисляют компоненты обобщенного синдрома ошибок. В зависимости от числа нулевых и единичных синдромов оценивают надежности символов кода. В итеративном алгоритме на первой итерации корректируют символ с наименьшей надежностью. Затем надежности символов пересчитывают, и на второй итерации также корректируют символ с наименьшей надежностью и т.д. При разреженной матрице проверок увеличение числа проверок приводит к возрастанию вероятности правильного декодирования символов, и при достаточно большом числе проверок минимального веса вероятность правильного декодирования будет приближаться к 1. Сложность декодирования будет оцениваться величиной $O(n^2)$, где n – блоковая длина кода.

Алгоритм декодирования с мягкими и жесткими решениями

Будем рассматривать двоичные линейные блоковые коды. Кодирование задается порождающей матрицей

$$B=A\times G,$$

где $A=a_0a_1\ldots a_{k-1}$ – двоичный вектор исходной информации;

$B=b_0b_1\ldots b_{n-1}$ – вектор кода $(n>k)$;

G – порождающая матрица кода размера $k\times n$.

Из-за искажений в канале связи на вектор кода B накладывается вектор ошибок $E=e_0e_1\ldots e_{n-1}$

$$F = B \oplus E.$$

Для декодирования используют слова дуального кода минимального веса. Дуальный код определяется через проверочную матрицу кода

$$D_1=C\times H,$$

где C – вектор исходной информации дуального кода длины n-k;

D_1 – слово дуального кода длины n;

H – проверочная матрица кода размера $(n$-$k)\times n$.

Слова дуального кода являются проверочными соотношениями кода [6]

$$B\times D_1^{\mathrm{T}}=0$$

Выберем M слов дуального кода $D_1D_2\ldots D_M$ минимального веса d_0. Вектор проверок $S=S_1\,S_2\ldots S_M$ для принятого кодового слова

$$S_i=F\times D_i^T=E\times D_i^T,\ i=1\ldots M,$$

где $D_i=d_{i0}\,d_{i1}\ldots d_{in-1}$ – слово дуального кода.

Последнее равенство показывает, что вектор проверок зависит только от ошибок. По аналогии с обычным вектором синдрома длины n-k, вектор S длины M $(M>n$-$k)$ будет называть обобщенным синдромом ошибок, а матрицу проверок $D=\{D_i\}=\{d_{ij}\}$ – обобщенной проверочной матрицей.

Проверка выполняется – $S_i=0$, если вектор E в окне, задаваемом проверкой D_i, не содержит ошибок или содержит четное число ошибок, а не выполняется – $S_i=1$, если вектор E в окне проверки содержит нечетное число ошибок. Оценки показывают, что при небольшом весе проверок d_0 проверки чаще выполняются при безошибочном приеме символов, а не выполняются – из-за одиночных ошибок [7]. Это объясняет выбор проверочных соотношений наименьшего веса для вычисления синдрома.

Проверки кода $S=S_1\,S_2\ldots S_M$ оценивают надежности символов, входящих в проверки. Нулевые проверки повышают надежность символов, а единичные – снижают надежность символов проверки [8]. При определенных условиях, чем больше вес обобщенного синдрома ошибок, тем больше ошибок в кодовом слове. Проверки могут быть линейно зависимы. Для рассматриваемого метода декодирования линейной независимости проверок не требуется.

Пусть j-й символ кода b_j входит в проверки D_{ji}, $i=1\ldots h$. Запишем вектор проверок для j-го символа кода $S_j=S_{j1}S_{j2}\ldots S_{jh}$. Матрица проверок $D=\{d_{ij}\}$ линейного кода задает двудольный граф Таннера, одно множество узлов которого соответствует множеству проверок (проверочные узлы), другое – множеству кодовых символов (символьные узлы) [9]. Символьный узел b_i связан ребром с некоторым проверочным узлом S_j, если i-й кодовый символ входит в j-ю проверку, иными словами, если элемент d_{ij} матрицы проверок D не равен нулю.

При декодировании кода с мягкими решениями используют надежности символов [10]. Предположим, приняты символы кода $f_1,f_2,\ldots f_n$ с оценками надежности $\alpha_1,\alpha_2,\ldots\alpha_n$, $0\le\alpha_i\le1$. Алгоритм мягкого итеративного декодирования будет состоять из следующих шагов:

1. Устанавливаем номер итерации $i=1$
2. Вычисляем проверки кода $S=S_1\,S_2\ldots S_M$,

если $S=0$, то идти 10

3. Определяем символ f_j с минимальной надежностью

$$\alpha_j=min(\alpha_1,\alpha_2,\ldots\alpha_n)$$

4. Определяем вес проверок $w_0(S_j)$ символа f_j

5. Выполняем коррекцию символа $f_j = f_j \oplus 1, \alpha_j = 1$

6. Заново вычисляем проверки j-го символа и вес проверок $w_1(S_j)$

7. Если $w_1(S_j)<w_0(S_j)$, то коррекция верная, иначе коррекцию отменяем

8. $i=i+1$.

9. Если $i<n-k$, то идти 2

10. Конец

На каждой итерации рассчитывают проверки символов кода. Корректируют наименее надежный j-й символ и вычисляют новые проверки кода. При уменьшении веса проверок j-го символа коррекция считается верной и т.д. до тех пор, пока не будут выполняться все проверки.

Проверки $S_j=S_{j1}S_{j2}\ldots S_{jh,}$ можно также использовать для жесткого декодирования кода. Алгоритм аналогичен алгоритму мягкого декодирования, но начальные оценки надежностей символов кода полагают равными нормированному весу проверок символов

$$\alpha_j = 1-\frac{w_0(S_j)}{h}.$$

На каждой итерации можно корректировать и несколько символов с наименьшей достоверностью, в этом случае число итераций уменьшается. Возможен алгоритм декодирования, состоящий только из одной итерации. После вычисления проверок стирают наименее надежные символы кода и далее выполняют декодирование кода с исправлением стираний. Декодирование линейного кода с исправлением стираний сводится к решению системы линейных уравнений относительно значений стираний [11]. При линейной независимости столбцов проверочной матрицы, соответствующих позициям стираний, значения стираний определяют однозначно. При линейной зависимости столбцов проверочной матрицы кода получим список решений для значений стираний. Верное решение из множества значений стираний можно выбрать по весу обобщенного синдрома ошибок.

Сложность декодирования определяется сложностью вычисления проверок. Число проверок примерно линейно зависит от блоковой длины кода. Количество вычислений каждой проверки линейно увеличивается с увеличением блоковой длины кода. Сложность декодирования оценивается величиной $O(n^2)$, где n – блоковая длина кода.

Вероятность ошибки декодирования зависит от веса проверок и числа проверок символов. При увеличении числа проверок наименьшего веса уменьшается вероятность ошибки декодирования.

Оценивание вероятности ошибки символа в зависимости от числа проверок

Для декодирования выбирают проверки минимального веса. В проверки минимального веса попадает меньшее число ошибок, увеличивается число безошибочных проверок кода и число проверок с небольшим числом ошибок. Сначала корректируют наименее надежный символ, число единичных проверок которого имеет наибольшее значение. Правильность коррекции ошибки контролируют по уменьшению веса обобщенного синдрома. По весу синдрома можно оценить вероятность ошибки символа кода.

Для кода (n,k,d) число корректируемых ошибок примерно $t=0,5(d-1)$. В каждую из проверок $S_j=S_{j1}\ S_{j2}\ldots S_{jh}$ минимального веса d_0 символ f_j входит один раз, а остальные символы входят в среднем

$$\frac{d_0\cdot d}{n}<1 \text{ раз.}$$

Для мажоритарно декодируемых кодов с разделенными проверками остальные символы входят в проверки по 1 разу, справедливо $h>d-1$, и все ошибки кратности не выше t корректируются.

Если остальные символы входят в проверки не более, чем ε раз, то t ошибок мажоритарно декодируются при числе проверок $h>\varepsilon(d-1)$.

При ошибке в символе f_j и $t-1$ ошибках в остальных символах число невыполненных проверок будет изменяться от $h-\varepsilon(t-1)$ до h. При безошибочном символе f_j и t ошибках в остальных символах, число невыполненных проверок будет изменяться от 0 до $\varepsilon\cdot t$. Ошибка в проверяемом символе будет корректироваться при условии

$$h-\varepsilon\cdot(t-1)>\varepsilon\cdot t$$

или

$$h>\frac{d_0\cdot d\cdot(h-1)}{n-1},$$

с некоторым приближением

$$\frac{d_0\cdot d}{n}<1.$$

Запишем вероятностные оценки числа невыполненных проверок символов кода. Если код корректирует t ошибок, то вероятность ошибки в коде оценим

$$p=\frac{t}{n}$$

Вероятность проверки с $i=0\ldots t$ ошибками

$$P_i=C_{d_0}^i p^i(1-p)^{d_0-i}.$$

Вероятность безошибочного приема символов проверки больше вероятности двух ошибок

в проверке

$$(1-p)^{d_0} > C_{d_0}^2 p^2 (1-p)^{d_0-2}.$$

Откуда с некоторым приближением

$$\frac{t}{n} < \frac{\sqrt{2}}{d_0},$$

или

$$\frac{d \cdot d_0}{n} < \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,88.$$

При выполнении данного неравенства приближенно можно считать, что если соответствующая компонента обобщенного синдрома равна нулю, то символы проверки с большей вероятностью приняты безошибочно.

Вероятность одиночной ошибки больше вероятности тройных ошибок

$$d_0 p(1-p)^{d_0-1} > C_{d_0}^3 p^3 (1-p)^{d_0-3},$$

или приближенно

$$\frac{d \cdot d_0}{n} < \sqrt{\frac{3}{2}} \approx 1,22.$$

Если выполняется данное неравенство при ненулевой проверке можно приближенно считать, что в проверке только одна ошибка.

Например, двоичный код БЧХ(31,16,7), $n=31$, $k=16$, $d=7$, $d_0=8$ корректирует 3 ошибки. Для некоторого j-го символа кода выбрано 15 проверок минимального веса. Остальные символы входят в эти проверки не более 3-х раз. При ошибке j-го символа, с учетом тривиальной проверки, в худшем случае только 6 проверок будет выполняться, а 7 проверок – не выполняться. Поэтому, при мажоритарном голосовании ошибка j-го символа будет исправлена. Верность коррекции ошибки контролируется по уменьшению веса обобщенного синдрома.

При 3-х ошибках в коде вероятность безошибочных проверок веса 8 оценивается P_0=0.430, вероятность проверок с одной ошибкой P_1=0.383, двумя – P_2=0.149, тремя – P_3=0.033.

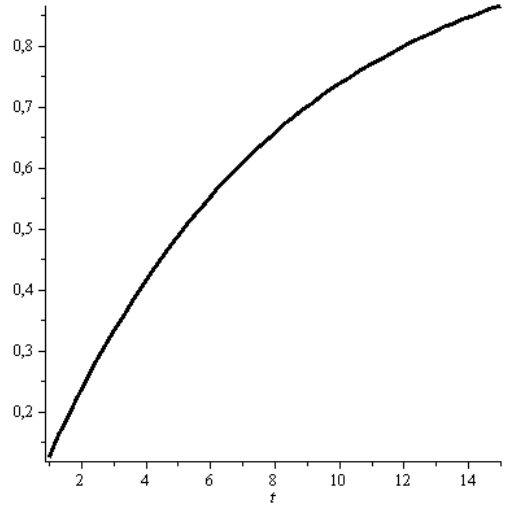


Рис. 1. Вероятность ошибки символа от числа единичных проверок

Из 455 проверок минимального веса 8 в среднем 196 проверок будут безошибочными, 174 – с одной ошибкой, 68 – с двумя ошибками и 15 – с тремя ошибками. Значит, примерно 265 проверок будут выполняться и 190 проверок выполняться не будут.

При 2 ошибках в коде вероятность безошибочных проверок P_0=0.587, вероятность проверок с одной ошибкой P_1=0.325, двумя – P_2=0.078. Примерно 303 проверок будут выполняться и 152 проверок выполняться не будут.

Число ошибок в коде можно оценить по числу проверок, которые выполняются или не выполняются. Точность такой оценки будет зависеть от числа проверок минимального веса.

Вероятность ошибки символа при невыполнении одной проверки

$$P(e/1) = \frac{P(e)P(1/e)}{P(1)},$$

или

$$P(e/1) = \frac{p\sum_{i=0}^{t/2} C_{d_0-1}^i p^{2i} (1-p)^{d_0-2i-1}}{\sum_{i=1}^{t/2} C_{d_0}^{2i-1} p^{2i-1} (1-p)^{d_0-2i+1}}.$$

Вероятность ошибки символа при условии f единичных проверок примерно оценим

$$P(e/f) = 1-(1-P(e/1))^f.$$

При увеличении числа единичных проверок вероятность ошибки символа увеличивается, приближаясь к 1.

Для кода БЧХ(31,16,7) будет $P(e/1)$=0.125 и зависимость вероятности ошибки символа в зависимости от числа единичных (невыполненных) проверок представлена на *рисунке 1*.

При 6 единичных проверках вероятность ошибки символа равна 0,55. При 10 единичных проверках вероятность ошибки символа 0,74, а при 15 – 0,87.

Пример декодирования линейного кода

Рассмотрим декодирование двоичного помехоустойчивого кода БЧХ (15,7,5), блоковая дли-

Рис. 2. Граф Таннера кода БЧХ(15,7,5)

на которого $n=15$, информационная длина $k=7$, а минимальное кодовое расстояние $d=5$, что позволяет исправлять $t=2$ ошибок [12]. Проверочный многочлен кода $h(x)=x^7+x^3+x+1$. Проверочная матрица кода

$$H=\begin{vmatrix}1101000100000000\\0110100010000000\\0011010001000000\\0001101000100000\\0000110100010000\\0000011010001000\\0000001101000100\\0000000110100010\\0000000011010001\end{vmatrix}$$

Дуальный код (15,8,4) содержит 15 слов минимального веса, равного 4.

$$D=\begin{vmatrix}1101000100000000\\0110100010000000\\0011010001000000\\0001101000100000\\0000110100010000\\1000000011010000\\0000011010001000\\0100000001101000\\0000001101000100\\0100000000110100\\0000000110100010\\0010000000011010\\1000100000000110\\0000000011010001\\1010001000000001\\0001000000011010\\0100010000000011\end{vmatrix}$$

Матрице проверочных соотношений ставится в соответствие граф Таннера, отображающий связи между проверками и символами кода. Первый символ входит в 1,6,11 и 13 проверки, второй – в 1,2,8 и 15 проверки и т.д. Граф Таннера, соответствующий матрице D, представлен на *рисунке 2*.

Каждое проверочное соотношение кода содержит 4 символа и для каждого символа будет 4 проверки.

Код гарантированно корректирует 2-х кратные ошибки. Пусть передавался код БЧХ(15,7)

$$B=101010110100111,$$

а принято слово с 2-мя ошибками

$$F=100010111100111$$

в 3 и 9 символах кода.

Вектор проверочных соотношений кода

$$S=F\times D^T$$

$$S=001001100101100.$$

Первый символ кода входит в 1, 6, 11 и 13 строки матрицы D и обобщенный синдром для первого символа с учетом рис. 2 будет $S_1=0101$.

Проверочные соотношения для других символов

$S_2=0000;\ S_3=0111;\ S_4=0100;\ S_5=0000;\ S_6=1010;\ S_7=0101;\ S_8=0001;\ S_9=0111;\ S_{10}=1100;\ S_{11}=0011;S_{12}=0110;S_{13}=1000;\ S_{14}=0100;\ S_{15}=1100.$

Компоненты вектора ошибок вычисляют в зависимости от веса обобщенного синдрома. Если вес $w(S_i)>2$, то $e_i=1$, иначе $e_i=0$, $i=1..15$ и вектор ошибок

$$E=001000001000000.$$

Декодированное кодовое слово

$$C=F\oplus E=101010110100111$$

совпадает с переданным кодовым словом.

Итеративный алгоритм корректирует некоторую долю ошибок за пределами минимального кодового расстояния. Пусть принят код с 3-мя ошибками

$$F=001011110110111$$

в 1,6 и 11 символах кода. Вектор проверочных соотношений

$$S=101111110111111.$$

Вес синдрома $w(S)=12$. Проверки символов кода

$S_1=1111, S_2=1011; S_3=0101; S_4=1111; S_5=0111;\ S_6=1111;\ S_7=1111;\ S_8=1111;\ S_9=0111;\ S_{10}=1111;\ S_{11}=1101;\ S_{12}=1101;\ S_{13}=1111;\ S_{14}=1011;\ S_{15}=1111.$

Проверим $e_1=1$. Новый вектор проверок

$$S=001110110101001,$$

его вес $w(S)=8<12$. Проверки для символов кода

$$S_1=0000;\ S_2=0011;\ S_3=0110;\ S_4=0110;\ S_5=0110;\ S_6=1111;\ S_7=1100;\ S_8=0101;\ S_9=0011;\ S_{10}=1010;\ S_{11}=1111;\ S_{12}=1010;\ S_{13}=1100;\ S_{14}=0101;\ S_{15}=1001.$$

Значит, $e_6=1$, $e_{11}=1$. Все 3 ошибки исправлены.

При мягком декодировании используют надежности символов кода. Пусть приняты символы кода

$$F=111000110001111$$

с 4-мя ошибками на 2,5,10 и 12 позициях кода и надежностями $\alpha_1,\alpha_2,\ldots,\alpha_n,\ 0\le\alpha_1\le1$.

Допустим, что минимальные надежности α_2, α_5, α_7, α_9, α_{10}, α_{12}. Причем надежности α_2, α_5, α_{10}, α_{12} соответствуют ошибочным символам, а надежности α_7, α_9 – правильным символам. Вектор проверочных соотношений

$$S=101100001110011.$$

Вес синдрома $w_0(S)=8$. Проверки символов кода

$S_1=1010, S_2=1001; S_3=0110; S_4=1111; S_5=0101;\ S_6=1001;\ S_7=1010;\ S_8=1010;\ S_9=0000;\ S_{10}=1001;\ S_{11}=1010; S_{12}=0011; S_{13}=0011; S_{14}=1110; S_{15}=0011.$

Корректируем два символа с наименьшими надежностями α_2 и α_5. Тогда новый вектор синдрома

$$S=001000011100010.$$

Вес синдрома $w_1(S)=5$, уменьшился на 3. Поэтому, принимаем коррекцию этих символов.

Корректируем символы с минимальной надежностью α_7 и α_9. Сидром будет

$$S=001000011100010.$$

Вес синдрома $w_1(S)=8$ увеличился на 3. Коррекцию этих символов отклоняем.

Корректируем символы с минимальной надежностью α_{10} и α_{12}. Новый синдром

$$S=000000000000000,$$

значит, все ошибки исправлены.

Контроль веса синдрома позволяет корректировать символы даже при низкой надежности правильно принятых символов.

Заключение

В статье предложен итеративный метод мягкого декодирования линейных помехоустойчивых кодов с исправлением ошибок с помощью обобщенного синдрома ошибок. Для вычисления обобщенного синдрома используют слова дуального кода минимального веса. При мягком декодировании надежность символа определяется решением демодулятора, а при жестком декодировании – от числа единичных или нулевых компонент синдрома ошибок символа кода. При надежности символа ниже порогового значения символ кода корректируется. Исправление ошибки уменьшает вес вектора обобщенного синдрома ошибок на следующей итерации, и увеличивает вероятность правильного декодирования. Алгоритм может исправлять все ошибки в пределах минимального кодового расстояния и некоторую долю ошибок за пределами минимального кодового расстояния, его также можно использовать для мягкого декодирования кода. Алгоритм декодирования имеет полиномиальную сложность с небольшим показателем степени, равным 2.

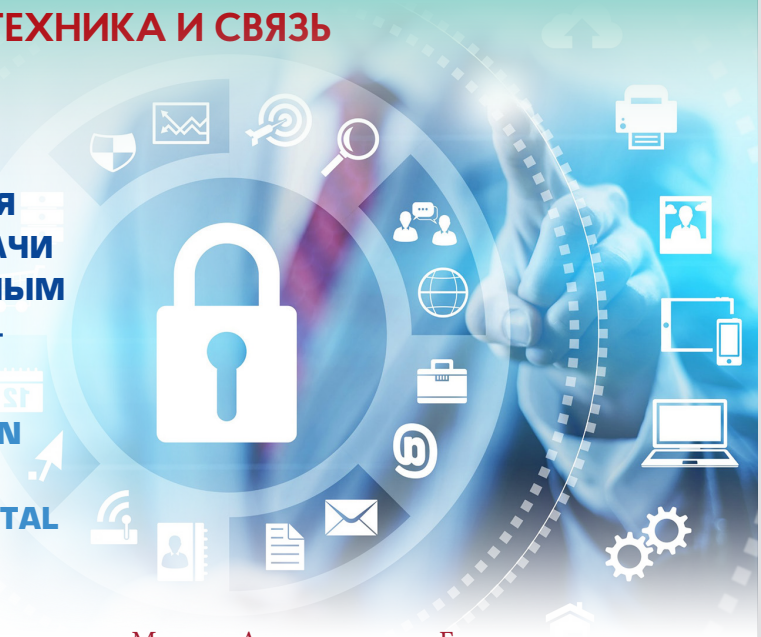
Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
2. Колесник В.Д., Мирончиков Е.Т. Декодирование циклических кодов. М.: Связь, 1968. 251 с. Кларк Дж. мл., Кейн Дж.. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 392 с.
4. Золоторев В.В. Теория и алгоритмы многопорогового кодирования. М.: Радио и связь, Горячая линия-Телеком, 2006. 272 с.
5. Морелос-Сарагоса М. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005. 320 с.
6. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 594 с.
7. Быховский М.А. Гиперфазовая модуляция – оптимальный метод передачи сообщений в гауссовских каналах связи. М.: Техносфера, 2018. 310 с.
8. Declercq D., Fossorier M., Biglieri E., Channel Coding. Theory, Algorithms, and Applications. Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications, 2014.
9. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 379 с.
10. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. Под ред. Д.Д. Кловского М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
11. Берлекэмп Э.Р. Алгебраическая теория кодирования. Пер. с англ., М.: Мир, 1971. 477 с.
12. Мак-Вильямс Ф.Дж., Слоэн Н.Дж.А. Теория кодов, исправляющих ошибки. Пер. с англ. М.: Связь, 1979. 744 с.

УДК 621.391

СПОСОБЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СКРЫТЫМ КАНАЛАМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ, ВСТРАИВАЕМЫМ В АЛГОРИТМЫ ЭЛЕКТРОННО-ЦИФРОВЫХ ПОДПИСЕЙ

WAYS TO COUNTERACT HIDDEN INFORMATION TRANSMISSION CHANNELS EMBEDDED IN DIGITAL SIGNATURE ALGORITHMS



Никита Сергеевич Таганов
магистрант
Московский технический университет связи и информатики
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а
Тел.: +7 (985) 232-39-18
E-mail: taganov2@mail.ru

Максим Александрович Бессонов
кандидат технических наук
Московский технический университет связи и информатики
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а
Тел.: +7 (977) 751-46-98
E-mail: m.a.bessonov@mtuci.ru

Аннотация

В статье проводится аналитический разбор организации скрытого канала на основе электронно-цифровой подписи ElGamal и рассматриваются способы противодействия данной уязвимости. Актуальность данной проблемы вызвана массовым использованием электронной подписи во многих социальных сферах. Утечка конфиденциальной информации по этим каналам, может привести к серьезным последствиям: потеря репутации, финансовый ущерб, получение несанкционированного доступа к информационной системе и т.д. Приведено описание процесса создания скрытого канала передачи информации со знанием секретного ключа и без использования секретного ключа. Проведен анализ двух способов противодействия, выделен оптимальный.

Ключевые слова: информационная безопасность, уязвимость, электронно-цифровая подпись, алгоритм, способы противодействия.

Summary

The article provides an analytical analysis of the organization of a hidden channel based on the ElGamal digital signature and discusses ways to counteract this vulnerability. The urgency of this problem is caused by the massive use of electronic signatures in many social spheres. Leakage of confidential information through these channels can lead to serious consequences: loss of reputation, financial damage, obtaining unauthorized access to the information system, etc. The process of creating a hidden information transmission channel with knowledge of the secret key and without using the secret key is described. The analysis of two ways of counteraction is carried out, the optimal one is highlighted.

Keywords: information security, vulnerability, digital signature, algorithm, methods of counteraction.

Введение

Сейчас электронно-цифровая подпись используется во многих сферах нашей жизни: электронные торги, обращение в госорганы, отчетность через интернет, электронный документооборот. Данная технология значительно упрощает подтверждение подлинности электронного документа. Использование такой подписи в несколько раз сокращает время оформления сделок, позволяет усовершенствовать учет документов и уменьшает риск потери финансовых средств. Подделка ЭЦП крайне затруднительна из-за большого количества вычислений и завышенных требований к вычислительной мощности.

К большому сожалению, многие схемы ЭЦП обладают серьезным недостатком, который может привести к утечке конфиденциальной информации. Уязвимость может нанести серьезный ущерб корпорации и даже целому государству. Проблема, о которой идет речь, впервые была обнаружена Густавусом Джеймсом Симмонсом в 1984 году [1]. Особенностью многих алгоритмов электронно-цифровой подписи является возможность дополнительной передачи информации по скрытому каналу. К таким ал-

горитмам относятся: *Ong-Schnorr-Shamir*, *ElGamal*, *DSA*, ГОСТ Р 34.10-2012. Все они обладают свойством, при котором ЭЦП зависит от случайного числа. Подписывающий, выбирая это число, может закодировать в нем информацию, которую получатель сможет расшифровать по заранее созданному алгоритму.

Целью статьи является нахождение оптимального решения проблемы передачи информации по скрытым каналам.

Вычисление хеш-значения сообщения

Для того чтобы реализовать скрытый канал передачи информации для начала необходимо иметь некое безобидное сообщение, которое абонент А отправит абоненту Б [4].

В рамках статьи алгоритм хеширования важной роли в извлечении секретного сообщения не играет, поэтому можно использовать абсолютно любую функцию хеширования. В качестве примера рассмотрим упрощенный вариант хеш-функции из рекомендаций МККТТ X.509:

$$Hi=(Hi-1+Mi)^2 \ \% \ n, \qquad (1)$$

где Hi – блок хеш-функции ($H0$ – произвольное начальное заполнение);
Mi – входная последовательность;
n – составной модуль.

Хеш-функция должна удовлетворять условиям:

1. Хеш-функция $h(M)$ чувствительна к любым изменениям входной последовательности M;

2. Отсутствие возможности для значения $h(M)$ найти значение M;

3. Для данного значения $h(M)$ невозможно найти значения $M'\neq M$ такое, что $h(M')=h(M)$. (Ситуация при которой совпадают значения $h(M')$ и $h(M)$ называется коллизией).

Для вычисления составного модуля необходимо выбрать два больших простых числа p и q. Расчет производится по формуле:

$$n = p * q \qquad (2)$$

При вычислении хеш-образа сообщения M разбивается на блоки Mi и поблочно обрабатывается по формуле (1). Последний блок сообщения является хеш-значением или же хеш-образом данного сообщения.

Реализация скрытого канала передачи информации с передачей секретного ключа

Для реализации данного канала абонент Б должен знать значение секретного ключа x. Такой канал называется широкополосным. Широкополосный канал имеет очень серьезный недостаток. Абонент А должен полностью довериться абоненту Б, так как существует вероятность компрометации собеседником ключа подписи. Также из недостатков можно выделить то, что не все числа удовлетворяющие условию $0<k<q$, можно вставить в подпись, а заранее узнать с какими именно числами не получится создать подпись тяжело, так как от параметра k зависят другие элементы вычисления [2].

На первом этапе формирования подписи вычисляется составной модуль простых чисел p и q по формуле (2). В качестве p и q выбираются отличные от предыдущих значений.

Значения простых множителей являются конфиденциальной информацией и держатся в секрете, либо уничтожаются после вычисления $\varphi(n)=(p-1)(q-1)$. Составной модуль n является частью открытого ключа (y,n).

Далее следует найти параметр a – наименьшее число, которое возможно найти из формулы:

$$a^{(q')} \ \% \ n = 1, \qquad (3)$$

где q' – это сгенерированное простое число, взаимно простое с числами $p-1$ и $q-1$;
n – составной модуль.

На данном этапе стало возможно вычисление открытого ключа, который вычисляется с помощью секретного ключа x по формуле (4). Необходимо выбрать секретный ключ удовлетворяющий условию $x<n$.

$$y = a^x \ \% \ n. \qquad (4)$$

Для формирования электронно-цифровой подписи нам необходимо найти два параметра r и S. Параметр r вычисляется по формуле (5) и для вычисления необходимо задать сеансовый ключ k, который и является секретным сообщением.

$$r = a^k \ \% \ n. \qquad (5)$$

На данном этапе осталась последняя неизвестная переменная из уравнения формирования электронно-цифровой подписи. Используем хеш-значение, которое было получено ранее, и подставляем все переменные в формулу:

$$kH = (xr + S) \ \% \ q'. \qquad (6)$$

В конечном итоге мы получили открытый ключ (y,n) и закрытый ключ (r,S). Абонент А отправляет сообщение и открытый ключ абоненту Б. После всех действий отправителя, получатель имеет переданное сообщение (документ) с электронно-цифровой подписью (r,S), ему известен открытый ключ y, число a, составной модуль n и, так как данный канал подразумевает передачу секретного ключа, ему известно число x. Абоненту Б необходимо убедиться, что сообщение, которое он должен получить, действительно отправил абонент А. Для этого используется уравнение проверки подписи:

$$r^H = y^r * a^S \ \% \ n. \qquad (7)$$

Необходимо вычислить сначала левую часть

уравнения, а после правую. Если обе части равны, значит, электронно-цифровая подпись соответствует документу и сообщение является подлинным. В тех случаях, когда результаты левой и правой части различаются, подпись поддельная.

В качестве обозначения левой и правой части уравнения возьмем *lch* (формула (8)) и *pch* (формула (9)) соответственно:

$$lch = r^H \% n, \quad (8)$$

$$pch = y^r * a^S \% n. \quad (9)$$

Последним этапом является извлечение секретного сообщения по формуле (10), вытекающей из формулы (6), и дешифровка секретного сообщения по заранее разработанному алгоритму.

$$k = ((xr + S) \% q') / H. \quad (10)$$

Как говорилось ранее, при реализации данного скрытого канала необходимо передавать секретный ключ. В следующем способе рассмотрена схема, при которой данный недостаток отсутствует.

Реализация скрытого канала передачи информации без использования секретного ключа

Рассмотрим ситуацию, когда у отправителя нет доверия к получателю. В данном случае абонент Б заранее не получит секретный ключ *x*, но, в конечном итоге, все равно сможет восстановить секретное сообщение. Данный канал называется узкополосный. Его преимуществом является отсутствие необходимости подвергать отправителя риску компрометации секретного ключа. Из недостатков можно выделить повышенные требования к вычислительной мощности и ресурсам (памяти и процессору) [2].

Алгоритм практически не отличается от предыдущего за исключением уравнения формирования и проверки подписи вместо формулы (6) используется формула:

$$kS = (r + H) \% q'. \quad (11)$$

Выведем формулу нахождения второй части электронно-цифровой подписи (формула (12)) из формулы (11).

$$S = ((r + H) \% q') / k. \quad (12)$$

Формирование на электронно-цифровой подписи на данном этапе заканчивается. Необходимо проверить подпись на подлинность. Так как уравнение формирования подписи отличается от предыдущей ситуации, уравнение проверки будет иметь следующий вид (формула (13)). Аналогично поочередно вычисляем левую и правую часть уравнения (формулы (14-15)).

$$r^S = a^{(r+H)} \% n, \quad (13)$$

$$lch = r^S \% n, \quad (14)$$

$$pch = a^{(r+H)} \% n. \quad (15)$$

Абонент А отправляет абоненту Б сообщение с электронно-цифровой подписью *(r,S)* и открытый ключ *(y,n)*. Получатель восстанавливает секретное сообщение по формуле (16) и расшифровывает его с помощью подготовленного алгоритма:

$$k = (r + H) / S \% q'. \quad (16)$$

В двух предоставленных примерах злоумышленникам удастся передать по подсознательному каналу информацию, которая может повлечь за собой нарушение одной из фундаментальных основ информационной безопасности, а именно – конфиденциальность. К сожалению, обнаружить такие каналы передачи информации невозможно. В связи с тем, что секретное сообщение это просто число, а алгоритмов дешифрования передаваемого сообщения злоумышленники могут составить колоссальное количество, обнаружение скрытых каналов становится невыполнимой задачей. Кроме того, никто даже не будет догадываться о наличии такого канала.

Методы противодействия подсознательным каналам

Обнаружить подсознательные каналы невозможно, но можно им противодействовать. Подсознательные каналы базируются на том, отправителю дан выбор числа *k*. Генерацию данного числа доверить третьей стороне недопустимо, так как использование данного способа непременно раскроет секретный ключ подписи.

Рассмотрим первый способ модификации формирования электронно-цифровой подписи. В качестве мер защиты предлагается введения арбитра, который будет участвовать в формировании числа *k* [5]. Также он должен иметь возможность удостовериться, что при формировании подписи отправитель использовал совместно сгенерированное значение. Рассмотренные ранее алгоритмы необходимо дополнить следующими действиями:

1. Отправитель должен выбрать параметр *k*, сформировать значение *r* по формуле (5) и отправить его арбитру, который выступает проверяющей стороной.

2. На втором этапе арбитр генерирует число *k'* и отправляет его подписывающему.

3. В качестве числа *k* для формирования подписи, подписывающий использует число *kk'* и рассчитывает *r'* по формуле (17) и отправляет подпись арбитру:

$$r' = a^{(kk')} \% n. \quad (17)$$

4. На последнем этапе арбитр должен убедиться, что подписывающий действительно использовал совместно сгенерированное число *kk'*.

Проверка осуществляется по формуле:

$$r' = r^{(k')} \% n. \quad (18)$$

Для примера возьмем следующие исходные значения:

1. a = 2;
2. n = 33;
3. k = 5;
4. k'= 9.

Абонент А отправляет арбитру полученное значение r по формуле (5):

$$r = 2^5 \% 33 = 32.$$

Арбитр выбирает значение k' и абонент А высчитывает r' по формуле (17):

$$r' = 2^{45} \% 33 = 32.$$

В конечном итоге арбитр удостоверяется, что подписывающий действительно использовал значение kk' (формула (18)):

$$32 = 32^9 \% 33.$$

Как видно из уравнения абонент А действительно использовал значение kk', но стоит проверить уравнение и с исходным значением k:

$$32 = 32^5 \% 33.$$

При исходном значении k, вытекает аналогичное значение r', как и при значении kk'. Подберем другое значение k' и повторим эксперимент. Уменьшим значение k' на единицу. Тогда:

$$r = 2^5 \% 33 = 32;$$
$$r' = 2^{40} \% 33 = 1;$$
$$1 = 32^8 \% 33.$$

В случае использования отравителем исходного значения k, проверка не была бы пройдена. Предположим, что данные исходные значения не подходят для этого метода. Заменим исходные данные и повторим расчеты:

1. $a = 104$;
2. $n = 10817$;
3. $k = 5$;
4. k'=14.

Тогда:

$$r = 104^5 \% 10817 = 104;$$
$$r' = 104^{70} \% 10817 = 10816;$$
$$10816 = 104^{14} \% 10817.$$

Проверка пройдена, арбитр уверен, что абонент А использовал именно то число, которое было отправлено для проверки. Однако отправитель на шаге 3 мог использовать k=9. При данном значении параметр r будет также равен 104, а параметр r' будет равен 10816, что также позволит отправителю пройти проверку на шаге 4.

На основе изложенных выше теоретических выкладок можно сделать вывод о том, что данный метод не обеспечивает гарантии защиты от подсознательных каналов передачи информации и имеет уязвимость, которой злоумышленник может воспользоваться на шаге 3. Также стоит отметить, что ввод арбитра не всегда возможен. Как итог, данный способ не обеспечивает достаточную защиту от утечки конфиденциальной информации и является трудозатратным.

Второй способ противодействия подсознательным каналам заключается в изменении уравнения проверки подписи, точнее в ее упрощении [2]. Способ базируется на сложности извлечения корней по модулю [3]. В данной статье описана схема формирования подписи, где число r является электронно-цифровой подписью, которое вычисляется по формуле (5). В качестве мер защиты предлагается использование следующего уравнения проверки электронно-цифровой подписи:

$$r^y = y^H \% n. \quad (19)$$

Вычисление значения k по известным r и n в данном варианте на сегодняшний момент очень затруднительно. Для извлечения секретного сообщения необходимо столкнуться с задачей дискретного логарифмирования, эффективного способа решения которой не найдено. Данная мера защиты имеет большое преимущество перед первым вариантом модернизации алгоритма. Никаких изменений в алгоритме формировании подписи не производится, благодаря чему отсутствуют дополнительные нагрузки на вычислительную систему.

Вывод

На основании анализа двух способов противодействия скрытым каналам передачи информации, а именно: привлечение арбитра для формирования числа k и использование упрощенной формулы проверки подписи; можно сделать следующие выводы. В качестве мер защиты использование арбитра, является неоптимальным вариантом, причины тому следующие: во-первых, привлечение арбитра возможно далеко не всегда и требует выделения дополнительных средств; во-вторых, недостатком является то, арбитру дана возможность управления одной из частей подписи, это может привести к тому, что сам арбитр может встроить собственное секретное сообщение; в-третьих, существует риск использования иных чисел, при которых проверка арбитром будет пройдена успешно. Так как в электронно-цифровой подписи задействуются очень большие числа, данная ситуация мало вероятна, но все же риск есть. При реализации второго способа противодействия вероятность передачи секретного сообщения по подсознательному каналу значительно снижается. Получателю доступно недостаточное количество переменных для быстрого вычисления сообщения, а использование метода простого перебора может занять много времени.

Обнаружение подсознательного канала, который реализуется посредством использования уязвимости в алгоритмах электронно-цифровых подписей, является невыполнимой задачей, по крайней мере, на данный момент. Скрытый канал передачи информации никак не влияет на отправку сообщения и проверку электронной подписи. Секретное сообщение всегда является натуральным числом, и понять скрытый смысл этого числа может только человек, которому оно предназначалось. Так как расшифровка секрета осуществляется по заранее согласованному алгоритму, количество вариантов которого неограниченно, перебор разных вариантов дешифровки не принесет нужных результатов, займет много времени и ресурсов.

Подводя итоги, следует сказать, что невозможно полностью избавиться от подсознательных каналов, однако есть возможность снижения рисков утечки данных. Способов противодействия скрытым каналам мало, и они не гарантируют полную безопасность, однако их использование необходимо. Разработка новых методов является приоритетной задачей для обеспечения более надежной защиты информации в настоящем и будущем.

Литература

1. Simmons G. J. Subliminal Communiation is Easy Using the DSA // Advan es in Cryptology EUROCRYPT '93 Proeedings. Berlin: Springer-Verlag, 1994. Pp. 218-232.
2. Естественные и математические науки: вопросы и тенденции развития: материалы Международной заочной научно-практической конференции [Электронный ресурс] // СибАК. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01006608025 (дата обращения: 02.11.2022).
3. Молдовян Н.А. Криптография с открытым ключом / Н.А. Молдовян, А.А. Молдовян, М.А. Еремеев. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 288 с.
4. Ниссенбаум О.В. Криптографические протоколы: Учебное пособие. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2007. 139 с.
5. Создание скрытого канала [Электронный ресурс] // Studme.org. Режим доступа: https://studme.org/ 239589/ informatika/ sozdanie_ skrytogo_ kanala (дата обращения: 03.11.2022).

УДК 621.391

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕХВАТА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ ПАРАЗИТНОЙ (АВТО) ГЕНЕРАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ОБЪЕКТА РАЗВЕДКИ

FORMALIZED REPRESENTATION OF THE PROCESS OF INTERCEPTION OF HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC SIGNALS OF PARASITIC (AUTO) GENERATION IN THE TECHNICAL MEANS OF THE OBJECT OF EXPLORATION GENERATION IN THE TECHNICAL MEANS OF THE OBJECT OF EXPLORATION

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@yan.dex.ru

Алексей Вячеславович Потапов
кандидат технических наук
доцент кафедры
ФГБОУ ВО Калужский филиал
МГТУ имени Н.Э. Баумана
Тел.: +7 (953) 467-02-46
E-mail: potapov@bmstu.ru

Михаил Павлович Сычёв
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры
ФГБОУ МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 105005, Москва,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
Тел.: +7 (499) 263-67-92
E-mail: mps@bmstu.ru

Артём Михайлович Сычёв
доктор технических наук, доцент
профессор кафедры
ФГБОУ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Вадим Игоревич Спивак
аспирант кафедры «Защита информации»
ФГБОУ МГТУ им. Н.Э. Баумана
Тел.: +7 (903) 270-32-88
E-mail: vadimspivack@yandex.ru

Владислав Олегович Крылов
ассистент кафедры «Защита информации»
ФГБОУ МГТУ им. Н.Э. Баумана
Тел.: +7 (906) 720-87-25
E-mail: kvo@runsec.ru

Аннотация

Данная статья продолжает серию статей по вопросам функционального моделирования угроз утечки информации по параметрическим каналам, опубликованных в 2022 году в журналах «Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика», «Известия Института инженерной физики» и «Вестник Воронежского института МВД России». В ней рассматриваются функциональная и математические модели действий нарушителя по перехвату высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах. Приводятся результаты функциональной декомпозиции функциональных компонент структурного представления такого рода действий до уровня признаков выполнения нарушителем отдельных процедур в процессе реализации соответствующих режимов использования технических средств разведки (ТСР). Кроме того, приводятся математические модели временных характеристик как отдельных режимов использования ТСР для перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, так и этапа действий нарушителя в целом.

Ключевые слова: функциональное моделирование, перехват информации по параметрическим каналам, перехват высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах.

Summary
This article continues a series of articles on functional modeling of threats of information leakage through parametric channels, published in 2022 in the journals «Devices and Systems. Management, control, diagnostics», «Proceedings of the Institute of Engineering Physics» and «Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia». It examines the functional and mathematical models of the violator's actions to intercept high-frequency electromagnetic signals arising from the operation of generators that are part of the technical means of the object of exploration, and (or) parasitic (auto) generation in these means. The results of the functional decomposition of the functional components of the structural representation of such actions to the level of signs of the violator performing certain procedures in the process of implementing the appropriate modes of use of technical means of intelligence (TSR) are presented. In addition, mathematical models of the time characteristics of both individual modes of using TCP to intercept high-frequency electromagnetic signals arising from the operation of generators that are part of the technical means of the object of exploration, and (or) parasitic (auto) generation in these means, and the stage of the violator's actions as a whole are given.
Keywords: functional modeling, interception of information via parametric channels, interception of high-frequency electromagnetic signals arising from the operation of generators that are part of the technical means of the object of exploration, and (or) parasitic (auto) generation in these means.

Одной из наиболее серьезных угроз утечки речевой информации по техническим каналам является перехват информативных сигналов, возникающих за счет модуляции ими электрических сигналов радиоэлектронных устройств (РЭУ) при изменении параметров этих устройств. В большинстве случаев подобного рода изменения обусловлены физическими эффектами, характерными для электромагнитных полей высокой частоты (ВЧ) генерируемых элементами РЭУ [1]. Терминологически это обстоятельство выразилось в определения такого рода технических каналов утечки информации как параметрических [2]. Существующая классификация угроз безопасности информации относит параметрические каналов ее утечки к активным угрозам (в то время, как все остальные технические каналы утечки информации являются угрозами пассивного типа) [3]. Активный характер угроз утечки информации по параметрическим каналам обусловливает возможность идентификации всего набора признаков, характеризующих действия нарушителей по реализации такого рода угроз, что позволяет реализовать метод их динамической оценки [4]. Это относится и к рассматриваемой в данной статье угрозе перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах.

Возможность динамической оценки угроз рассматриваемого типа приводит к необходимости формирования структурированного пространства признаков, характерных процессу перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, и оценки временных характеристик реализуемых при этом режимов работы технических средств разведки (ТСР).

В [5] обосновано, что формирование структурированного пространства признаков, характерных угрозе утечки информации по параметрическим каналам может быть получено на основе соответствующей функциональной модели, построенной путем функциональной декомпозиции целевой функции угрозы.

Оценка временных характеристик режимов работы ТСР, реализуемых при перехвате информативных сигналов параметрического канала, предполагает необходимость разработки соответствующих математических моделей. При этом в функциональная модель, используемая при формировании структурированного пространства признаков, характерных угрозе, одновременно является и средством ее формализации для построения математических моделей временных характеристик отдельных функциональных компонент процесса перехвата информативных сигналов параметрического канала.

В соответствии с представленной в [5] обобщенной функциональной моделью угроз утечки информации по параметрическим каналам перехват высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, является пятым этапом действий нарушителя по реализации такого рода угроз (*рисунок 1*).

При описании модели возьмем за основу, используемую в [5-9] терминологию и обозначения.

Реализация данного этапа осуществляется путем последовательного выполнения двух режимов работы ТСР (*рисунок 2*):

● режима перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств и (или) паразитной (авто) генерации в технических средствах объекта разведки с помощью аппаратуры ведения акустической разведки (АР) по каналу паразитной (авто) генерации;

● режима повышения разборчивости перехваченных информативных акустических сигналов специальными программными (программно-аппаратными) методами.

На *рисунке 2* указанные режимы обозначены как p_{51} и p_{52}, соответственно.

Каждый из перечисленных режимов работы

Рис. 1. Обобщенная функциональная модель угроз утечки информации по параметрическим каналам

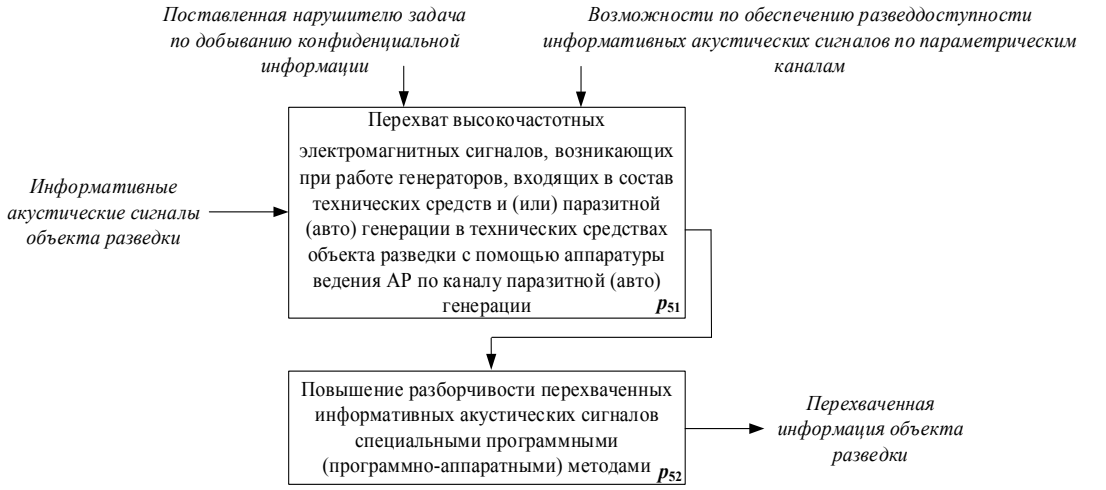


Рис. 2. Функциональная модель этапа перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах

ТСР реализуется совокупностью соответствующих процедур.

Режим p_{51} – перехват высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, составляют следующие процедуры (*рисунок 3*):

n_{511} – перехват электромагнитных сигналов генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, модулированных информативными акустическими сигналами на несущих частотах из базы разведопасных сигналов;

n_{512} – демодуляция информативных акустических сигналов из перехваченных электромагнитных сигналов.

Режим p_{52} – повышение разборчивости перехваченных информативных акустических сигналов специальными программными (программно-аппаратными) методами составляют следующие процедуры (*рисунок 4*):

n_{521} – шумоочистка информативных акустических сигналов, перехваченных по каналу паразитной (авто) генерации, методами адаптивной фильтрации;

n_{522} – повышение разборчивости сигналов, перехваченных по каналу паразитной (авто) генерации, методами компенсации искажений;

n_{523} – повышение разборчивости сигналов, перехваченных по каналу паразитной (авто) генерации, методами реконструкции сигнала.

Каждая из рассмотренных процедур процесса перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, представляется соответствующим признаком действий нарушителя (*таблица 1*). При этом индексация признаков в соответствующей колонке таблицы приводится с учетом того, что они дополняют приводимые в [6-9] множества признаков действий нарушителя по реализации первого, второго, третьего и четвертого этапов процесса перехвата информативных сигналов по параметрическим каналам. С учетом этого формируется общее пространство признаков распознавания:

- перехвата электрических сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами за счет акустоэлектрических преобразований во вспомогательные технические средства и систем (ВТСС) объекта разведки, линии которых имеют выход за пределы контролируемой зоны (КЗ);
- перехвата переизлученных ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в ВТСС объекта разведки;
- перехвата «навязанных» электрических ВЧ-сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в линиях ВТСС объекта разведки, имеющих выход за пределы КЗ;
- перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генера-

Рис. 3. Функциональная модель диаграмма режима перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах

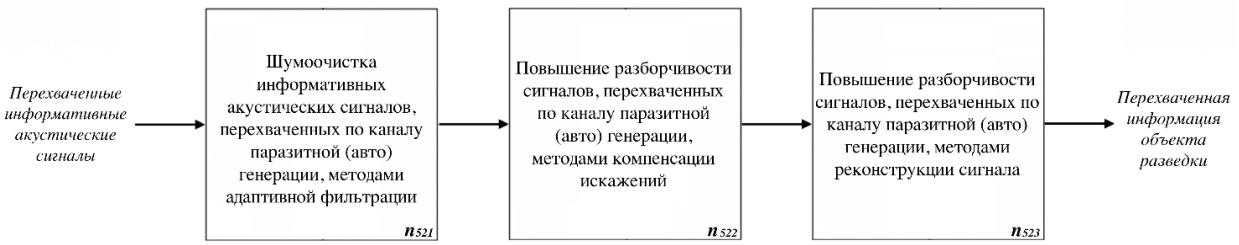


Рис. 4. Функциональная модель режима повышения разборчивости перехваченных информативных акустических сигналов специальными программными (программно-аппаратными) методами

торов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах.

Таким образом, сформированную функциональную модель процесса перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, следует рассматривать как предпосылку для формирования пространства распознаваемых признаков при решении задач синтеза моделей распознавания угроз утечки информации по параметрическим каналам [10].

При разработке математических моделей для оценки временных характеристик действий нарушителя по перехвату высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, воспользуемся результатами структуризации функционального представления соответствующей целевой функции. Учитывая, что функциональные модели такого рода угроз являются их формализованным представлением, структура математических моделей их характеристик будет аналогичной структуре рассматриваемой целевой функции. Отличие в структурном представлении функциональных моделей угроз утечки информации по каналам, образуемым путем перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, и математических моделей их характеристик будет состоять в композиционном построении структуры математических моделей, в отличие от декомпозиционного построения функционального представления целевой функции нарушителя. Кроме того, в отличие от трехуровневой структуры функциональных моделей угроз утечки информации по каналам рассматриваемого типа, структура математических моделей соответствующих характеристик будет двухуровневой за счет того, что множество $\{\tau(n_{ijk})\}$ временных характеристик выполняемых нарушителем процедур не определяется при помощи математических моделей, а являются исходными данными для соответствующих математических моделей временных характеристик режимов.

Характеристики $\{\tau(n_{ijk})\}$ задаются эмпирически и представляют собой случайные величины.

Первый (нижний) уровень структуры математических моделей характеристик угроз утечки информации по каналам, образуемым путем перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, представляется подмножеством $\{M(\overline{\tau}(p_{ij}))\}$ моделей для оценки средних значений времени реализации режимов работы ТСР в процессе перехвата информации по каналу рассматриваемого типа.

Второй уровень рассматриваемой структуры математических моделей представляется подмножеством $\{M(\overline{\tau}(э_i))\}$ моделей для оценки среднего значения времени реализации этапа перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) ге-

Таблица 1

Признаки действий нарушителя

№	Содержание признака	Обозначение процедуры	Обозначение признака
1	Перехват электромагнитных сигналов генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, модулированных информативными акустическими сигналами на несущих частотах из базы разведопасных сигналов	n_{511}	a_{511}
2	Осуществление демодуляции информативных акустических сигналов из перехваченных электромагнитных сигналов	n_{512}	a_{512}
3	Реализация методов адаптивной фильтрации для шумоочистки информативных акустических сигналов, перехваченных по каналу паразитной (авто) генерации	n_{521}	a_{521}
4	Реализация методов компенсации искажений для повышения разборчивости сигналов, перехваченных по каналу паразитной (авто) генерации	n_{522}	a_{522}
5	Реализация методов реконструкции сигнала для повышения разборчивости сигналов, перехваченных по каналу паразитной (авто) генерации	n_{523}	a_{523}

нерации в этих средствах.

Приводимые ниже выражения представляют собой аналитические модели для оценки временных характеристик процесса перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах. Модели строятся путем установления композиционных связей между характеристиками рассмотренных выше уровней. Вид математической модели определяется содержанием композиционных связей между компонентами соответствующей функциональной модели. Очевидно, что совокупность математических моделей, связывающих временные характеристики этих компонент обладает системными свойствами целостности и структурированности. В основе построения этих моделей лежат свойства линейности и аддитивности математического ожидания композиции случайных величин, характеризующих время реализации функциональных компонент [11].

Приводимые ниже выражения (1) и (2) представляют собой аналитические модели для оценки средних значений времени реализации режимов работы ТСР в процессе перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах.

В соответствии с приведенным на *рисунке 3* порядком выполнения процедур перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, среднее значение $\overline{\tau}(p_{51})$ случайной величины времени, затрачиваемого нарушителем на реализацию данного режима работы ТСР, определяется как:

$$\overline{\tau}(p_{51}) = \overline{\tau}(n_{511}) + \overline{\tau}(n_{512}), \quad (1)$$

где $\overline{\tau}(n_{511})$ и $\overline{\tau}(n_{512})$ – средние значения случайных величин $\tau(n_{511})$ и $\tau(n_{512})$ времени выполнения нарушителем процедур n_{511} и n_{512}, соответственно.

Приведенный на *рисунке 4* порядок выполнения процедур повышения разборчивости перехваченных информативных акустических сигналов специальными программными (программно-аппаратными) методами позволяет сформировать выражение для определения среднего значения $\overline{\tau}(p_{52})$ случайной величины времени, затрачиваемого нарушителем на реализацию данного режима работы ТСР, в виде:

$$\overline{\tau}(p_{52}) = \overline{\tau}(n_{521}) + \overline{\tau}(n_{522}) + \overline{\tau}(n_{523}), \quad (2)$$

где $\overline{\tau}(n_{521})$, $\overline{\tau}(n_{522})$ и $\overline{\tau}(n_{523})$ – средние значения случайных величин $\tau(n_{521})$, $\tau(n_{522})$ и $\tau(n_{523})$ времени выполнения нарушителем процедур n_{521}, n_{522} и n_{523}, соответственно.

В соответствии с приведенным на *рисунке 2* порядком реализации режимов работы ТСР в процессе перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, среднее значение $\overline{\tau}(э_5)$ случайной величины времени, затрачиваемого нарушителем на реализацию данного этапа, определяется как:

$$\overline{\tau}(э_5) = \overline{\tau}(p_{51}) + \overline{\tau}(p_{52}), \quad (3)$$

где $\overline{\tau}(p_{51})$ и $\overline{\tau}(p_{52})$ определяются в соответствии с выражениями (1) и (2).

Очевидно, что рассмотренные в данной статье функциональные и математические модели процесса перехвата высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, а также рассмотренные в [6-9] функциональные модели процессов поиска мест разведдоступности ЭМИ, возникающего при целенаправленном облучении РЭУ ВТСС специальными ВЧ-генераторами; перехвата электрических сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами за счет акустоэлектрических преобразований в радиоэлектронных устройствах объекта разведки; перехвата переизлученных высокочастотных сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами и «навязанных» высокочастотных электрических сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами в линиях ВТСС объекта разведки, имеющих выход за пределы КЗ, в совокупности обеспечивают полноту представления действий нарушителя по реализации угроз утечки информации по параметрическим каналам.

Кроме того, рассмотренные методики формализации действий нарушителя по перехвату высокочастотных электромагнитных сигналов, возникающих при работе генераторов, входящих в состав технических средств объекта разведки, и (или) паразитной (авто) генерации в этих средствах, позволяют решить весьма актуальную на сегодняшний день проблему – проблему формирования методического аппарата для разработки математических моделей, адекватно характеризующих процессы предотвращения утечки информации по параметрическим каналам [12].

Литература

1. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок: уч. пособие. М.: ИПЦ «Маска», 2017. 638 с.
2. Техническая защита информации: учеб. пособие для студ. учреждений высш. образования / С.В. Скрыль, А.М. Сычев, В.О. Крылов, В.И. Спивак [и др.]; под ред. С.В. Скрыля. М.: Издательский центр «Академия», 2021. 240 с.
3. Основы информационной безопасности: учебное пособие для вузов / Е.Б. Белов, В.П. Лось, Р.В. Мещеряков, А.А. Шелупанов. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 544 с.
4. Скрыль С.В., Никулин С.С., Крылов В.О. Оцениваемые параметры модели динамической оценки угроз перехвата информации по параметрическим каналам // Охрана, безопасность, связь – 2020: сборник статей. Вып. 6. Ч. 2. Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2021. С. 145-155.
5. Функциональные аспекты моделирования процесса перехвата информативных сигналов по параметрическим каналам / М.П. Сычев [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2022. №2. С. 22-33.
6. Процесс поиска мест разведдоступности параметрических каналов утечки информации как объект функционального моделирования / М.П. Сычев [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2022. № 3. С. 31-39.
7. Функциональная модель процесса перехвата электрических сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами за счет акустоэлектрических преобразований в радиоэлектронных устройствах объекта разведки / М.П. Сычев [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2022. № 6. С. 33-37.
8. Функциональное моделирование как инструмент формализации процесса перехвата переизлученных высокочастотных сигналов, модулированных информативными акустическими сигналами / С.В. Скрыль, С.С. Никулин, А.И. Бороненков [и др.] // Известия Института инженерной физики, 2022. №4(66). С. 57-61.
9. Формализованное представление действий нарушителя по перехвату «навязанных» высокочастотных электрических сигналов / Т.В. Мещерякова, С.С. Никулин, А.И. Бороненков // Вестник Воронежского института МВД России, 2022. № 4 С. 141-151.
10. Теоретические основания синтеза модели распознавания угроз утечки информации по параметрическим каналам в процессе управленческой деятельности / М.П. Сычев, С.В. Скрыль [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры, 2019. №8. С. 52-60.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.
12. Математическое моделирование процессов предотвращения утечки информации по параметрическим каналам в процессе управленческой деятельности / С.В. Скрыль, Т.В. Мещерякова, А.И. Бороненков [и др.] // Вопросы радиоэлектроники, 2021. Т. 50, №4. С. 39-48.

УДК 52.65

СЕЛЕКЦИЯ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ АТМОСФЕРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА МАЛОБАЗОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ГРУППАХ

SELECTION OF INFRASOUND SIGNALS OF ATMOSPHERIC NUCLEAR EXPLOSIONS ON LOW-PHASE ACOUSTIC GROUPS

Антон Николаевич Мамонтов
кандидат технических наук
ведущий научный сотрудник 1 центра
научно-исследовательского
(специального контроля)
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России
Адрес: 141300, Московская обл.,
г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 26
Тел.: +7 (966) 112-66-99
E-mail: fgu12tsnii@mil.ru

Андрей Викторович Роговой
кандидат технических наук
ведущий научный сотрудник 1 отдела 1 центра
научно-исследовательского
(специального контроля)
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России
Адрес: 141300, Московская обл.,
г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 26
Тел.: +7 (909) 933-58-11
E-mail: fgu12tsnii@mil.ru

Мирослав Здравков Горанов
младший научный сотрудник 2 отдела 1
центра
научно-исследовательского
(специального контроля)
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России
Адрес: 141300, Московская обл.,
г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 26
Тел.: +7 (953) 978-12-30
E-mail: fgu12tsnii@mil.ru

Андрей Юрьевич Малышев
кандидат технических наук
ведущий научный сотрудник
1 научно-исследовательского управления
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России
Адрес: 141300, Московская обл.,
г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 26
Тел.: +7 (925) 474-41-24
E-mail: fgu12tsnii@mil.ru

Роман Владимирович Орехов
начальник лаборатории 1 отдела 1 центра
научно-исследовательского
(специального контроля)
ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России
Адрес: 141300, Московская обл.,
г. Сергиев Посад-7, ул. Весенняя, 26
Тел.: +7 (925) 821-94-74
E-mail: fgu12tsnii@mil.ru

Аннотация

В настоящей работе проводится теоретическое обоснование математического аппарата селекции инфразвуковых источников по скоростям распространения сигналов на трассах, отклонению азимутов прихода сигналов на инфразвуковые станции Международной системы мониторинга Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, а также коэффициентам корреляции сигналов на каналах станции и параметрам STA/LTA. На основе синергии методов максимального правдоподобия, азимутального и гиперболического методов местоопределения, корреляционного и STA/LTA методов обнаружения и метода Монте-Карло выбирается критерий принятия решения и строится оптимальная рабочая характеристика селекции.

Ключевые слова: селекция инфразвуковых источников, энергетические характеристики сигналов.

Summary

In this paper, a theoretical substantiation of the mathematical apparatus for selecting infrasound sources is carried out by the propagation speeds of signals on the routes, the deviation of the azimuths of the arrival of signals to the infrasound stations of the International Monitoring System Agreements on the Comprehensive Nuclear Test Ban, as well as the correlation coefficients of signals on the station channels and STA/LTA parameters. Based on the synergy of maximum likelihood methods, azimuthal and hyperbolic location methods, correlation and STA/LTA detection methods and the Monte-Carlo method, a decision criterion is selected and an optimal selection performance is constructed.

Keywords: selecting infrasound source, energy characteristics of signals.

Крайнее обострение международной военно-политической обстановки актуализирует проблему контроля ядерных испытаний (ЯИ). В этих условиях важной становится задача оптимизации использования Службой специального контроля (ССК) Минобороны России информации от инфразвуковых станций Международной системы мониторинга (МСМ) Договора о всеобъемлющем запрещений ядерных испытаний (ДВЗЯИ), расположение которых представлено на *рисунке 1*.

В алгоритмах Международного центра данных (МЦД) инфразвуковые сигналы ассоциируют с источником, если скорость V их распространения на трассе попадает в заданные пределы (например, от 280 м/с до 340 м/с), аналогично поступают по отклонению азимута α [1-2]. Обнаружение сигналов на инфразвуковых станциях (ИС) проводится в МЦД по коэффициентам корреляции ρ на каналах ИС с использованием пороговых алгоритмов. Таким образом, селектор инфразвуковых источников, используемый в МЦД (и аналогичный для ССК), не является оптимальным даже при заданном наборе (α_i,V_i,p_i) используемых параметров на каждой i-й станции сети, поскольку обнаруженные и прошедшие селектор источники не обладают свойством максимального правдоподобия [3,4].

В ССК при работе изделия К-806 образуется большое количество ложных инфразвуковых источников, так как алгоритмы обнаружения используют только энергетические характеристики сигналов (коэффициенты корреляции, STA/LTA, спектры и т.п.), а требуется высокая (выше 0,95) вероятность обнаружения сигналов. Это связано с требованием концепции развития ССК по обнаружению источников с вероятностью не ниже 0,9. Для селекции ложных псевдоимпульсных источников инфразвука существует ряд методов [5], но большинство из них требует высокого отношения сигнал/шум, а это условие часто не выполняется. Поэтому для ССК актуальна задача разработки алгоритма селекции ложных инфразвуковых источников по параметрам местоопределения, тем более что в сейсмическом методе такой подход уже используется [5].

Для решения поставленной задачи авторами статьи используется метод имитационно-статистического моделирования (Монте-Карло). Моделируется K одинаковых источников. С помощью генератора случайных чисел и законов вероятностного распределения $P_\alpha(\alpha)$ отклонения зарегистрированного на станции азимута, $P_V(V)$ распределения скоростей в каждом эксперименте №i генерируется на каждой станции отклонение азимута $\alpha_{i,j}$ и значение скорости прихода сигнала $V_{i,j}$. Это позволяет вычислить сетевое отношение правдоподобия:

$$\Lambda_{V\alpha}(i)=\prod_{j=1}^{N}\frac{P_{\alpha m}(\alpha_{i,j})}{m_\alpha}\cdot\frac{P_{Vm}(V_{i,j})}{m_V}, \qquad (1)$$

где введены следующие обозначения:
m_α – количество ячеек (диапазонов) в гистограмме распределения отклонения азимутов прихода сигнала на станцию от азимутов на источник;
$P_{\alpha m}(\alpha_{i,j})$ – вероятность того, что отклонение азимута на станции № j от направления на и $\alpha_{i,j}$;
m_V – количество ячеек (диапазонов) в гистограмме распределения скоростей распространения

Рис. 1. Расположение инфразвуковых станций МСМ ДВЗЯИ на карте мира

сигнала по трассе источник – станция;

$P_{Vm}(V_{i,j})$ – вероятность того, что скорость распространения сигнала по трассе от источника № i на станцию № j находится в интервале скоростей, содержащем значение $V_{i,j}$.

В выражении (1) учитывалось, что в отсутствии источника, вероятности отклонений азимутов и значения скоростей распределены равномерно.

Результаты алгоритма обнаружения тоже должны использоваться для решения задачи селекции. Целесообразно использовать не только коэффициент корреляции ρ на каналах ИС МСМ, но и отношение амплитуд STA/LTA в коротком и длинном временном окне [6,7]. Моделирование $\rho_{i,j}$ и $\text{STA/LTA}_{i,j}$ проводится путем моделирования амплитуды $A_{i,j}$ сигнала для источника № i мощностью Q, с последующим наложением его на случайный фрагмент реального фона данной ИС № j [7,8].

Кроме того, необходимо учесть результаты частотной фильтрации. Для атмосферных ядерных взрывов (АЯВ) 90% энергии содержится в полосе частот $[0{,}5{\cdot}F;\ 2F]$, где F – основная частота сигнала, т.е. величина обратная основному периоду.

Зависимость амплитуды A и частоты F сигнала от мощности источника Q и его удаленности R до станции целесообразно оценивать по результатам многолетних экспериментов, обобщенных в одной из работ ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России:

$$lg\,A = K_1 + K_2{*}\,lg\,Q + K_3{*}\,lg\,R + K_4{*}C{*}sin\theta + \vartheta, \quad (2)$$

$$lg\,F = K_5 + K_6{*}\,lg\,Q + K_7{*}\,lg\,R + K_8{*}C{*}sin\theta, \quad (3)$$

$$C = cos[n\,(m-1)/6], \quad (4)$$

где введены следующие обозначения:

m – порядковый номер месяца регистрации,

θ – азимут направления от источника на пункт регистрации,

ϑ – нормальная случайная величина с нулевым средним и единичной дисперсией,

$K_1 \ldots K_8$ – коэффициенты (константы) значения которых в данной статье не приводятся.

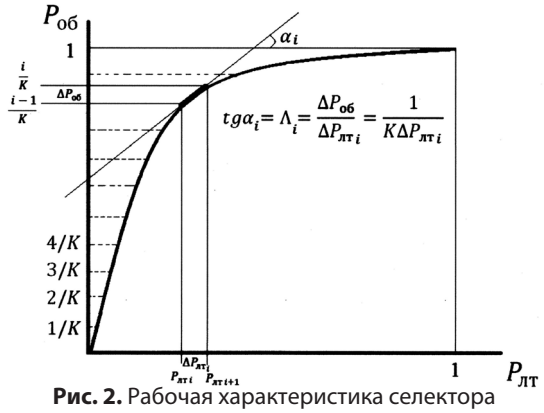


Рис. 2. Рабочая характеристика селектора

Выражения (2-4) получены на основе регистрации сигналов от АЯВ на отечественных испытательных полигонах в 1961-1962 гг.

В результате получим:

$$\Lambda(i) = \prod_{j=1}^{N} \frac{P_{\alpha m}(\alpha_{i,j})}{m_\alpha} \cdot \frac{P_{Vm}(V_{i,j})}{m_V} \cdot \Lambda_{\rho,\frac{STA}{LTA}}\left(\rho_{i,j}, \frac{STA}{LNA_{i,j}}\right), \quad (5)$$

где

$$\Lambda_{\rho,\frac{STA}{LTA}}\left(\rho_{i,j}, \frac{STA}{LNA_{i,j}}\right)$$

отношения правдоподобия по параметрам обнаружения сигнала $\rho_{i,j}\ u\ \frac{STA}{LNA_{i,j}}$.

Массив $\Lambda(i)$ следует расставить в порядке убывания, после чего определить пороговое значение $\Lambda_{пор}$ по требуемой вероятности селекции $P_{сел} = 0{,}95$:

$$\Lambda_{пор} = \Lambda(P_{сел}{\cdot}K). \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что если выставлять порог селекции по сетевому отношению правдоподобия, то в случае K истинных источников порог преодолеют только M из них:

$$M = P_{сел}{\cdot}K. \quad (7)$$

Таким образом, если для обнаружения источника выполняется условие:

$$\Lambda(i) = \prod_{j=1}^{N} \frac{P_{\alpha m}(\alpha_{i,j})}{m_\alpha} \cdot \frac{P_{Vm}(V_{i,j})}{m_V} \cdot \Lambda_{\rho,\frac{STA}{LTA}}\left(\rho_{i,j}, \frac{STA}{LNA_{i,j}}\right) \geq \Lambda_{пор}, \quad (8)$$

то источник считается прошедшим селектор.

Вероятность ложных тревог $P_{ЛТ}$ вычисляется по формуле, апробированной многократно на международных научно-технических конференциях, форумах, в ходе выполнения научно-исследовательских работ [3,4,6-10]:

$$P_{ЛТ} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{Pсел\cdot K} \frac{1}{\Lambda(i)}. \quad (9)$$

Выражение (9) представляет собой рабочую характеристику (РХ) селектора. Поскольку пространство наблюдений структурировано по отношению правдоподобия, то полученная РХ близка к оптимальной по критерию Неймана-Пирсона (*рисунок 2*). Введем обозначения: $\Lambda_i \equiv \Lambda(i)$ и $P_{об} \equiv P_{сел}$.

Важным условием является достаточно большая величина K, которая уменьшает погрешность построения РХ. Если при увеличении K вдвое вероятность $P_{ЛТ}$ для заданной величины $P_{сел}$ изменится меньше чем на 1%, то дальнейшее увеличение K не требуется:

$$\left|1 - \frac{\frac{1}{K}\sum_{l=1}^{Pсел\cdot K} \Lambda_l^{-1}}{\frac{1}{2K}\sum_{l=1}^{Pсел\cdot 2K} \Lambda_l^{-1}}\right| \leq 0{,}01. \quad (10)$$

Таким образом, разработанный научно-методический аппарат селекции импульсных источников инфразвука (1-10) основан на синергии азимутального и гиперболического методов ме-

стоопределения, корреляционного и STA/LTA методов обнаружения, метода максимального правдоподобия, метода Монте-Карло и использовании статистики МЦД по инфразвуковым станциям МСМ. Он может быть реализован в ССК с целью повышения эффективности инфразвукового метода контроля – минимизирует вероятность ложных тревог при заданной вероятности обнаружения АЯВ.

Литература

1. A.M. Runco. Detection Optimization of the Progressive Multi-Channel Correlation Algorithm Used in Infrasound Nuclear Treaty Monitoring, Air Force Institute of Technology, 2013.
2. Roman Le Bras, Jan Wuster. IDC Processing of Seismic, Hydroacoustic and Infrasonic Data (Manual), CTBTO Preparatory Commission, 2021.
3. Рыбин И.А., Роговой А.В., Градусов И.Н., Книга С.Н., Горанов М.З. и др. Алгоритм оценки эффективности сетевой селекции инфразвуковых сигналов. Материалы международной научно-технической конференции SnT-2021. Вена: ОДВЗЯИ, 2021.
4. Роговой А.В., Фролкин И.В., Горанов М.З., Градусов И.Н. Метод местоопределения импульсных инфразвуковых источников на основе отношения правдоподобия. Сборник статей 12-й научной роты. ФГКУ «12 ЦНИИ» МО РФ, 2020.
5. Физика ядерного взрыва. Т. 5. Контроль ядерных испытаний. 12 ЦНИИ МО. М.: Наука, 2017. 787с.
6. Роговой А.В., Рыбин И.А. Алгоритм оптимизации комплексирования методов контроля ДВЗЯИ при решении задач МСМ и ИНМ. Материалы международной научно-технической конференции SnT-2019. Вена: ОДВЗЯИ, 2019.
7. Рыбин И.А., Роговой А.В., Мамонтов А.Н., Долгов Д.В., Фролкин И.В. и др. Перспективные методы обработки инфразвуковой информации в ССК на основе использования отношения правдоподобия. Материалы научно-технической конференции по перспективам развития ССК. ССК, 2018.
8. Рыбин И.А., Роговой А.В. Методы оптимизации сетевой параметрической селекции инфразвуковых сигналов. Материалы международной научно-технической конференции SnT-2017. Вена: ОДВЗЯИ, 2017.
9. Роговой А.В., Фролкин И.В., Градусов И.Н., Астахов А.В., Рыбин И.А. и др. Метод определения координат инспекции на месте. Материалы международной научно-технической конференции SnT-2021. Вена: ОДВЗЯИ, 2021.
10. Роговой А.В., Фролкин И.В., Градусов И.Н., Горанов М.З. Комплексный алгоритм местоопределения импульсных инфразвуковых источников и района инспекции на месте. Сборник статей 12-й научной роты. ФГКУ «12 ЦНИИ» МО РФ, 2020.

УДК 528.852

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ГРУППОВОЙ ЦВЕТОВОЙ КОРРЕКЦИИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

ANALYSIS OF ALGORITHMS OF GROUP COLOR CORRECTION OF MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES

Никита Алексеевич Сайфутдинов
бакалавр
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Евгений Владимирович Вершинин
кандидат физико-математических наук, доцент
заместитель директора по науке
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: 8 (910) 510-73-50
E-mail: vershinin@bmstu.ru

Денис Михайлович Колпаков
ведущий инженер-исследователь
АО «ТЕРРА ТЕХ»
Адрес: 115230, Москва,
Каширское шоссе, д. 3, корп. 2, строен. 4
Тел,: +7 (495) 745-59-57
E-mail: info@terratech.ru

Аннотация
В статье описан анализ алгоритмов групповой цветовой коррекции на основе алгоритма создания бесшовного покрытия по снимкам мультиспектральной космической съемки. Представлены и проанализированы результаты работы каждого алгоритма на снимках одного сезона, разных сезонов, разной облачности. Описаны достоинства, недостатки и варианты улучшения конечного результата.
Ключевые слова: бесшовное покрытие, цветовая коррекция изображений, спутниковые снимки, мозаика.

Summary
The article describes the analysis of group color correction algorithms based on the algorithm of creating a seamless coverage on multispectral satellite imagery. The results of the work of each algorithm on images of the same season, different seasons, and different cloudiness are presented and analyzed. The advantages, disadvantages and options for improving the result are described.
Keywords: seamless coverage, image color correction, satellite imagery, mosaic.

Введение

Для построения геоинформационных систем (далее ГИС), основанных на обработке данных, а также для ГИС, визуализирующих данные, часто возникает необходимость в использовании набора спутниковых изображений. Спутниковые изображения, предоставляемые различными поставщиками космической съемки, часто имеют различные дефекты, а также отличия. К таким дефектам могут относиться различная контрастность, сдвиг в позиционировании, блики и пробелы в данных [1].

Для ГИС, обрабатывающих данные, дефектные или отличающиеся друг от друга изображения вносят различные искажения и неточности в результаты обработки. Для ГИС, визуализирующих данные, подобные изображения плохо сказываются на восприятии человеком и сразу бросаются в глаза.

В данной статье рассматриваются различные алгоритмы, способствующие решению проблемы различий в цветовых отличиях изображений. Рассматриваемые алгоритмы позволяют организовывать произвольное количество изображений в группу снимков, создающих бесшовное покрытие [2].

Алгоритм создания бесшовного покрытия

Бесшовное покрытие представляет собой группу изображений, полученных путем применения алгоритмов коррекции изображений, позволяющих нивелировать различия изображений в цвете, для достижения плавного, невидимого перехода между изображениями.

Алгоритм создания бесшовного покрытия состоит из следующих этапов:

1. Выбирается опорный снимок. В исследуемой реализации в качестве опорного снимка выступает космический снимок, имеющий наименьшую облачность среди заданной группы снимков.

2. Для выбранного опорного снимка находятся все смежные снимки, по которым еще не производилась обработка. Для каждой пары исходного снимка и смежного с ним применяется алгоритм коррекции изображений. Результатом применения является новый снимок, полученный из смежного снимка, скорректированный по цвету с опорным. Опорный снимок не изменяется.

3. Каждый смежный снимок становится опорным снимком, и применяется шаг 2 до тех пор, пока все снимки из заданной группы не будут обработаны.

Описанный алгоритм реализует обработку снимков путем построения дерева, составленного из опорных снимков, являющихся родительскими узлами, и смежными с ними снимками, являющихся потомками. С использованием такого подхода можно применять алгоритмы цветовой коррекции, работающие только с двумя снимками.

Алгоритмы цветовой коррекции изображений и используемые данные

Для исследования описанного алгоритма были выбраны следующие алгоритмы цветовой коррекции изображений:

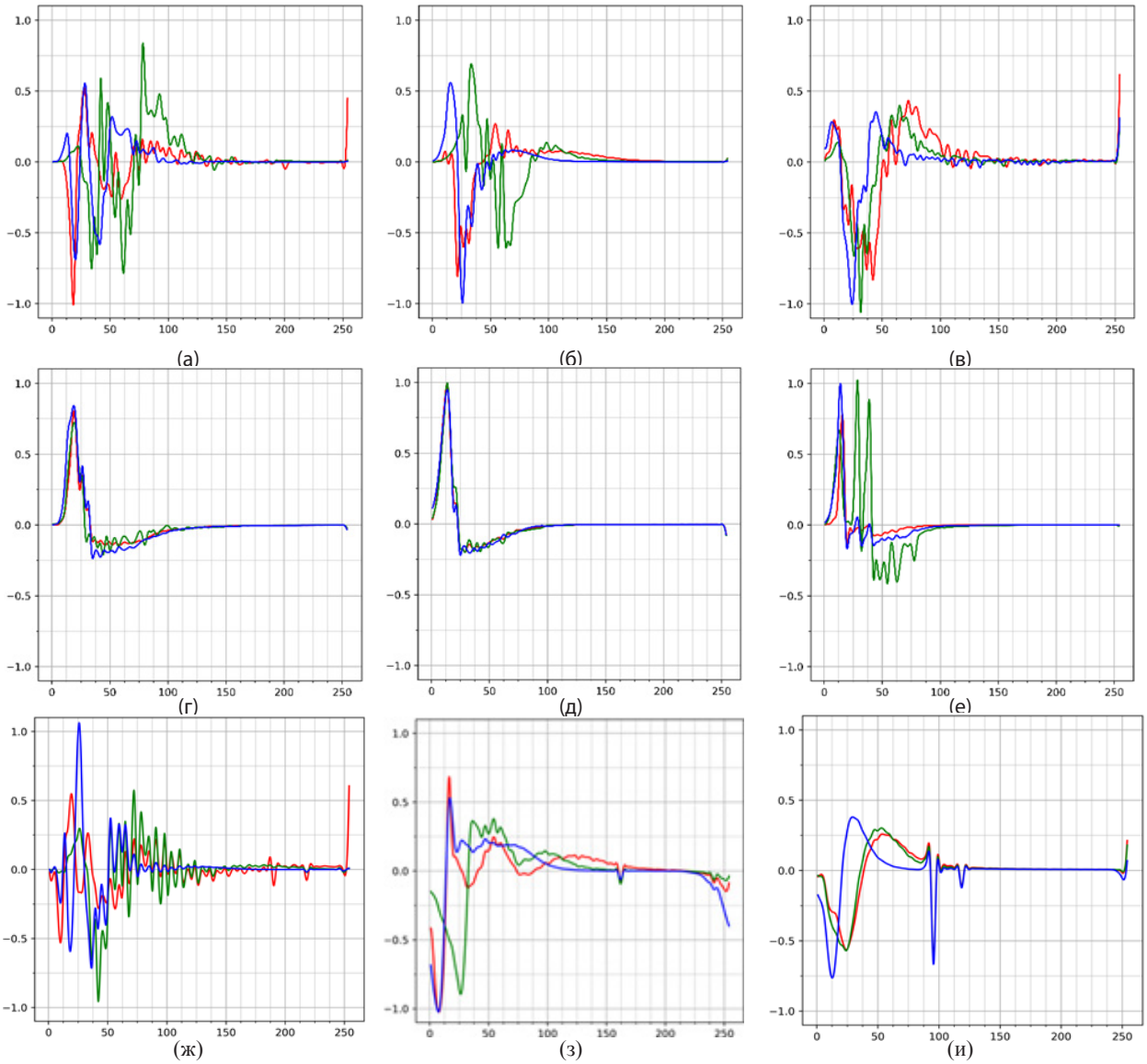


Рис. 1. Нормализованные линейные расстояния между гистограммами исходного снимка и результата. (а), (б), (в) – алгоритм эквайлизации гистограмм; (г), (д), (е) – алгоритм точной эквализации гистограмм; (ж), (з), (и) – алгоритм соответствия распределения функции. (а), (г), (ж) – один сезон; (б), (д), (з) – разные сезоны, (в), (е), (и) – разная облачность

1. Алгоритм эквализации гистограмм [3]. Алгоритм реализует преобразование целевого изображения путем изменения его гистограммы таким образом, чтобы ее распределение приближалось к распределению опорной гистограммы, путем применения кумулятивной функции распределения. В исследуемой реализации в качестве опорной гистограммы выступает гистограмма опорного изображения с целевым изображением, смежным с ним.

2. Алгоритм точной эквализации гистограмм [4]. По своей структуре этот алгоритм является подвидом группы алгоритмов эквализации гистограмм, но является более точным, относительного первого алгоритма.

3. Алгоритм соответствия распределения функции [5]. Алгоритм выравнивает цветовые гистограммы, либо среднее значения и ковариацию исходных данных по отношению к целевому домену изображения.

Для статистического и визуального анализа в качестве используемых данных выбраны следующие группы спутниковых изображений дистанционного зондирования Земли.

1. Группа малооблачных изображений, полученных в результате поиска в летний сезон за разные года.

2. Группа малооблачных изображений, полученных в результате поиска за разные сезоны, исключая зимний период, за разные года.

3. Группа изображений с различной облачностью, полученных в результате поиска в осенний период за разные года.

Все выбранные изображения приведены в 8-ми битном представлении истинного цветового отображения видимого спектра мультиспектральных спутниковых снимков Sentinel-2 второго уровня обработки.

Результаты

Статистический анализ заключается в расчете нормализованного линейного расстояния гистограмм результатов работы алгоритмов относительно исходных данных для каждого канала. Приведенные на *рисунке 1* графики позволяют оценить вносимые искажения работы алгоритмов в гистограммы снимков, а также проанализировать распределения отклонений относительного каждого канала снимков.

Из графиков видно, что наибольшие отклонения в результаты вносит алгоритм эквализации гистограмм. На *рисунке 2* представлены примеры результатов работы каждого алгоритма по данным в пределах одного сезона.

По представленным примерам видно, что алгоритм эквализации гистограмм лучше всего создает бесшовное покрытие, получая результат практически без видимых искажений изображений. Алгоритм точной эквализации гистограмм больше всего вносит искажения, которые влияют на отображение водной поверхности, приводя ее цвет к ярко зеленому. Алгоритм соответствия распределению функции дал наихудший результат с точки зрения визуального анализа, внося искажения в вегетативную составляющую подстилающей поверхности, искажая ее путем приведения цвета к фиолетовому. Аналогичные искажения вносят алгоритмы в снимки разных сезонов с одинаковой или разной облачностью. Также все алгоритмы накапливают соответствующие ошибки относительно углубления прохода по циклу алгоритма создания бесшовного покрытия.

Заключение

Полученные результаты не полностью удовлетворяют поставленной задаче генерации

(а) (б) (в)

Рис. 2. Примеры результатов работы алгоритмов по данным одного сезона: (а) – алгоритм эквализации гистограмм, (б) – алгоритм точной эквализации гистограмм, (в) – алгоритм соответствия распределению функции

бесшовного покрытия снимков из-за наличия явных искажений. Для усовершенствования результата можно использовать следующие модификации и подходы:

1. Использование другого подхода для выбора соседних снимков – выбирать ближайшие наименее облачные снимки, выбирать ближайшие по распределению гистограммы, что позволяет учесть различную семантику снимков.

2. Возможен вариант, основанный на коррекции гистограммы сразу для всех снимков. Для этого необходимо рассчитать усредненную (или иную другую) гистограмму, удовлетворяющую общему распределению данных со всех снимков.

3. Реализовать алгоритм генерации бесшовного покрытия путем обработки изображений на пиксельном уровне. Примером такой реализации может относится перемешивание пикселей на стыке снимков и дальнейшее сглаживание.

4. Использовать подход, основанный на выделении определенного слоя подстилающей поверхности, и применении к этому слою алгоритмов обработки изображений, основанных на коррекции гистограмм [6].

5. Использовать подходы, основанные на нейронных сетях. К примеру, возможно адаптировать сверточные нейронные сети, архитектура которых решает задачи регрессии.

Представленный алгоритм создания бесшовного покрытия имеет ряд преимуществ:

1. В описанной реализации легко модифицировать этап коррекции изображений путем замены на любой другой алгоритм.

2. Процесс работы алгоритма представляет собой пакетную обработку, которую возможно запускать параллельно, а также экономить ресурсы за счет запуска на малых партиях данных.

Литература

1. Колпаков Д.М. Расчет маски облаков по изображениям предварительного просмотра мультиспектральных спутниковых снимков / Д.М. Колпаков, Е.В. Вершинин, Е.В. Зеленцова // Известия Института инженерной физики, 2022. №2(64). С.61-63.

2. Васильев А.И. Стандартная обработка данных КШМСА КА «Ресурс-П» в обеспечение автоматического формирования бесшовного сплошного покрытия / А.И. Васильев, А.В. Крылов, А.В. Панкин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. Т.16. №2. С.18-28.

3. Равшанов Н. Повышение резкости изображения с использованием эквализации гистограммы под-изображения / Н. Равшанов, Ш.М. Суванов, О.А. Сайтиев // Проблемы вычислительной и прикладной математики, 2019. №6(24). С.37-43.

4. Zhao L. An Edge-Guided Exact Histogram Specification Method for Enhancing Extremely Dark Images / L. Zhao, Y. Wan // Proceedings of 2018 International Computers, Signals and Systems Conference, ICOMSSC 2018, Dalian, 28-30 сентября 2018 года. Dalian, 2018. Pp.407-411.

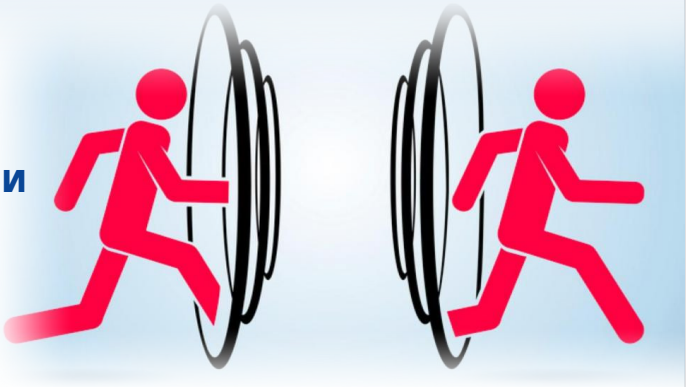
5. Abramov A., Bayer C., Heller C. Keep it Simple: Image Statistics Matching for Domain Adaptation // ArXiv, 2020.

6. Kang Y., Pan L., Zhang T., Zhang S., Liu X. Automatic mosaicking of satellite imagery considering the clouds // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 23-nd ISPRS Congress, 2016. V.III-3. Pp.415-421.

УДК 539.182

ОСОБЕННОСТИ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ NV–ЦЕНТРОВ В НЕЛОКАЛЬНОСТИ ЗАПУТАННОСТИ И ТЕЛЕПОРТАЦИИ

FEATURES OF QUANTUM STATES OF NV CENTERS IN THE NON–LOCALITY OF ENTANGLEMENT AND TELEPORTATION



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 работе мы изучаем роль оптического интерфейса и квантовой интерференции двух неразличимых фотонов в создании квантовой запутанности пространственно разделенных NV-центров.
Ключевые слова: электромагнитный вакуум, квантование, электрон,-атомные твердотельные системы, спин, запутывание, телепортация, нелокальность, интерференция, тождественные поля, спин-фотон интерфейс.

Summary
In this paper, we study the role of the optical interface and quantum interference of two indistinguishable photons in creating quantum entanglement of spatially separated NV centers.
Keywords: electromagnetic vacuum, quantization, electron, atomic solid state systems, spin, entanglement, teleportation, nonlocality, interference, identical fields, spin-photon interface.

Введение. Оптический интерфейс и квантовая интерференция двух неразличимых фотонов в разделенных центрах

Реализация нелокальной квантовой телепортации на основе твердотельных систем требует реализации квантового запутывания дистанционно разделенных двух или более квантовых систем, связанных с одиночными оптическими фотонами, то есть создания многоканального синхронного спин-фотонного запутывания, что представляет собой непростую задачу [1-6].

Кроме того, дополнительно в такой постановке, очень важным является получение и использование от различных источников неразличимых тождественных фотонов, которые при направлении их в светоделитель могли бы осуществлять квантовую интерференцию [1,2,7], так что при последующей операции детектирования происходило бы запутывание между спин-электронными кубитами, рассматриваемых квантовых систем (геральдово или обьявленное запутывание) [8,9].

Интерференционный эффект наблюдался для фотонов, испускаемых парами атомов и захваченных ионов, и использовался для генерации запутывания удаленных захваченных ионов [2]. В то время как изолированные атомы и ионы, которые номинально идентичны, являются естественным источником неразличимых фотонов, распространение этих идей на системы конденсированных сред может быть сложной задачей, поскольку два твердотельных излучателя обычно различимы из-за их различных локальных сред.

Азот-вакансионный NV-центр является одним из перспективных кандидатов для реализации такой задачи с твердотельными кубитами. Основное состояние отрицательно заряженного NV-центра представляет собой электронный спиновый триплет с расщеплением нулевым полем 2,88 ГГц состояний $|m_s=0>$ и $|m_s=\pm1>$

(обозначаемые $|0\rangle$ и $|\pm1\rangle$). Благодаря длительному времени когерентности, быстрому микроволновому манипулированию, а также оптической подготовке и обнаружению, электронный спин NV вместе с испускаемым фотоном может реализовать спин-фотонный интерфейс [2,7].

Предположим теперь, что два фотона идентичны по своим физическим свойствам, то есть поляризации, пространственно-временной модовой структуре и частоте. В демонстрации квантовой интерференции это обстоятельство подчеркивает важность неразличимости двух фотонов, произведенных в азот-вакансионных дефектах NV в разных алмазных дистанционно удаленных образцах. В дополнение, твердотельная реализация имеет особое значение, поскольку электронные и ядерные спины, связанные с NV-центрами, могут быть использованы в качестве надежной твердотельной памяти кубитов, дающая потенциальные масштабируемые архитектуры для квантовых сетей с запутыванием. В частности, в сочетании с недавней демонстрацией спин-фотонной запутанности [1,7], двухфотонная интерференция дала первые результаты к генерации запутанности между дистанционно удаленными твердотельными кубитами и последующему осуществлению квантовой телепортации [8-10].

В отличие от атомарных систем в свободном пространстве, оптические свойства NV-центров, внедренных в твердое состояние, существенно различаются от эмиттера к эмиттеру, особенно в разных образцах. Эта неоднородность обусловлена вариациями локальных окружений центров NV и, в частности, вариациями локальной деформации. Кроме того, эксперименты на совпадение ограничены эффективностью сбора света, излучаемого NV центром. Для облегчения эффективного сбора узкополосных фотонов с идентичными свойствами от удаленных образцов алмазов в настоящее время изучается широкий спектр подходов для повышения эффективности сбора, одним из которых является использование твердых иммерсионных линз (SIL), изготовляемых на алмазной основе. SIL улучшают эффективность сбора за счет минимизации полного внутреннего отражения на границе воздух-алмаз, что важно из-за высокого показателя преломления (n_d=2,4) алмазной основы [2].

Квантовая интерференция недавно привлекла внимание, как ресурс для генерации запутанности между отдельными однофотонными излучателями с возможными приложениями в квантовой информатике [1-4]. Интерференция двух одинаковых фотонов, падающих на светоделитель, приводит к идеальному слиянию, когда оба фотона выходят через один и тот же выходной порт. Этот фундаментальный эффект, известный как интерференция Хонга-Оу-Манделя (HOM) [1-3,6,7], является следствием бозонной статистики для неразличимых частиц. Интерференция HOM была продемонстрирована с использованием пар одиночных фотонов от параметрического преобразования с понижением частоты [1-3].

В светоделителе можно создать квантовую интерференцию неразличимых фотонов, испускаемыми двумя дистанционно удаленными азотно вакансионными центрами (NV). Квантовая интерференция подтверждается путем измерения значения кросс-корреляционной функции второго порядка $g^{(2)}(0)<0,5$. Частоты оптических переходов двух разнесенных NV-центров настраиваются в резонанс друг с другом за счет приложения внешних электрических полей.

Эффект возникает, когда две идентичные однофотонные волны входят в светоделитель 1:1, по одной на каждый входной порт. Когда временное перекрытие фотонов на светоделителе идеально, два фотона всегда будут выходить из светоделителя вместе в одном и том же режиме вывода, а это означает, что вероятность того, что они выйдут по отдельности с одним фотоном на каждом из двух выходов, равна нулю, давая событие совпадения. Фотоны имеют шанс 50:50 выйти (вместе) в любом режиме вывода. Если они станут более различимыми (например, из-за того, что они приходят в разное время или с разной длиной волны), вероятность того, что каждый из них попадет на другой детектор, возрастет. Таким образом, сигнал совпадения интерферометра может точно измерять полосу пропускания, длину пути и синхронизацию.

1. Оптический интерфейс. Спин-фотонная запутанность

Спин-орбитальное и спин-спиновое взаимодействие расщепляют триплет возбужденного состояния на шесть уровней ($|A_{2,1}\rangle=|E_-\rangle|+1\rangle\pm|E_+\rangle|-1\rangle$, ($|E_{2,1}\rangle=|E_-\rangle|-1\rangle\pm|E_+\rangle|+1\rangle$, $|E_{2,1}\rangle$ являются дважды вырожденными, и $\{|E_x\rangle=|X\rangle|0\rangle$, $|E_y\rangle=|Y\rangle|0\rangle\}$, где $|E_\pm\rangle=|ae_\pm\pm e_\pm a\rangle$, $|X(Y)\rangle=|ae_{x(y)}-e_{x(y)}a\rangle$, $|\pm1\rangle$, $|0\rangle$ – обозначения спиновых проекций $m_s=\pm1,0$ состояний [2]. Переходы между возбужденными и основным состояниями подчиняются следующим правилам отбора:

$$\begin{gathered}\{|A_1\rangle,|A_2\rangle\}\rightarrow|m_s=-1(+1))\rangle_g+\sigma_{+(-)},\\ \{|E_1\rangle,|E_2\rangle\}\rightarrow|m_s=-1(+1)\rangle_g+\sigma_{-(+)}\\ \{|E_x\rangle,|E_y\rangle\}\rightarrow|m_s=0\rangle_g+\sigma_{y(x)}\end{gathered}\qquad(1)$$

Переходы между рассматриваемыми возбужденными и основными $|m_s=0,\pm1\rangle_g$ происходят при излучении или поглощении линейно поляризованных σ_x,σ_y или циркулярно поляризованных $\sigma_\pm=\sigma_x\pm i\sigma_y$ фотонов. Например, фотон с поляризацией σ_+ испускается, когда электрон переходит из состояния A_2 в состояние $3A_2$. Эти правила отбора сохраняют полный угловой момент системы фотон-NV-центр. При низкой температуре эти переходы, резонансно возбуждая с помощью лазера соответствующей частоты, позволяют выборочно обращаться к различным спиновым состояниям [2,7,8].

Разрешенные оптические переходы и их поляризационные свойства указывают на несколько возможных схем в NV-центре. Однако, хотя эти свойства относительно устойчивы в состояниях $|A_1\rangle$ и $|A_2\rangle$, состояние $|A_1\rangle$ безызлучательно связано с метастабильным синглетным состоянием, которое затем распадается до основного состояния $|0\rangle$. Это приводит к утечке из системы, состоящей из состояния $|A_1\rangle$ и состояний $|\pm1\rangle$. Таким образом, состояние $|A_2\rangle$ обеспечивает почти идеальную замкнутую схему для таких экспериментов, как спин-фотонная запутанность [2, 7]. С другой стороны, открытая система с участием $|A_1\rangle$ может быть полезна для эффективного обнаружения темных состояний во время когерентного захвата популяции [2].

Ключевая идея спин-фотонного интерфейса проиллюстрирована на *рисунке 1*. NV-центр готовится в определенном возбужденном состоянии $|A_2\rangle$, которое при испускании ортогонально поляризованных оптических фотонов на длине волны 637 нм распадается с равной вероятностью на два различных долгоживущих спи-

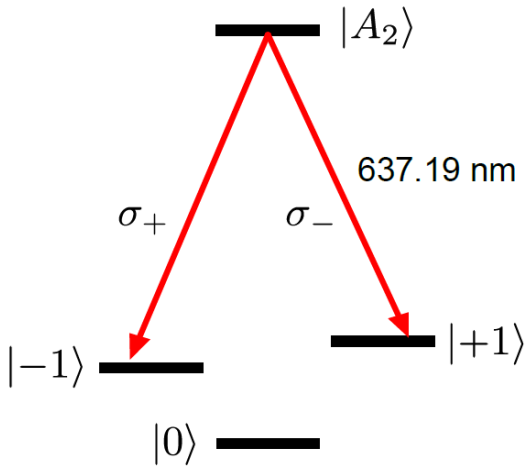


Рис. 1. Схема спин-фотонной запутанности. После селективного возбуждения в состояние $|A_2\rangle$ система распадается на два различных спиновых состояния посредством испускания ортогонально поляризованных фотонов, что приводит к запутыванию спин-фотонов

новых состояния ($|\pm1\rangle$). Запутанное состояние создается благодаря тому, что поляризация фотона однозначно коррелирует с конечным состоянием спина. Эта запутанность подтверждается измерением спинового состояния с использованием циклического оптического перехода после обнаружения фотона выбранной поляризации с длиной волны 637 нм [6].

Оптические переходы центра NV могут быть идентифицированы с помощью спектроскопии ФЛ путем сканирования лазером резонансного возбуждения всю ширину НФЛ и сбора фотонов в БФП. Так как $|0\rangle\rightarrow|E_x\rangle$ и $|0\rangle\rightarrow|E_y\rangle$ являются лучшими циклическими переходами, они обычно наблюдаются в спектроскопии ФЛ в отсутствие возбуждения микроволн или лазерной модуляции. Однако многократное резонансное возбуждение в конце концов ионизирует NV- и оптически накачивает центр NV на другой спиновый подуровень основного состояния из-за малых перекрестных переходов, не сохраняющих спин, из возбужденных состояний $|m_s=0\rangle$ в основные состояния $|\pm1\rangle$ [2]. Тогда должна быть выполнена некоторая форма перезарядки заряда и спина, например, сканирование лазером 637 нм через переходы NV и включение лазера при одновременном сборе отсчетов БФП в течение 2 мс на каждой частоте. В конце сканирования лазер с длиной волны 637 нм выключается и подается импульс повторной накачки с длиной волны 532 нм. Любая продолжительность повторной накачки более нескольких секунд достаточна для повторной инициализации центра NV.

2. Протокол дистанционной запутанности через фотонный канал

Оптический интерфейс NV-центра позволяет не только получить доступ к локальному реестру, но и также предоставляет маршрут для соединения удаленных регистров путем запутывания. В основе измерительной схемы комбинированное обнаружение фотонов, испускаемых обоими излучателями, проецирует спины в запутанное состояние [2,3,7]. Этот тип протоколов особенно хорошо подходит для случая NV-центров, поскольку достоверность запутанного состояния устойчива к потере фотонов. Общая схема протокола создания дистанционно удаленной запутанности на основе измерений реализуется в соответствии следующим трем этапам [8]:

I. Каждый из центров, NV A и NV B, излучая фотон, запутанный с электронным спином, отправляет на светоделитель результирующее спин-фотонное состояние $|\psi\rangle_{A,B}=1/\sqrt{2}(|0\rangle|\alpha\rangle+|1\rangle|\beta\rangle)_{A,B}$, где $|0\rangle,|1\rangle$ –

два спин-электронных состояния, а $|\alpha\rangle, |\beta\rangle$ – два ортогональных фотонных состояния, которые могут представлять различные поляризационные, частотные, временные или числовые состояния. Такие запутанные состояния могут быть созданы с помощью спин-зависимых оптических переходов NV центра при низких температурах

II. Оба фотона перекрываются на светоделителе, который преобразует входящий фотон $|\alpha\rangle$:

$$|\alpha\rangle_a = 1/\sqrt{2}(|\alpha\rangle_1 + |\alpha\rangle_2),\ |\alpha\rangle_b = 1/\sqrt{2}(|\alpha\rangle_1 - |\alpha\rangle_2) \quad (2)$$

где индексы a, b описывают два входных режима, а 1, 2 – два выходных режима. Полное состояние двух фотонов и двух спинов равно

$$|\psi\rangle_a \otimes |\psi\rangle_b = \frac{1}{2}\left(|0\rangle_a|\alpha\rangle_a + |1\rangle_a|\beta\rangle_a\right)\otimes\left(|0\rangle_b|\tilde{\alpha}\rangle_b + |1\rangle_b|\tilde{\beta}\rangle_b\right) \quad (3)$$

Для неразличимых фотонов $|\alpha\rangle = |\alpha'\rangle$, $|\beta\rangle = |\beta'\rangle$ исчезновение таких слагаемых, как

$$|\tilde{\alpha}\rangle_1|\alpha\rangle_2 - |\alpha\rangle_1|\tilde{\alpha}\rangle_2 = 0, |\beta\rangle_1|\tilde{\beta}\rangle_2 - |\tilde{\beta}\rangle_1|\beta\rangle_2 = 0 \quad (4)$$

называется двухфотонной квантовой интерференцией или эффектом Хонга-ОУ-Манделя (HOM). В результате, окончательное уравнение принимает вид:

$$|\psi\rangle_a \otimes |\psi\rangle_b = \frac{1}{4}\{|00\rangle(2|\alpha\rangle_1 - 2|\alpha\rangle_2)\} + \frac{1}{4}\{|11\rangle(2|\beta\rangle_1 - 2|\beta\rangle_2)\} + \\ + \frac{1}{4}\{(|01\rangle + |10\rangle)(|\alpha\beta\rangle_1 - |\alpha\beta\rangle_2)\} + \frac{1}{4}\{(|01\rangle - |10\rangle)(|\alpha\rangle_1|\beta\rangle_2 - |\beta\rangle_1|\alpha\rangle_2)\} \quad (5)$$

III. Детектирование определенных фотонных состояний проецирует спины в запутанное состояние. В предположении, что $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ две ортогональные поляризации фотона, детектирование одного фотона в каждом выходном порту светоделителя проецирует два спина в запутанное состояние Белла

$$|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|01\rangle - |10\rangle.$$

Этот протокол использовался для создания запутанности между двумя NV-центрами, разделенными тремя метрами. Фотонные состояния, использованные в том эксперименте, являлись числовыми состояниями, $|\alpha\rangle = |1\rangle_{\text{фотон}}$ и $|\beta\rangle = |0\rangle_{\text{фотон}}$. С используемыми детекторами такие состояния, как $|2\alpha\rangle_1 = |2\rangle_{1,\text{фотон}}$ и $|\alpha\rangle_1|\beta\rangle_2 = |1\rangle_{1,\text{фотон}}|0\rangle_{2,\text{фотон}}$, являлись неразличимыми. Следовательно, спины проецируются в смешанное состояние. Эту проблему можно решить с помощью адаптации протокола, состоящего из двух раундов протокола со спин-флипом между ними [8].

3. Квантовая интерференция неразличимых фотонов из дистанционно удаленных NV-центров

В экспериментах [2,6] нацеленных на достижение неразличимых фотонов от двух дистанционно удаленных NV-центров, используются два SIL, которые хранятся в гелиевых криостатах с непрерывным потоком при температуре 8K (рисунок 2). Характеристики спектральных свойств нескольких NV-центров были получены с помощью спектроскопии фотолюминесцентного возбуждения. Для получения неразличимых фотонов от двух NV-центров, они должны иметь спектрально перекрывающие переходы, причем излучение от этих отдельных переходов для каждого NV-центра должно быть изолировано. Выполняя одновременное сканирование ФЛ на NV центрах в двух SIL с помощью одного лазера, можно напрямую измерить относительные частоты соответствующих оптических переходов.

В данной экспериментальной последовательности импульс зеленого света длительностью 5 мкс инициализирует NV-центр в электрон-спин триплетный (S=1) подуровень основного состояния с $m_s=0(|0\rangle)$. В связи с этим в случае только резонансного лазера флуоресценция собирается NV центром с переходами из состояния $|0\rangle$ в состояние $|E_x\rangle$ или $|E_y\rangle$ [2,6]. Для достижения цели осталось подобрать пару NV-центров так, чтобы один переход в первом NV-центре был резонансным или мог быть настроен в резонанс с одним переходом во втором.

Для активной минимизации настройки между выбранными переходами можно использовать DC эффект [2]. Электрические поля, перпендикулярные оси NV, изменяют расщепление между состояниями $|E_x\rangle$ и $|E_y\rangle$, а параллельные поля сдвигают оба перехода вместе. Это позволяет полностью контролировать частоты оптических переходов [2,6].

Каждый SIL обрабатывается отдельной уста-

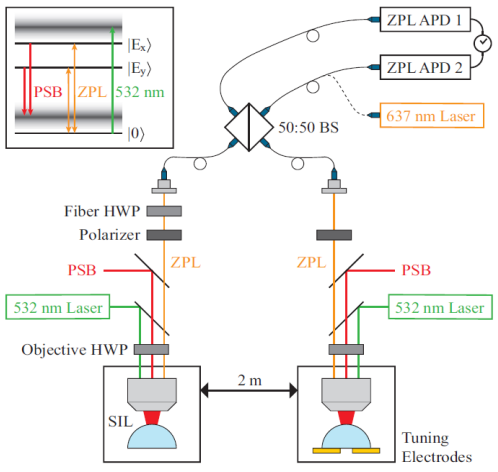


Рис. 2. Схема аппарата. Два алмазных SIL (solid immersion lense), содержащих несколько NV-центров, размещены в криостатах под непрерывным потоком гелия на расстоянии 2 м друг от друга

новкой конфокального микроскопа, которая включает в себя путь возбуждения на длине волны 532 нм, путь сбора фононной боковой полосы (БФП) и путь сбора бесфононной линии (НФЛ). Три оптических пути накладываются с помощью дихроичных зеркал. Перед взаимодействием в одномодовом 50:50 оптоволоконном светоделителе, сохраняющем поляризацию, путь сбора НФЛ проходит через полуволновую пластину (HWP) и дополнительный полосовой фильтр (633-647 нм). Два выходных плеча светоделителя подключены к паре лавинных фотодиодов (APD). Лазер возбуждения на 637 нм подключен к месту НФЛ APD 2 для получения спектров возбуждения фотолюминесценции. В одном криостате установлены электроды для настройки электрического поля. На вставке (*рисунок 2*) показана упрощенная структура уровней, включая резонансное возбуждение и излучение в НФЛ на длине волны 637 нм и нерезонансное возбуждение в возбужденное состояние БФП на 532 нм.

4. Автокорреляционные функции для удаленных NV-центров

Для подтверждения того, что адресуется к одному однофотонному излучателю в каждом SIL, необходимо сделать заключение о нормализованной автокорреляционной функции второго порядка $g^{(2)}_{PSB}(\tau)$ в стандартной постановке путем разделения в светоделителе излучения БФП 50:50. Ожидается, что для идеального однофотонного источника $g^{(2)}_{PSB}(0)=0$, и однофотонный характер излучения подтверждается на *рисунке 3*. Резонансные фотоны из каждого центра NV отправляются на отдельный входной порт оптоволоконного светоделителя с сохранением поляризации. Регулировкой интенсивности зеленого возбуждения независимо для каждого центра NV можно сбалансировать интенсивность излучения таким образом, чтобы на каждом выходном порту светоделителя получить достаточную скорость счета, например, 1100 Cts/s на излучатель. Дополнительный HWP в одной установке используется для настройки согласованной поляризации фотонов в светоделителе. Выходные порты светоделителя подключены к детекторам одиночных фотонов с временным разрешением менее 100 пс. Взаимная корреляция между этими детекторами оценивается с использованием модуля счета одиночных фотонов с временной корреляцией с разрешением 64 пс [6].

В идеале для пары неразличимых фотонов $g^{(2)}(0)=0$, но в присутствии экспериментального шума минимальное наблюдаемое значение $g^{(2)}(0)$ увеличивается. В случае различимости фотонов и балансировки интенсивности света в обоих плечах, измерение корреляции даст $g^{(2)}(0)=0,5$ [6]. Измерение кросс-корреляционной функция в различимом случае эквивалентно из-

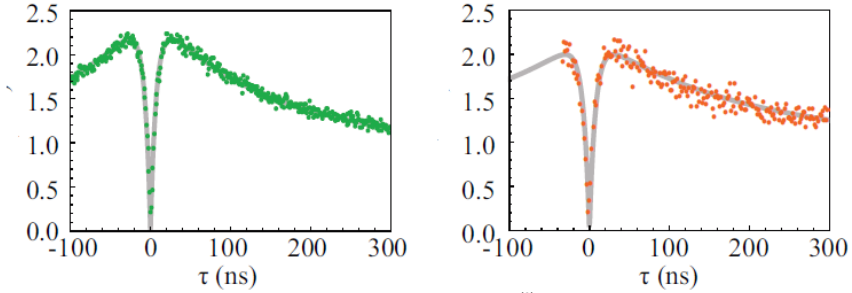


Рис. 3. Автокорреляция второго порядка с одним излучателем, $g^{(2)}_{PSB}(\tau)$, излучения БФП, полученная для центров NV A (слева) и NV B (справа) , используемых для измерения HOM. Полуширина центральных элементов антигруппировки составляет 7,5±0,1 нс для NV A и 9,5±0,2 нс для NV B

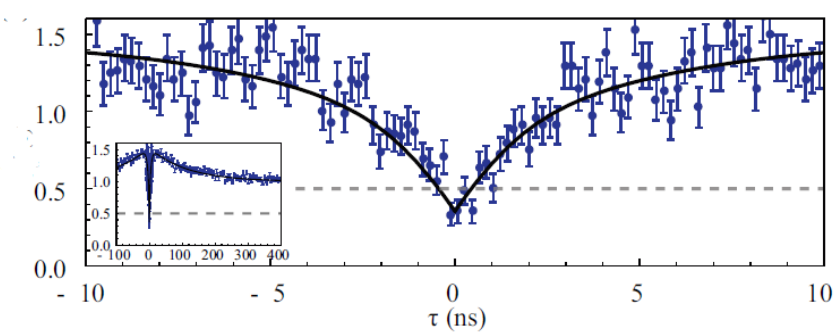


Рис. 4. Демонстрация интерференции HOM удаленных NV центров в неразличимом случае. Пунктирные линии указывают на предел, ожидаемый от независимых различимых источников одиночных фотонов при τ=0

мерению автокорреляционной функции одного излучателя, в то время как неинтерферирующее излучение другого действует как некоррелированный шум, увеличивая $g^{(2)}(0)$ с 0 до 0,5. Следовательно, измерение $g^{(2)}(0)<0,5$ указывает на квантовую интерференцию между фотонами, испускаемыми двумя отдельными источниками фотонов (*рисунок 4*).

На *рисунке 4* фотоны неразличимы, когда их поляризации параллельны, что дает $g_{||}^{(2)}(0)=0,35\pm0,04$. С точки зрения видимости интерференции HOM, определяемой как $\eta=[g_{\perp}^{(2)}(0)-g_{||}^{(2)}(0)]/g_{\perp}^{(2)}(0)$, $\eta=35\pm9\%$. Это значение $\eta>0$ ясно демонстрирует квантовую интерференция между фотонами, испускаемыми двумя NV-центрами, отстоящими друг от друга на 2 м.

Теперь при анализе данных временной зависимости интерференции (*рисунки 3-4*) надо учесть, что кросс корреляционную функцию на выходных портах светоделителя, входные порты которого сбалансированы и управляются одно фотонным источником, можно записать как [5]:

$$g^{(2)}(\tau)=\frac{1}{4}\tilde{g}_{11}^{(2)}(\tau)+\frac{1}{4}\tilde{g}_{22}^{(2)}(\tau)+\frac{1}{2}\left(1-\xi g_{11}^{(1)}(\tau)g_{22}^{(1)}(\tau)\cos(\Delta\omega\tau)\right),(5)$$

где $\tilde{g}_{ii}^{(2)}(\tau)$ – автокорреляционные функции второго порядка для каждого отдельного источника фотонов, полученные из *рисунка 3*;

$\Delta\omega$ – разность частот между излучателями.

Для неразличимого случая полуширина центральной части составляет 5,6±0,3 нс. Медленно меняющаяся составляющая корреляционной функции первого порядка для источников одиночных фотонов определяется выражением $g_{ii}^{(1)}(\tau)=\exp(-\gamma|\tau|/2)$, где $\gamma\sim1/12$нс$^{-1}$ – обратное время жизни излучателя. На *рисунке 4* видны две особенности для $|\tau|\leq10$ нс, которые соответствуют различным слагаемым в уравнении. Квантовая интерференция описывается косинусным членом, который приводит к узкой интерференционной функции. Эта функция находится выше более широкой антибанчинговой особенности, предоставляемой автокорреляционными функциями второго порядка. Амплитуда интерференции подбирается феноменологическим параметром ξ. Член квантовой интерференции сворачивается с частотным распределением, которое размывает осцилляции cos ($\Delta\omega$) и определяет полную ширину интерференционной характеристики 1/e. Эта ширина независимо определяется по спектрам ФЛ и составляет 3,1 нс. Используя доступные на то время значения эффективности сбора (4×10^{-5}), узкой ширины линии (50 МГц) и допуская частоту повторения 10^8, можно оценить скорость создания одной запутанной пары спинов (~10нс).

Таким образом, после генерации неразличимых фотонов от двух пространственно разнесенных NV-центров в сочетании с предыдущей демонстрацией запутанности между электронным спином NV-центра и поляризацией фотона следующий шаг направлен к оптически опосредованной генерации запутанности между удаленными твердотельными квантовыми регистрами.

5. Объявленная запутанность между дистанционно разделенными твердотельными кубитами

Потенциальное влияние квантовых сетей на науку и технику в последнее время стимулировало исследования, направленные на создание запутанных состояний удаленных твердотельных кубитов [8,9]. Твердотельный квантовый регистр азотно-вакансионный (NV) дефектный центр в алмазе сочетает в себе долгоживущий электронный спин (S=1) с надежным оптическим интерфейсом, позволяющим измерять и управлять с высокой точностью спиновый кубит. Кроме того, спин электрона NV можно использовать для доступа к ближайшим ядерным спинам и управления ими, тем самым формируя многокубитный регистр. Для использования таких регистров в квантовой сети требуется механизм когерентного соединения удаленных центров NV. Этот прорыв достигается объединением недавно разработанных методов спиновой инициализации и однократного считывания [6] с эффективным резонансным оптическим детектированием и управлением оптическими переходами на основе обратной связи, и все это в одном эксперименте, выполненном с высокой точностью. Эти результаты ставят твердотельные кубиты в один ряд с захваченными атомными кубитами как многообещающие кандидаты для реализации квантовых сетей.

В эксперименте [8] используются два NV-спиновых кубита в независимых низкотемпературных установках, разделенных расстоянием 3 м (*рисунок 5*). Базисные состояния кубита $|\uparrow>$ и $|\downarrow>$ на спиновых подуровнях NV закодированы, как $m_s=0$ и $m_s=-1$, соответственно. Каждый кубит может быть считан независимо, путем обнаружения спин-зависимой флуоресценции в боковой полосе фононов NV (нерезонансное детектирование). Кубиты контролируются индивидуально с помощью микроволновых импульсов, подаваемых на полосковые линии на кристалле (см. *рисунок 5*). Квантовые состояния, закодированные в кубитах, чрезвычайно долгоживущие, так метод динамической развязки позволяет достигнуть времени когерентности больше 10 мс.

Каждый центр азотной вакансии (NV) находится в синтетическом сверхчистом алмазе, ориентированном в направлении |111>. Два алмаза расположены в двух независимых установках низкотемпературного конфокального микроскопа, разделенных 3 м. NV-центры могут возбуждаться по отдельности резонансно красным лазером и не резонансно зеленым лазером. Излучение (штриховые стрелки) спектрально разделено на нерезонансную часть (фононная боковая полоса, PSB=БФП) и резонансную часть (бесфононная линия, НФЛ=ZPL).

Протокол запутывания схематично изображен на рис.6. Изначально оба центра, NV A и NV B, готовятся в суперпозиции $1/\sqrt{2}(|\uparrow>+|\downarrow>)$. Далее каждый NV центр возбуждается коротким лазерным импульсом с резонансным переходом $|\uparrow>$в $|e>$, где $|e>$ – оптически возбужденное состояние с той же проекцией спина, что и $|\uparrow>$. Спонтанное излучение локально запутывает кубит и число фотонов, оставляя каждую установку в состоянии $1/\sqrt{2}(|\uparrow 1>+|\downarrow 0>)$, где 1 (0) обозначает наличие (отсутствие) излучаемого фотона; тогда совместное кубит-фотонное состояние обеих установок описывается как

$$1/2(|\uparrow_A\uparrow_B>|1_A1_B>+(|\uparrow_A\downarrow_B>|1_A0_B> +(|\downarrow_A\uparrow_B>|0_A1_B>+(|\downarrow_A\downarrow_B>|0_A0_B> \quad (6)$$

Две фотонные моды, A и B, направляются на входные порты светоделителя (см. *рисунок 5*), так что флуоресценция, наблюдаемая в выходном порту, могла бы исходить из любого NV-центра. Если фотоны, испускаемые двумя NV-центрами, неразличимы, обнаружение ровно одного фотона на выходном порту будет соответствовать измерению состояния фотона $(|1_A0_B>\pm e^{-i\varphi}|0_A1_B>)$ (где φ – фаза, зависящая от длины оптического пути). Таким образом, такое событие обнаружения одного фотона проецирует спин кубиты в максимально запутанное состояние $|\psi>=1/\sqrt{2}$ $(|\uparrow_A\downarrow_B>\pm e^{-i\varphi}|\downarrow_A\uparrow_B>)$ (*рисунок 6*).

Создание состояния $|\uparrow\uparrow>$ и несовершенная эффективность детектора, приводящая к потере фотона, может также привести к детектированию единичного фотона. Для исключения этой возможности оба кубита переворачиваются, $|\uparrow\uparrow>\rightarrow|\downarrow\downarrow>$, и оптически возбуждаются во второй раз. Во втором раунде для этого состояния $|\downarrow\downarrow>$ фотоны не излучаются, а состояния $|\psi>$ снова дадут один фотон. В результате детектирование фотона в обоих раундах является вестником о возникновении запутанного состояния Белла. $|\psi+>=1/\sqrt{2}$ $(|\uparrow_A\downarrow_B>+|\downarrow_A\uparrow_B>)$ либо $|\psi^-> =1/\sqrt{2}$ $(|\uparrow_A\downarrow_B>-|\downarrow_A\uparrow_B>)$, в зависимости от того, сработал в двух раундах ли один и тот же детектор (+) или отметились разные детекторы (-).

При температуре жидкого гелия оптически разрешенные переходы и структура возбужденного уровня могут быть определены с помощью резонансного оптического возбуждения в НФЛ в сочетании с управлением спином в основном состоянии с помощью микроволн. При криогенной температуре конфокального микроскопа

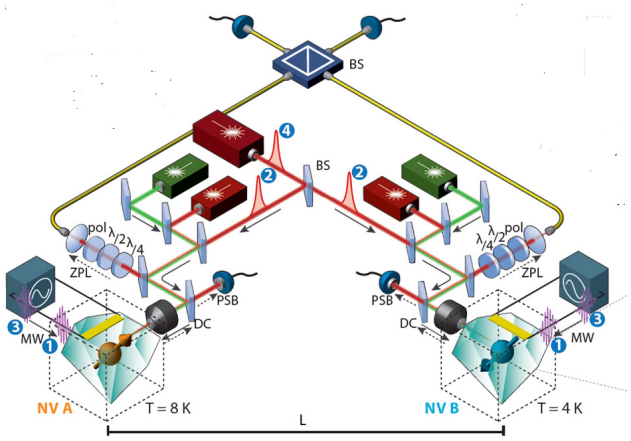


Рис. 5. Экспериментальная установка для создания запутанности на большом расстоянии между двумя твердотельными спиновыми кубитами

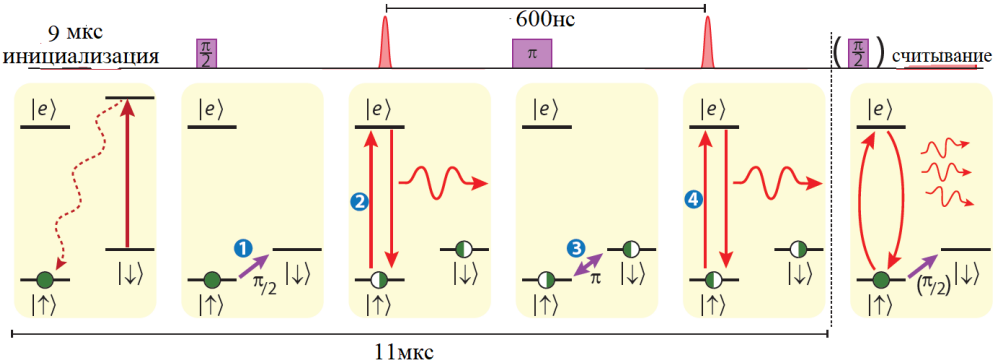


Рис. 6. Протокол запутывания, иллюстрирующий последовательность импульсов, применяемых одновременно к обоим центрам NV. Оба NVцентра изначально приготавливаются в суперпозиции $1/(2)^{(1/2)}(|\uparrow>+|\downarrow>)$. Короткий спин-селективный резонансный лазерный импульс длительностью 2 нс создает спин-фотонную запутанность $1/(2)^{(1/2)}(|\uparrow 1>+|\downarrow 0>)$. Фотоны перекрываются на светоделителе и регистрируются в двух выходных портах. Детектирование одного фотона в обоих раундах «объявляет» о создании спинового запутывания NVA и NVB центров [8]

(*рисунок 5*) длина волны возбуждающего лазера заметается мониторинге флуоресценции фононного бокового излучения БФП, разделенного спектрально от резонансного излучения и лазерного отражения дихроичным фильтром. Кроме того, в основном состоянии для повторного заполнения всех спиновых состояний постоянно возбуждается спиновый переход $m_s=0 \leftrightarrow m_s=\pm 1$, что позволяет обнаруживать переходы, связанные с любым спиновым состоянием (*рисунок 7*).

Излучение БФП используется для независимого однократного считывания спиновых кубитов [9]. Фотоны НФЛ из двух центров NV перекрываются на светоделителе [6,8]. Микроволновые импульсы для управления спином подаются через встроенные микроволновые полоски. Приложенное магнитное поле 17,5 Гс расщепляет уровни $m_s=\pm 1$ по энергии. Оптические частоты NV B перестраиваются с помощью преобразователя постоянного тока электрического поля, приложенного к электродам затвора. Для повышения эффективности сбора твердотельные иммерсионные линзы фрезерованы вокруг двух NV-центров.

Когерентность спинового кубита NV B, как функция полного времени свободной эволюции t_{FE} во время N-импульсной последовательности динамической развязки [8]. Кривые t для $Aexp[-(t_{FE}/T_{coh})^3]+0{,}5$, при $N=64T_{coh}=14{,}3\pm0{,}4$ мс.

Протокол запутывания, иллюстрирующий последовательность импульсов (*рисунок 6*), применяемых одновременно к обоим центрам NV. Оба центра NV изначально готовятся в суперпозиции $1/\sqrt{2}(|\uparrow>+|\downarrow>)$. Короткий спин-селективный резонансный лазерный импульс длительностью 2 нс создает спин-фотонную запутанность $1/\sqrt{2}(|\uparrow 1>+|\downarrow 0>)$. Фотоны перекрываются на светоделителе и детектируются в двух выходных портах. Затем оба спина переворачиваются, и NV-центры возбуждаются второй раз. Детектирование одного фотона в каждом раунде возбуждения объявляет о запутывании спин электронных кубитов NV-центров и запускает считывание индивидуального спина.

6. Генерация и детектирование неразличимых фотонов в создании дистанционно удаленной запутанности

Ключевая проблема для создания удаленной запутанности с твердотельными кубитами заключается в создании большого потока неразличимых фотонов, отчасти потому, что локальное напряжение в решетке-хозяине может вызывать большие изменения частоты фотонов. В спектрах оптического возбуждения NV-центров (*рисунок 7*) наблюдаются резкие спин-селективные переходы. Здесь переход E_y (спиновая проекция $m_s=0$) используется в протоколе запутывания и для считывания кубитов; переход A_1 используется для быстрой оптической накачки в $|\uparrow>$ [6-8]. Из-за различной деформации в двух алмазах частоты переходов E_y различаются на 3,5 ГГц. Применением напряжения на чиповый электрод с помощью эффекта Штарка постоянного тока возможна настройка частот оптических переходов NV B центра, которая приводит E_y-переходы двух NV-центров.

Зарядовые флуктуации вблизи NV центра также влияют на оптические частоты. Чтобы противодействовать фотоионизации, нужно регулярно применять зеленый лазерный импульс, чтобы перекачивать NV центр в желаемое зарядовое состояние. Этот импульс перекачки изменяет локальное электростатическое окружение, приводя к скачкам в несколько ширин линий в частотах оптических переходов. Для преодоления этих эффектов, эксперимент инициируется только в том случае, если количество фотонов, собранных во время двухлазерного пробного этапа, превышает пороговое значение, тем самым гарантируя, что оптические переходы центра NV находятся в резонансе с лазерами.

Спектры возбуждения фотолюминесценции NB A и NB B; частота дана относительно 470,4515 ТГц. Помечены переходы в соответствии с симметрией их возбужденного состояния и их интенсивностью (I). Переход A_1 используется для инициализации NV центра в состоянии $|\uparrow>(ms=0)$, а переход E_y используется для создания запутывания и однократного считывания. Подачей напряжения V на электроды затвора NV B переходы E_y настраиваются в резонанс (пунктир). На *рисунке 7* показан спектр ФЛ, снятый с микроволновым возбуждением непрерывной волной, который смешивает ос-

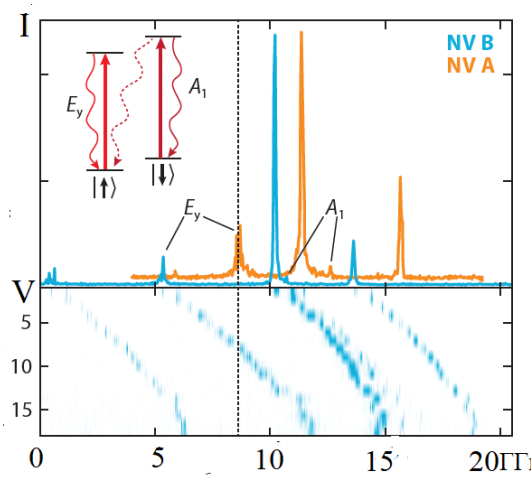


Рис. 7. Генерация и обнаружение неразличимых фотонов

новные состояния во время лазерного импульса 637 нм. Наблюдаются все резонансы, ожидаемые от прямого и перекрестного переходов, как показано на *рисунке 8*, наряду с некоторыми возможными микроволново-оптическими двухфотонными переходами.

Самые сильные переходы на *рисунках 7* и *8* $|0>\rightarrow E_x>$ и $|0>\rightarrow|Ey>$ циклические переходы, которые, можно использовать для наблюдения оптических осцилляций Раби, например, $|0>$ переход в $|E_y>$, измеренный включением резонансного лазерного импульса длительностью 40 ns. Скорость счета фотонов пропорциональна популяции в состоянии $|E_y>$, которая при отсутствии распада или декогерентизации определяется выражением $P_{Ey}(t)=\cos^2(|\Omega|t)$, где $\Omega = \vec{\mu}\cdot\vec{E}/\hbar$ частота Раби. Измеряя осцилляции Раби, можно определить длину лазерного импульса, переводящего популяцию в состояние $|A_2>$ для последующей генерации запутанности. В отсутствие магнитного поля вместо установившегося значения, соответствующего до 50% популяции в возбужденном состоянии, скорость счета фотонов после нескольких оптических циклов постоянно уменьшается, поскольку популяция перекачивается в «темное» основное состояние, которое не возбуждается лазером. Однако наблюдаемых осцилляций Раби обычно достаточно для определения длительности оптического импульса.

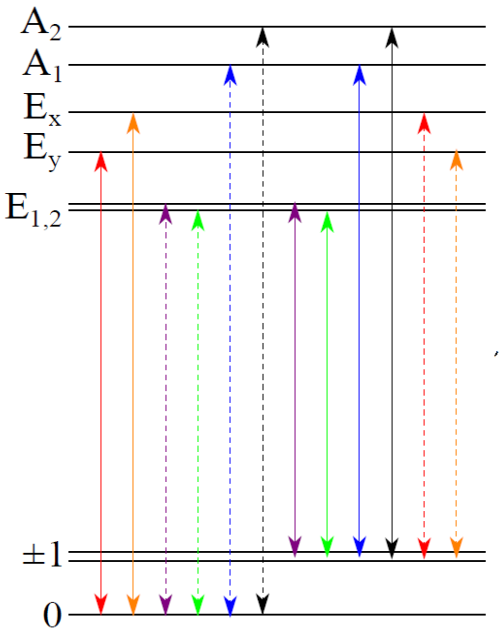


Рис. 8. Оптические переходы центра NV. Все возможные переходы между основным и возбужденным состояниями, прямые переходы обозначены сплошными линиями, а перекрестные переходы без сохранения спина обозначены пунктирными линиями

7. Настройка синхронизации в дистанционно удаленной запутанности

Для генерации дистанционно удаленной запутанности две независимые установки объединяются, как схематично показано на *рисунке 10*. Обе установки способны подготавливать заряд и резонансы, используя возможности одной установки, а генерация запутанности выполняется по синхронизированному протоколу, координируемому контроллером ADwin и генератором сигналов произвольной формы AWG одной из двух установок. Частоты оптических резонансов и лазеров дрейфуют в масштабах времени, кото-

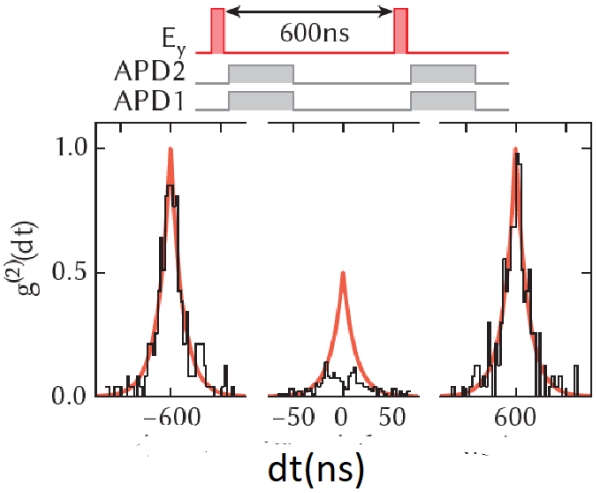


Рис. 9. Двухфотонная квантовая интерференция с использованием резонансного возбуждения и детектирования. Корреляционная функция $g^{(2)}$ получается из всех совпадающих детектирования событий на APD1 и APD2 за время эксперимента по запутыванию. Боковые пики подгоняются распадной экспонентой; из подгонки данных строится ожидаемая форма центрального пика $g_{\perp}^{(2)}$ (красная линия), соответствующая не интерферирующим фотонам

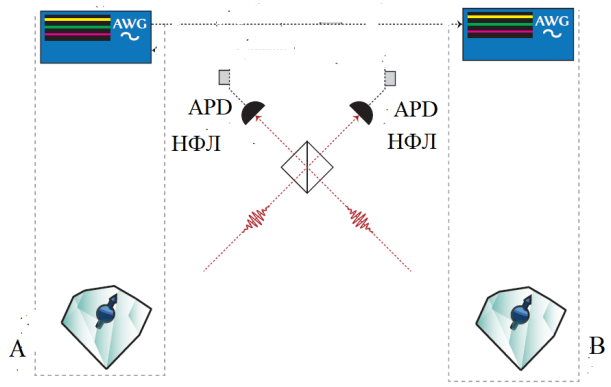


Рис. 10. Схема управления дистанционной запутанностью. ADwin установки A запускает основной цикл управления для синхронизации операций на обеих установках во время генерации запутанности – на каждой установке автономно выполняется только подготовка к заряду и резонансу

рые медленнее (от секунд до минут) по сравнению с одним запуском последовательности экспериментов (от микросекунд до миллисекунд). Стабилизация и контроль частоты лазера и напряжения затвора осуществляется асинхронно с экспериментом, используя статистику скорости счета фотонов и вероятности успеха условных шагов эксперимента в качестве источника обратной связи.

Помимо фотонной неразличимости, успешное выполнение протокола также требует, чтобы вероятность обнаружения резонансно излучаемых фотонов превышала вероятность обнаружения рассеянных лазерных фотонов и темных отсчетов детектора. Это особенно важно для NV-центров, поскольку только около 3-4% их излучения приходится на бесфононную линию, полезного для протокола.

Литература

1. Maira Amezcua, Quantum Optics. Department of Physics and Astronomy, Pomona College, May 2, 2012.
2. Yiwen Chu and Mikhail D. Lukin Quantum optics with nitrogen-vacancy centers in diamond, arXiv:1504.05990v1 [quant-ph] 22 Apr 2015.
3. D.S. Levonian,R. Riedinger, B. Machielse,E. N. Knall, M. K.Bhaskar, C. M. Knaut, R. Bekenstein, H. Park, M. Lon˘car and M. D. Lukin Optical Entanglement of Distinguishable Quantum Emitters. arXiv:2108.10928v1 [quant-ph] 24 Aug 2021.
4. 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.
5. 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.
6. D.N. Makarov. Theory for the beam splitter in quantum optics: quantum entanglement of photons and their statistics, HOM effect. arXiv:2211.03359v1 [quant-ph] 7Nov 2022.
7. A. Sipahigil, M.L. Goldman, E. Togan, Y. Chu, M. Markham, D.J. Twitchen, A.S. Zibrov, A. Kubanek, M.D. Lukin. Quantum interference of single photons from remote nitrogen-vacancy centers in-Diamond. 1 112. 3975 v2
8. H. Bernien, B. Hensen, W. Pfaf G. Koolstra, M.S. Blok,1 L. Robledo, T.H. Taminiau, M. Markham, D.J. Twitchen, L. Childress, and R. Hanson, Heralded entanglement between solid-state qubits separated by 3 meters [quant-ph] 26 Dec. 2012.
9. Pfaff W., Hensen B., Bernien H., Dam S.B. van, Blok M.S., Taminiau T.H., Tiggelman M.J.,-Schouten R.N., Markham M., Twitchen D.J.,Hanson R. Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits // Science, 2014. Vol. 345. Issue 6196. Pp.532-535.
10. Волков Г.Г., Масликов А.А., Смуров С.В., Царьков А.Н. От геральдового запутывания к безусловной телепортации / Известия Института инженерной физики, 2019. №1(53). С.73-81.

УДК 004.932.72

АНАЛИЗ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СВЕТОФОРОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

NEURAL NETWORK ANALYSIS FOR TRAFFIC LIGHT DETECTION IN IMAGES

Лада Сергеевна Толстенко
магистр
НИТУ «МИСИС»
Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-т., д. 4
Тел.: +7 (499) 236-25-35
E-mail: m1805775@edu.misis.ru

Артем Алексеевич Клейменов
магистр
НИТУ «МИСИС»

Бушра Али
аспирант
НИТУ «МИСИС»
E-mail: bushrayehyaali@gmail.com

Галина Сергеевна Крынецкая
старший преподаватель
НИТУ «МИСИС»
E-mail: g.krynetskaya@misis.ru

Алексей Александрович Коробков
почетный работник науки и высоких технологий РФ,
кандидат технических наук, доцент
начальник 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
E-mail: korobkow@iifmail.ru

Аннотация
В работе рассматриваются несколько подходов с открытым исходным кодом для решения задачи локализации и классификации светофоров на изображении. Приводится описание имеющихся датасетов и производится оценка качества работы двух подходов на части открытого набора данных LISA.
Ключевые слова: анализ дорожной обстановки, детектирование светофоров, классификация, нейронные сети.

Summary
This paper discusses several open-source solutions for the task of localizing and classifying traffic lights in an image. The available datasets are described and the performance of two approaches on a part of the open-source LISA dataset is evaluated.
Keywords: traffic analysis, traffic light detection, classification, neural networks.

Введение

Исследованиями и проектированием беспилотных автомобилей занимаются многие научно-исследовательские центры, университеты, автомобильные и иные промышленные компании по всему миру с середины 1980-х годов. Известны разработки беспилотных транспортных средств, созданные гигантами автомобилестроения: КамАЗ, ГАЗ, БелАЗ, Tesla, Ford, Honda, Mercedes, а также ИТ-компаниями: Яндекс, Cognitive Technologies, Uber, Google.

При создании системы управления беспилотного автомобиля важными задачами являются обнаружение и распознавание объектов дорожной обстановки [1]. Для решения указанных задач применяются технологии компьютерного зрения. В числе задач по обнаружению/распознаванию объектов в видеопотоке с камеры, установленной на автомобиль, можно выделить задачу идентификации световых сигналов, подаваемых светофорами.

Обнаружение и распознавание сигнала светофора включает в себя непосредственно его обнаружение и распознавание состояния (красный, зеленый или желтый). В литературе описаны различные способы решения этой задачи [2] в том числе и при наличии неблагоприятных погодных условий (слабая освещенность, дымка, туман и т.д.) [3].

Методы глубокого обучения показали высокую производительность и способность к обобщению во многих областях и типах задач, таких как классификация [4,5] и обнаружение [5,6]. Детекторы объектов общего назначения были хорошо изучены для задач, связанных с дорожным движением (таких как обнаружение светофоров, дорожных знаков [7] и т. д.). *YOLO* и *R-CNN* являются двумя из этих современных детекторов. В работе рассматриваются и сравниваются алгоритмы (с открытым исходным кодом)

в области глубокого обучения для определения местоположения (и дальнейшего распознавания) светофоров по изображениям.

Подходы, основанные на обучении, требуют больших объемов аннотированных данных (которые не всегда имеются в наличии), а также больших вычислительных мощностей. В настоящее время в свободном доступе есть зарубежные базы изображений с аннотациями светофоров [2].

1. Наборы данных

Для обучения и тестирования рассматриваемых в данной работе нейросетей использовались следующие наборы данных.

1.1. LISA

Обширный набор общедоступных данных *LISA* [2], основанный на кадрах с дорог города Сан-Диего штата Калифорния, содержит аннотированные видеопоследовательности, снятые при различном освещении (разное время суток) и погодных условиях с помощью стереокамеры (*рисунок 1*). Кроме того, в наборе данных представлены многосекционные светофоры, которые помимо цвета имеют направления – всего 7 классов: «*go*», «*goForward*», «*goLeft*», «*stop*», «*stopLeft*», «*warning*», «*warningLeft*».

На *рисунке 2* изображены некоторые нетривиальные случаи, возникающие при решении задач:

- смещение цветового тона и нарушение ореола из-за атмосферных условий и влияния других источников света (а, б, в, г);
- полное или частичное перекрытие другими объектами или непрямой угол обзора (д, е, ж, з);
- неполная форма светофора из-за неисправной или грязной лампы (и);
- стоп-сигналы автомобилей, отражения, рекламные щиты и огни пешеходных переходов (к);
- проблемы синхронизации между скоростью затвора камеры и рабочим циклом светофора (л, м).

1.2. *DriveU*

Набор данных *DriveU* [8] содержит около 230 000 аннотаций кадров, снятых в 11 разных городах при различных погодных условиях. Разметка кадров содержит в себе информацию о (об): ограничивающих светофоры прямоугольниках, состоянии (цвет светофора), релевантности (относится ли светофор к текущему движению), горизонтальной или вертикальной ориентации, наличии визуального перекрытия, количестве светодиодов, типе светофора (для пешеходов, велосипедистов или автомобилей).

Запись видеопоследовательностей велась при помощи стерео- и широкоугольной камер. По стереопаре изображений также строится карта диспаритета [9] (*рисунок 3*).

2. Нейросетевые архитектуры

2.1. Модификация YOLOv3 на фреймворке Darknet

В работе [10] решается задача распознавания релевантных светофоров для применения в беспилотных автомобилях. Авторы предлагают использовать детектирующую нейронную сеть, локализующую и распознающую светофоры в кадре, в сочетании с «*prior map*» – разметкой предопределенных маршрутов, в которой содержится информация о позиции, направлении и других характеристиках реальных светофоров, благодаря чему беспилотный автомобиль будет заранее иметь информацию о наличии светофора в кадре. Благодаря такому подходу авторам статьи удается определить, стоит ли брать во внимание состояние того или иного светофора в зависимости от того, относится ли он к текущему движению или попал в кадр случайно.

а)

б)

Рис. 1. Примеры кадров при дневном (а) и ночном (б) освещении

а) б) в)

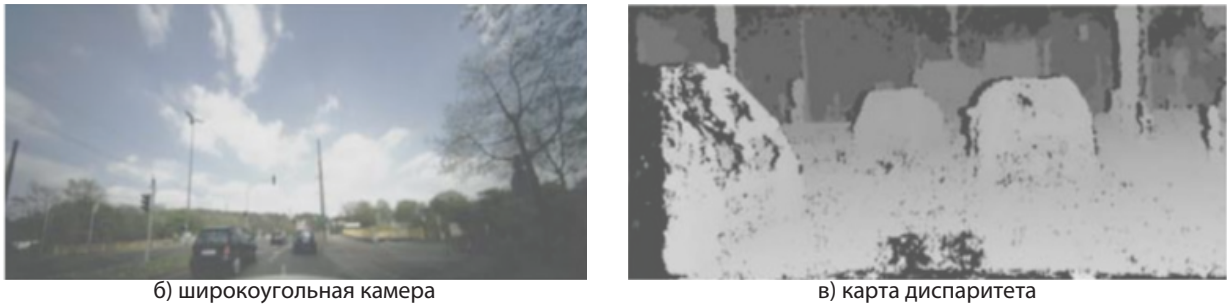
г) д) е)

ж) з) и)

к) л) м)

Рис. 2. Примеры сложных ситуаций возникновения светофоров в кадре

а) стереопара



б) широкоугольная камера в) карта диспаритета

Рис. 3. Пример кадра

Разработка конечной системы велась в два этапа:

1) в течение оффлайн-фазы были построены *prior*-карты с использованием лидара и размечены релевантные светофоры;

2) онлайн-фаза заключается в распознавании светофоров на кадрах видеопоследовательностей, выделении (при помощи разметки оффлайн-фазы) релевантных светофоров среди найденных (*рисунок 4*), и определении их состояния: «*none*», «*off*», «*red*», «*green*».

Для анализа представляет интерес нейросетевая часть онлайн-фазы – детектирование и распознавание светофоров в кадре. В качестве нейронной сети авторы используют *YOLOv3*, в основе которой лежит *Darknet-53*. Данная модель была обучена для детектирования и распознавания состояния светофора. Нейронная сеть на выходе имеет два класса: «*red*» (в котором объединены красный и желтый цвет) и «*green*». Авторами отмечается, что красный и желтый цвет пришлось объединить в один класс из-за недостаточного количества данных с желтым цветом светофора и, как следствие, невозможностью обучить нейронную сеть достаточного качества для данного класса.

Для обучения и тестирования нейронной сети использовались наборы данных *DriveU* и *LISA*. Кроме того, был собран локальный датасет, названный авторами *IARA*, содержащий около 5 000 размеченных светофоров и 3-классовую разметку («*red*», «*green*», «*yellow*»), на котором дополнительно проводилось тестирование. В качестве функции потерь использовалась «*mAP*» – «*mean Average Precision*» для каждого класса, который в свою очередь, считается как площадь под кривой «*precision-recall*»:

$$mAP = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} AP_i. \quad (1)$$

YOLOv3 обучалась на 1 500 батчах по 64 изображения в каждом и с константным «*learning rate* = 10E4». Размер изображений составляет 608×608 пикселей – компромисс между скоростью и качеством.

Также в процесс обучения были включены: аугментация изображений при помощи изменения оттенка, насыщенности, экспозиции, батч-нормализация. Кроме того, каждые 10 батчей менялось разрешение изображений с 608×608 на разрешения, кратные 32, что делает модель более устойчивой к разным масштабам.

2.2. Сочетание SSD-MobileNet V1 и InceptionV3

Другой подход заключается в использовании *MobileNet-SSD* для локализации светофоров (нахождение их ограничивающих прямоугольников) и *InceptionV3* для распознавания их состояния (цвета; исходный код доступен по ссылке [11]). *SSD* – *single shot detector* – архитектура нейронной сети, разработанная для целей детекции, включает в себя локализацию объекта и классификацию. *SSD*, представленная в [11], для извлечения признаков использует архитектуру *VGG*.

MobileNet [12] – это эффективная и более легкая архитектура нейронной сети, которая может быть использована для классификации или извлечения признаков. Сочетание *MobileNet-SSD*

Рис. 4. Пример работы системы (3D-координаты релевантных светофоров с лидара проецируются в 2D-координаты кадра после чего вокруг них строится 1,5-метровая сфера; релевантными светофорами в кадре считаются те, чьи центры попадают в эту сферу и максимально близко лежат к центру реального светофора)

фактически означает, что для извлечения признаков используется *MobileNet* (без последнего полносвязного слоя) вместо *VGG*, а для локализации объекта – *SSD*.

После локализации на кадре светофоров определяется класс их состояния при помощи нейронной сети *InceptionV3* [13].

Для классификации используются веса предобученной на наборе данных *ImageNet* [13] модели, доступные в *TensorFlow*. Модель дообучается на вырезанных с кадров светофорах набора данных *LISA*. В качестве функции потерь используется кросс-энтропия в задаче мультклассовой классификации (*categorical cross-entropy*) – *softmax* активация в сочетании с кросс-энтропийной функцией потерь. Дообучение длится 10 эпох с размером батча 32. Выходом данной сети является один из 7 классов, которые соответствуют классам в аннотациях набора данных *LISA*.

3. Сравнение

Сравним два описанных подхода. Для сравнения используется часть набора данных *LISA* – 7 473 изображения с 18 020 размеченными светофорами. Качество работы двух подходов складывается из качества работы, локализующей и классифицирующей частей. Оценка локализации производится при помощи расчета меры Жаккара (*Intersection over Union*) для каждой детекции. Найденные детектором светофоры связываются с существующей разметкой с порогом 10%. Введем следующие события:

- *TP*-детектор «верно локализовал светофор (найдена соответствующая разметка – прямоугольники разметки и детекции пересекаются более, чем на 10%, по отношению к их общей площади)»;
- *FP*-детектор «нашел светофор там, где его нет, то есть не найдено такого прямоугольника в разметке кадра, который пересекался бы с найденным более, чем на 10%»;
- *FN*-детектор «не нашел светофор, хотя он есть и для него есть разметка – пересечение менее, чем 10%».

Стоит отметить, что *TN* в данном случае не определена, так как это величина означает то, что детектор не определил светофор, где его действительно нет. По введенным величинам строятся такие функции оценок, как:

- $Precision = TP / (TP+FP)$ – столько раз детектор нашел светофор, где он действительно есть, по отношению к общему числу предсказанных светофоров;
- $Recall = TP / (TP+FN)$ – столько светофоров нашел детектор из действительно присутствующих в кадрах;
- $F1 = 2TP / (2TP+FP+FN)$ – оценка баланса между точностью (*precision*) и полнотой (*recall*).

Также в случае с видеопоследовательностями, можно использовать функции: *MOTA* (*multiple object tracking accuracy*) [14], которая оценивает общую точность отслеживания и детекции и *MOTP* (*multiple object tracking precision*), которая оценивает точность локализации светофоров (схожа с метрикой *mAP*).

$$MOTA = 1-((FN+FP+IDS)/GT), \quad (2)$$

где *GT* – суммарное количество аннотаций;
IDS – количество потерь трека светофоров.

В нашем случае показатель *IDS* не важен, так как производится оценка именно локализации, поэтому эта величина не участвует при расчете показателя *MOTA*:

$$MOTP = \frac{1}{TP}\sum IoU_i, \quad (3)$$

где IoU_i – мера Жаккара i-го объекта на всей тестовой выборке.

Формулы (2) и (3) соответствуют формулам функций *MOTA и MOTP*, соответственно. При этом значения функции *MOTA* могут быть отрицательными – допустимая область значений $(-\infty, 1]$.

Таблица 1

Сравнительная оценка качества распознавания детектирующими сетями

Метрика качества	Нейронная сеть	
	YOLOv3 (детектор)	SSD-MobileNet V1
TP, шт.	15 420	4 048
FP, шт.	2 095	12 276
FN, шт.	2 600	13 972
Precision, %	0,88	0,25
Recall, %	0,86	0,22
F1, %	0,87	0,24
MOTA, %	0,74	-0,46
MOTP, %	0,59	0,44

Таблица 1 отображает количественные оценки для двух подходов.

Как видно из *таблицы 1* детектор *YOLOv3* имеет значительно более высокие показатели, что означает, что он намного больше находит действительных светофоров и гораздо меньше ошибается, детектируя не относящееся к делу окружение. Примечательно, что значение функции *MOTA* для *YOLOv3* достаточно близко к 1, в то время как оценка для *SSD-MobileNet V1* имеет отрицательное значение.

В оценку классифицирующей части включены все объекты, которые входят в множество *TP* локализующей части. Классифицирующая нейронная сеть *InceptionV3* второго подхода на выходе имеет 7 классов, в то время как классификатор *YOLOv3* предсказывает всего 2. Связи с этим матрицы ошибок имеют разные размеры. На *рисунке 5* отображена матрица ошибок и отчет о классификации, содержащий «*precision*-», «*recall*-» и «*F1*-меру» для нейросети *InceptionV3*. Здесь номера классов 0…6 означают состояния светофора «*go*», «*goForward*», «*goLeft*», «*stop*», «*stopLeft*», «*warning*», «*warningLeft*», соответственно.

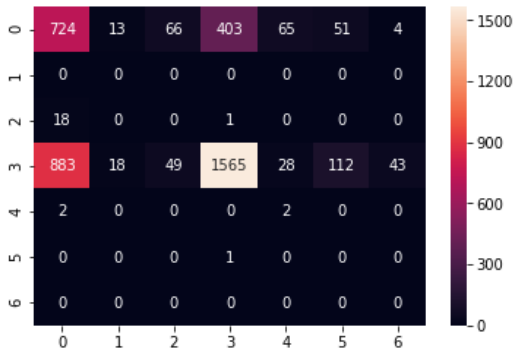
Как можно видеть, распознаются только классы «*go*» и «*stop*» (хотя и с не очень высоким значением *F1*-меры), остальные классы не распознаются в принципе. Такую оценку можно объяснить тем, что для большого количества классов и достаточного качества их распознавания очень важно иметь широкую и сбалансированную обучающую выборку. Такой выборки не было зафиксировано на этапе обучения данной сети.

Классифицирующая часть *YOLOv3* на выходе имеет всего 2 класса. Поэтому можно определить некоторую переходную матрицу ошибок (*рисунок 6 а*), которая содержала бы 7 классов реальных и 2 класса предсказываемых ошибок. Однако, большим смыслом будет обладать матрица ошибок в «обычном варианте» (*рисунок 6 б*) – здесь реальные классы «*go*», «*goForward*» и «*goLef*» объединены в класс «*go*» (метка 0), а классы «*stop*», «*stopLeft*», «*warning*» и «*warningLeft*» объединены в класс «*stop*» (метка 1).

Численные оценки классификации этой нейросети имеют значения, близкие к 100% (*рисунок 7*).

Такую большую с предыдущей нейронной сетью разницу в качестве можно объяснить несколькими обстоятельствами: более долгое обучение на достаточно релевантных наборах данных, меньшее число предсказываемых классов, более сбалансированная и широкая обучающая выборка, большее число тестовых картинок, так как более качественный детектор смог правильно локализовать большее число светофоров, которые затем и классифицировались.

Сравнивая классификаторы *YOLOv3* и *InceptionV3*, можно заметить, что классы «*go*» и

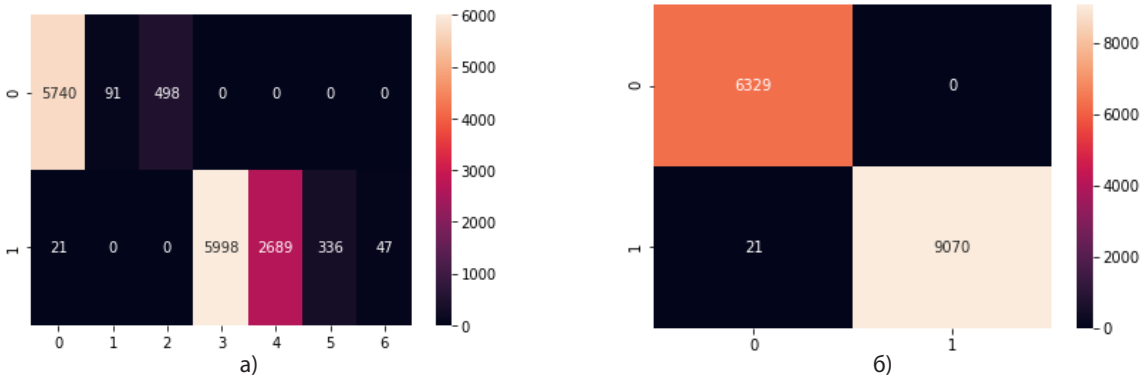


а)

	precision	recall	f1-score	support
0	0.55	0.44	0.49	1627
1	0.00	0.00	0.00	31
2	0.00	0.00	0.00	115
3	0.58	0.79	0.67	1970
4	0.50	0.02	0.04	95
5	0.00	0.00	0.00	163
6	0.00	0.00	0.00	47
accuracy			0.57	4048
macro avg	0.23	0.18	0.17	4048
weighted avg	0.51	0.57	0.52	4048

б)

Рис. 5. Матрица ошибок (а) и численная оценка работы (б) *Inception V3*



а) б)

Рис. 6. Переходная 2×7 (а) и обычная 2×2 (б) матрицы ошибок нейросети *YOLOv3*

«*stop*», наиболее широко представленные в датасете *LISA*, лучше всего распознает *InceptionV3*. *YOLOv3* распознает эти классы также хорошо, но в случае с *YOLOv3* данные подготовлены лучше. Это еще раз показывает важность составления репрезентативной, широкой и сбалансированной обучающей выборки.

	precision	recall	f1-score	support
0	1.0000	0.9967	0.9983	6350
1	0.9977	1.0000	0.9988	9070
accuracy			0.9986	15420
macro avg	0.9988	0.9983	0.9986	15420
weighted avg	0.9986	0.9986	0.9986	15420

Рис. 7. Численная оценка качества работы классификатора *YOLOv3*

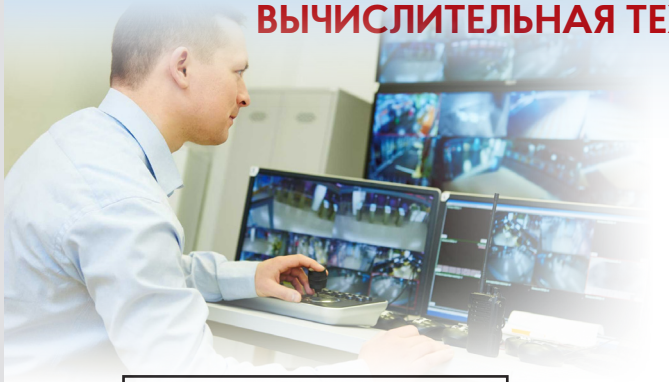
Заключение

Были рассмотрены основные наборы данных, на которых обучались и тестировались рассматриваемые нейронные сети. Приведены два подхода к детектированию – локализации и классификации светофоров: *YOLOv3*, в которой решалась задача определения состояния релевантных светофоров, и сочетание предобученных *SSD-MobileNet V1* и *InceptionV3*. Каждая сеть рассмотрена с точки зрения ее архитектуры, процесса обучения, используемых для обучения и тестирования наборов данных.

Приведенные подходы были сравнены на части датасета *LISA*. Отдельно было оценено качество локализации и классификации светофоров. По анализу полученных данных видно, что нейронная сеть *YOLOv3*, имеет сильное преимущество перед альтернативным подходом, что объясняется разными обучающими процессами и различным качеством обучающих выборок. В целом для обеспечения релевантности сравнения необходимо использовать фиксированные наборы данных как во время обучения, так и во время тестирования сети.

Литература

1. Бикмаев Р.Р., Полукаров А.А., Садеков Р.Н. Определение местоположения наземного транспортного средства с использованием монокамеры и дорожных знаков с геодезической привязкой // Сб. матер. XXVII С-Пб. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 2020. С. 341-345.
2. Jensen M.B., Philipsen M.P., Mogelmose A., Moeslund T.B., Trivedi M.M. Vision for looking at traffic lights: Issues, survey, and perspectives // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016. №17. Pp. 1800-1815.
3. Verma M.P., Singh V.B.P. Traffic light recognition system: A computer vision based approach // International Journal For Science Technology And Engineering, 2016. URL: https://ijste.org/ Article. php?manuscript= IJSTEV3I3035 (дата обращения: 25.12.2022).
4. Berriel R.F., Lopes A.T., de Souza A.F., Oliveira-Santos T. Deep Learning Based Large-Scale Automatic Satellite Crosswalk Classification // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017. Vol. 14. Pp. 1513-1517.
5. Суворов Г.П., Смирнов Д.В., Коробков А.А., Аллилуева Н.В Система видеомониторинга и аналитики пассажиропотока на основе методов искусственного интеллекта и сверточных нейронных сетей с реализацией на Python // Известия Института инженерной физики, 2022. № 3 (65). С. 67-74.
6. Бикмаев Р.Р., Садеков Р.Н. Особенности применения сверточных нейронных сетей в задаче распознавания морских надводных объектов // Известия Института инженерной физики. 2019. №4(54). С. 105-110.
7. Асатрян К.А., Прун В.Е. и др. Распознавание дорожных знаков на панорамных снимках для создания навигационных карт // Сб. матер. XXVII С-Пб. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 2017. С. 111-117.
8. Fregin A., Muller J., Krebel U., Dietmayer K. The DriveU Traffic Light Dataset: Introduction and Comparison with Existing Datasets // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2018. Pp. 3376-3383.
9. Hamzah R., Ibrahim H. Literature Survey on Stereo Vision Disparity Map Algorithms // Journal of Sensors, 2016. Pp. 1-23.
10. Possatti, Lucas C. et al. Traffic Light Recognition Using Deep Learning and Prior Maps for Autonomous Cars // International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2019. Pp. 1-8.
11. SSD-MobileNet V1 detection and InceptionV3 classification source code. URL: https:// www.kaggle.com/ code/ chandanakuntala/ detection- classification- of-traffic- lights/notebook# CLASSIFICATION (дата обращения: 25.12.2022).
12. Howard A.G. et al. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Application // Preprint arXiv: 1704.04861, 2017. Pp. 1-9.
13. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S. et. al. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015. Pp. 2818-2826.
14. Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Kai Li and Fei-Fei Li ImageNet: A large-scale hierarchical image database // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. Pp. 248-255.



УДК 004.896

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ПРОЕКТЕ СИСТЕМЫ ВИДЕОМОНИТОРИНГА И АНАЛИТИКИ ПАССАЖИРОПОТОКА НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ[1]

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF A NEURAL NETWORK IN THE PROJECT OF A VIDEO MONITORING AND PASSENGER TRAFFIC ANALYTICS SYSTEM ON VEHICLES

Геннадий Петрович Суворов
кандидат технических наук

Дмитрий Вячеславович Смирнов
почётный работник науки и техники Российской Федерации
доктор технических наук, доцент
Первый Вице-президент
АНО «Институт инженерной физики»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1А, стр. 1
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: dvsmirnov@iifmail.ru

Алексей Александрович Коробков
почётный работник науки и высоких технологий Российской Федерации
кандидат технических наук, доцент
начальник научно-методического управления
АНО «Институт инженерной физики»
E-mail: korobkow@iifmail.ru

Сергей Владимирович Елохин
начальник отдела сопровождения НИОКР
АНО «Институт инженерной физики»
E-mail: os11@iifmail.ru

Наталья Владимировна Аллилуева
специалист по сопровождению
АНО «Институт инженерной физики»
E-mail: os11@iifmail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены аспекты практического применения свёрточной нейронной сети с применением алгоритма YOLO v.5, реализованной на фреймворке PyTorch/Python для создания системы детекции пасажиропотока, раскрыты методы обучения нейронной сети с учетом сезонности и географического применения системы, определены методы коррекции ошибок нейронной сети алгоритмом системы детекции, определены основные задачи для нейронной сети системы мониторинга пассажиропотока, представлены результаты по подготовке данных для нейронной сети и программа по распознаванию и подсчету пассажиров, представлены практические результаты исследования и тестирования разработанной системы на автобусах г. Серпухова Московской области, а также определена возможность масштабирования разработанной системы по мониторингу и подсчету пассажиров.

Ключевые слова: алгоритм детекции объектов, аналитика пассажиропотока, видеомониторинг объектов на изображении, искусственный интеллект, классификация объектов на изображении, распознавание образов, сверточная нейронная сеть, система мониторинга пассажиропотока.

Summary

The article discusses aspects of the practical application of a convolutional neural network using the YOLO v.5 algorithm implemented on the PyTorch/ Python framework for creating a traffic flow detection system, reveals methods for training a neural network taking into account seasonality and geographical application of the system, defines methods for correcting neural network errors by the detection system algorithm, defines the main tasks for the neural network monitoring system passenger traffic, the results of data preparation for a neural network and a program for recognizing and counting passengers are presented, the practical results of the research and testing of the developed system on buses in Serpukhov, Moscow region, are presented, and the possibility of scaling the developed system for monitoring and counting passengers is determined.

Keywords: object detection algorithm, passenger traffic analytics, video monitoring of objects in the image, artificial intelligence, classification of objects in the image, pattern recognition, convolutional neural network, passenger traffic monitoring system.

[1] Публикация представлена в рамках реализации результатов, полученных при выполнении гранта Правительства Московской области в сферах науки, технологий, техники и инноваций (договор № 139/12-20 от 03.12.2020) по теме: «Система видеомониторинга и аналитики пассажиропотока на транспортных средствах с использованием методов искусственного интеллекта и свёрточных нейронных сетей».

Введение

По результатам проведенного ранее исследования [1] по анализу и выбору нейронной сети (НС) и ее конфигурации [2, 3] для реализации системы мониторинга пассажиропотока и подсчета пассажиров в городском общественном транспорте самой оптимальной оказалась свёрточная[2] нейронная сеть (СНС) *CNN* с применением алгоритма *YOLO*[3] в конфигурации v5, нацеленной на эффективное распознавание образов [4]. Данная сеть была реализована на фреймворке PyTorch/ Python в операционной системе Windows [5].

НС системы мониторинга пассажиропотока должна включать в себя функции детекции и мониторинга. Основные задачи системы:

1) считывание изображений из видеопотока;

2) обработка и преобразование изображения в трехмерный тензор (трехмерная матрица вещественных чисел) размерностью 3×576×576;

3) классификация объектов на изображении (по классам) с помощью НС;

4) определение геометрических параметров распознанных объектов на изображении;

5) детекция, мониторинг и регистрация реальных входящих и выходящих пассажиров.

Машинное обучение использует запрограммированные алгоритмы [6], которые получают и анализируют входные данные, а затем прогнозируют выходные значения из допустимого диа-

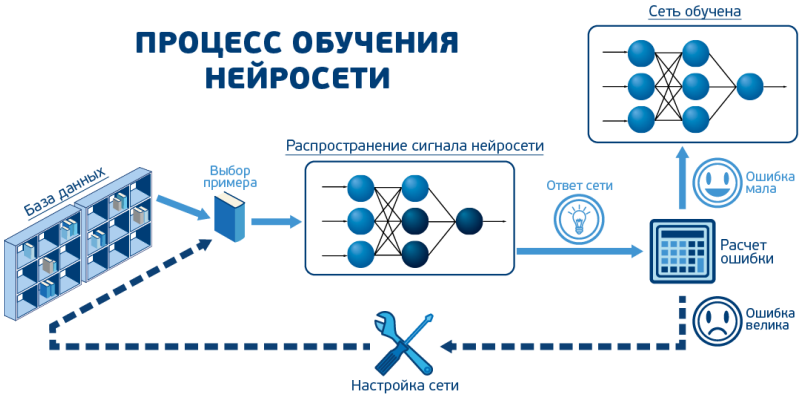


Рис. 1. Процесс обучения НС

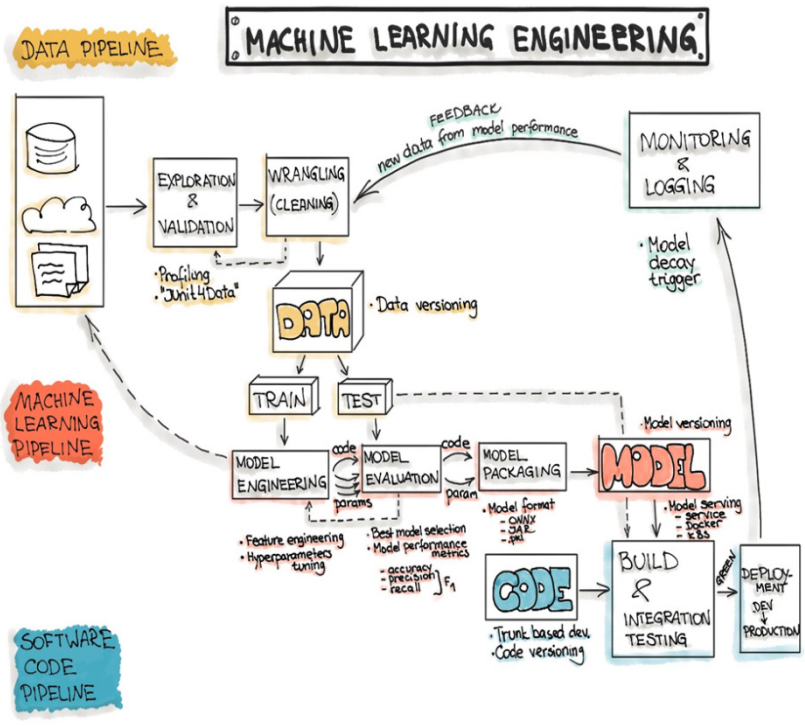


Рис. 2. Классическая схема системы машинного обучения

[2] CNN (Convolutional Neural Network) – СНС (свёрточная нейронная сеть).

[3] YOLO – модель для распознавания объектов в реальном времени.

пазона. По мере поступления новых данных эти алгоритмы обучаются и оптимизируют свою деятельность, повышая производительность и, со временем, развивая «интеллект» (см. *рисунок 1*).

Если обратиться к классической схеме системы машинного обучения [7] (*рисунок 2*), то можно констатировать, что большая часть компонентов этой схемы были реализованы в проекте по созданию Системы видеомониторинга и аналитики пассажиропотока на транспортных средствах с использованием методов искусственного интеллекта и свёрточных нейронных сетей (далее – Проект).

Из компоненты *Data pipeline* (конвейер данных) были реализованы следующие элементы:

- анализ и верификация входных видеоданных;
- очистка и селекция данных для обучения НС;
- хранение в базе данных и доступ к наборам данных;
- разделение и манипулирование обучающим и тестовым набором данных.

Из компоненты *Machine learning pipeline* (конвейер машинного обучения) были реализованы следующие элементы:

- разделение данных на обучающий и тестовый набор (процедура тренинга НС и оценки параметров аккуратности и точности НС);
- тестирование на случайно выбранных наборах и способах организации тестового и обучающего набора (в частности, был реализован и имплементирован метод обучения НС – *cross-validation*[4]);
- разработка процедуры упаковки комплекта модели в *production* [1] версии.

Из компоненты *Software code pipeline* (конвейер программного кода) реализованы:

- алгоритмы детекции и мониторинга, работающие в тесном контакте с НС;
- процедура оптимизации гиперпараметров (*hyper parameters*);

Хронометраж работы системы на реальном видеопотоке с автобуса, курсирующего по маршруту № 4 (Вокзал – Владычная Слобода (ул. Октябрьская)) в г. Серпухове Московской области дал следующие результаты на выполнение основных задач:

- на выполнение п.п. 1, 2 было затрачено ~17% машинного времени;
- на выполнение п.п. 3-4 было затрачено ~80% машинного времени;
- на выполнение п. 5 было затрачено ~3% машинного времени.

В целом разработанная система в состоянии за 1 с машинного времени обработать 3,5 с видеопотока. Точность в процессе детекции и мониторинга составляет 94%.

Для перевода входных данных, поступающих с видеокамер, в определенный формат: JPEG для изображений и MP4 для видеоданных (разрешающая способность изображений не менее 600×800 пикселей, частота видеопотока – 25 кадров/с) был разработан программный комплекс (ПК) *Data pipeline*, включающий программные средства и база данных.

1. ПК Data pipeline

У ПК *Data pipeline*[5] реализованы два режима работы:

- регламентированный регулярный мониторинг;
- исследовательский режим.

Регулярный режим работы Data pipeline

Видеопоток данных о входе и выходе пассажиров, поступающих с видеокамер, установленных над дверьми автобуса, поступает на облачный видеосервер в виде одноминутных файлов. Собранные поминутные файлы хранятся на видеосервере и передаются в систему мониторинга теми же минутными файлами по запросу.

Получив по запросу минутные файлы, *Data pipeline* их разбраковывает: проверяет, что они могут быть прочитаны и «склеивает» из них эпизоды видеопотока (непрерывные видеопотоки без сбоев). Эпизоды пойдут впоследствии в НС для распознавания и подсчета пассажиропотока.

Исследовательский режим работы Data pipeline

Образы пассажиров и видеопотоки, которые необходимо распознавать НС, зависят от многих факторов. В число наиболее важных входят:

- погодные условия и сезон (весна, лето, осень, зима);
- особенности демографии и, например, даже моды в регионе мониторинга;
- освещение и положение солнца.

Как правило, для региона мониторинга разрабатывается четыре сезонных варианта НС. Каждая из сетей настраивается и обучается на изображениях соответствующего сезона и в дальнейшем периодически дообучается в процессе эксплуатации.

Для отбора и «вырезания» отдельных кадров

[4] cross-validation (кросс-валидация) – это методика обучения и оценки модели, которая разбивает данные на несколько секций и обучает несколько алгоритмов на этих секциях.

[5] Data pipeline – конвейер данных.

из видеопотока написана специальная утилита. *Data engineer*, пользуясь этой утилитой, просматривает эпизоды и отбирает наиболее характерные изображения (кадры) для использования в обучении НС.

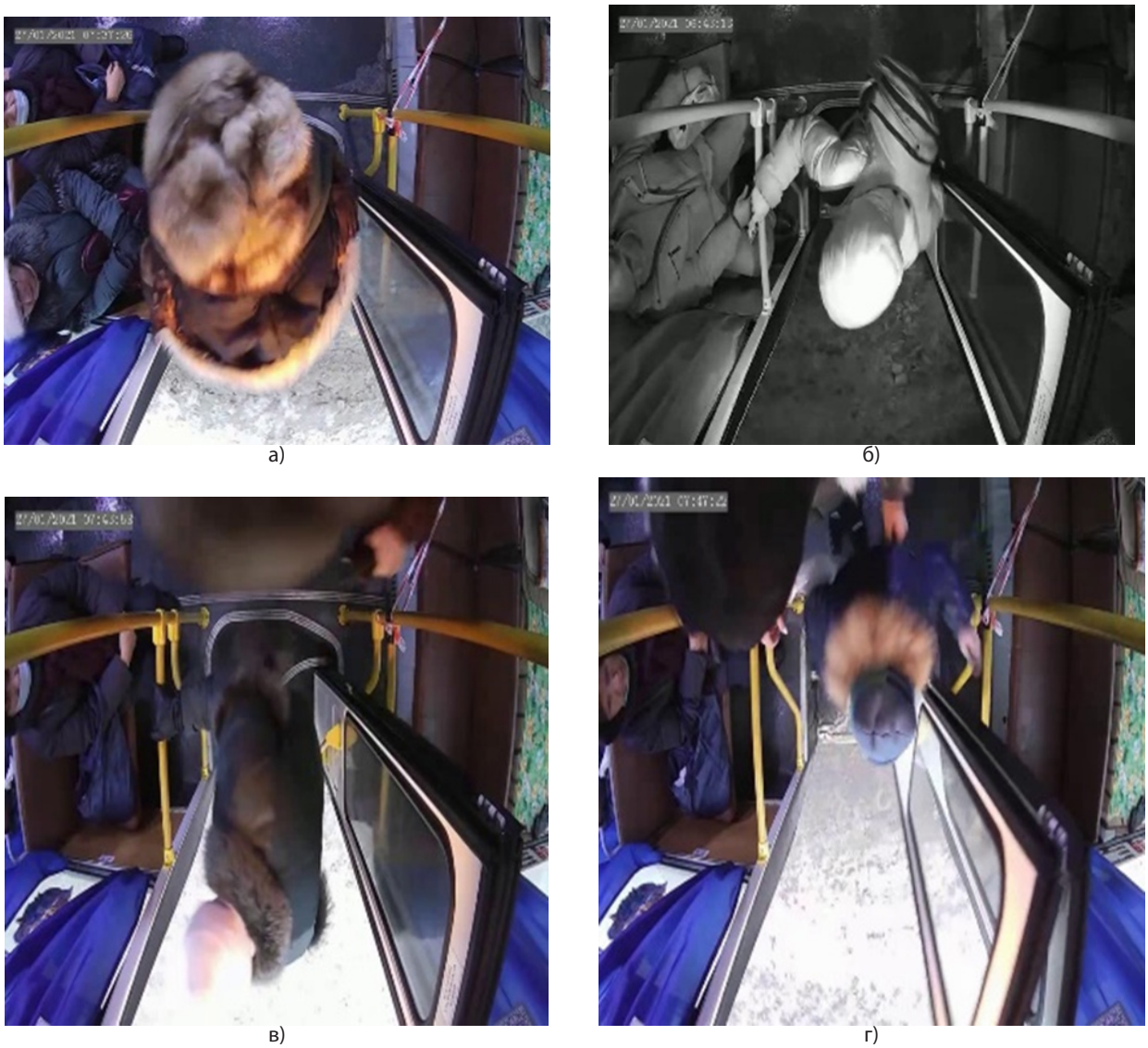
На *рисунке 3* показаны образцы кадров, использованные для обучения зимнего варианта НС для г. Серпухова Московской обл.

Для того чтобы нейронную сеть можно было научить распознавать нужные для анализа объекты, данные нужно маркировать. Процесс маркировки заключается в указании охватывающего прямоугольника, в котором на изображении находится объект, и класса, к которому принадлежит объект. На изображении может быть расположено несколько объектов различных классов. Для каждого файла изображения (*image*) создается файл-компаньон (*label*), который содержит сведения о геометрии и классах объектов на этом изображении. Существует несколько стандартов представления информации в *label*-файлах. В нашей системе используется стандарт *YOLO*.

Утилита для маркировки файлов создание *label*-файлов для отобранных *Data engineer*-изображений осуществляется с помощью специальной программы – *labelImg*. Интерфейс этой программы приведен на *рисунке 4*.

На *рисунке 4* видно, как маркированы головы пассажиров и положение дверей. На левой картинке в верхнем левом углу видна часть головы пассажира, которая была маркирована как голова «брюнета», а рядом почти в центре картинки шапка женщины маркирована как «шапка из темной материи».

С помощью этой утилиты все файлы (*images*), отобранные *Data engineer*, вместе с их *label*-файлами сохраняются в специальной папке. В



а) б) в) г)

Рис. 3 (а-г). Маркировка объектов на изображениях

дальнейшем пары файлов *image/ label* используются нейронной сетью для настройки *multiclass*-распознавания.

2. Обучение нейронной сети

Периодически *Data engineer*[6] проводит дообучение нейронной сети. Для этого выбирается определенная дата. *Data engineer* просматривает вручную полный видео файл, полученный и склеенный как было описано выше. И записывает периоды времени, когда происходят интересующие его эпизоды. В результате формируется *Excel*-таблица, где в числе прочих параметров, указаны временя начала и конца каждого эпизода.

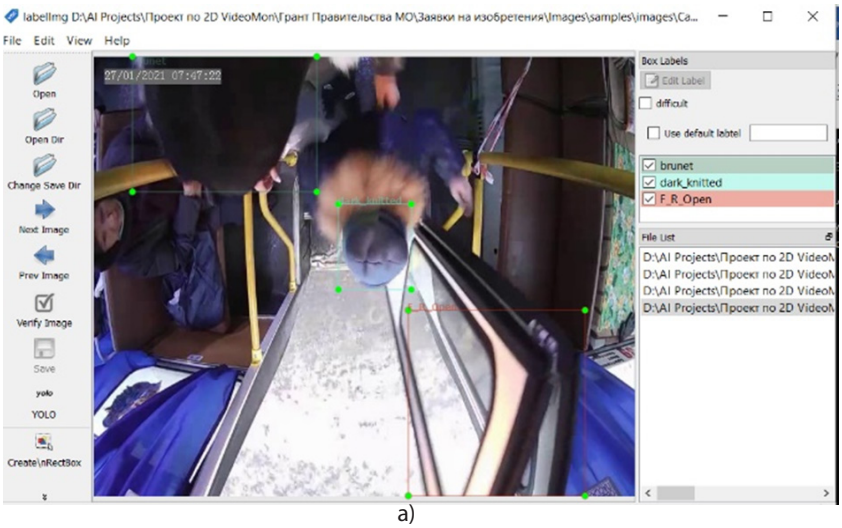
Утилита «разрезания» видеофайла на эпизоды

Сформированная *Data engineer Excel*-таблица подается на вход специальной программы, которая берет заданный видеофайл и разрезает его на эпизоды. Время начала и окончания каждого эпизода соответствует данным из *Excel*-таблицы. Далее идет процесс отбора кадров для маркировки.

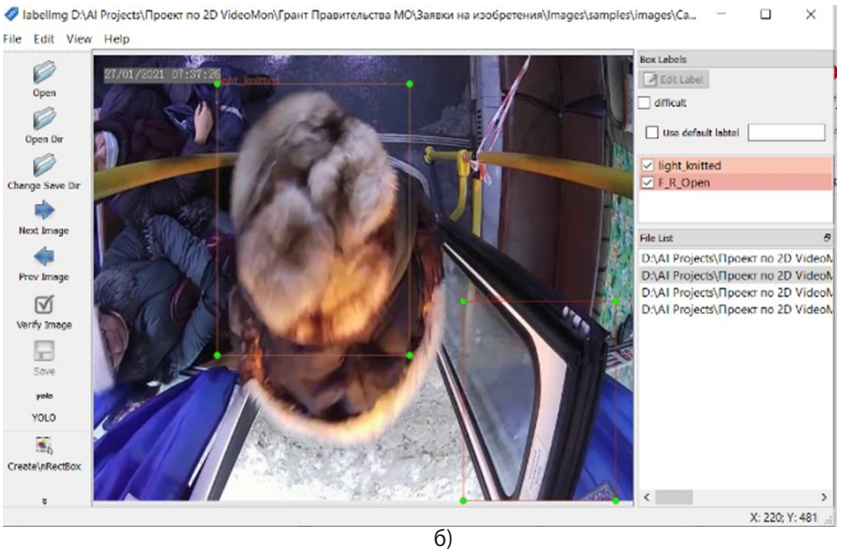
В результате работы комплекса программ (*Data engineer*) на регулярной основе принимаются и обрабатываются видеопотоки, которые передаются нейронной сети для распознавания, детекции и мониторинга пассажиропотока. Также готовятся данные в формате *YOLO* для начального и последующих обучений нейронной сети.

3. Детекция объектов в видеопотоке

Детекция объектов (*Object detection*) [2] – это компьютерная технология, связанная с компьютерным зрением и распознаванием объектов определенного класса (таких как: люди, здания, автомобили) на изображениях и видео.



а)



б)

Рис. 4 (а, б). Интерфейс программы labelImg для маркировки файлов

[6] Data Engineer (дата-инженер) – это комплекс программ, который собирает и обрабатывает большие данные, загружает их в модель для анализа, а затем организовывает их хранение и дальнейшее использование в бизнесе.

Направление распознавания лиц и пешеходов (пассажиров) является наиболее исследованным (разработанным) направлением в детекции. Как правило, распознавание осуществляет НС, натренированная на объектах интересующих классов.

НС в состоянии распознавать объекты в изображениях или на видео. В качестве результата НС возвращает список классов распознанных объектов и их геометрическое положение на изображении. Это важная часть, но это еще не детекция.

Особенности реализация алгоритмов:

- обнаружение теней и «фантомных» образов;
- обработка «высоких» пассажиров;
- распознавание сдвоенных объектов (пассажир с рюкзаком) и проч.

При получении очередного списка объектов на изображении задача алгоритмов детекции состоит в следующем:

- определить новые объекты, которых раньше не было и которые появились во входной зоне (или в зоне салона);
- определить изменения в геометрии «старых» объектов, которые были в списке объектов на предыдущем шаге.

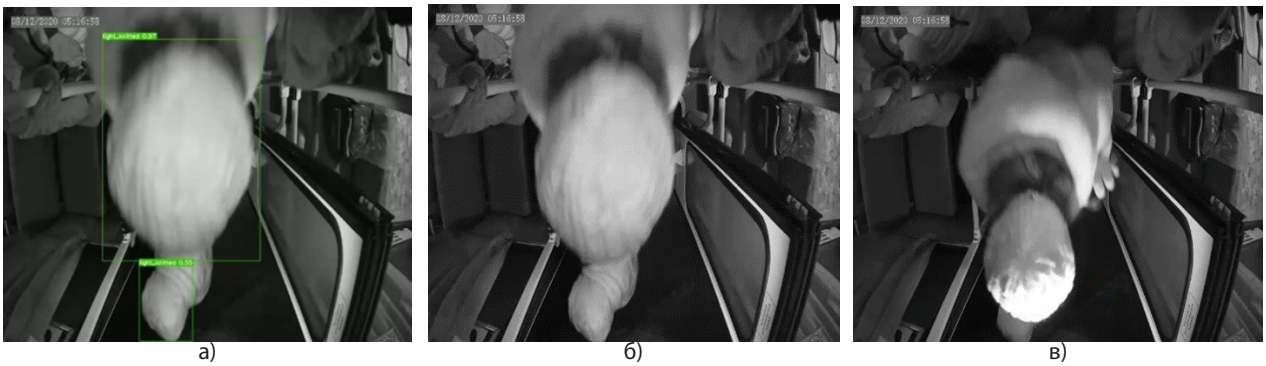
Нейронная сеть работает с погрешностью, поэтому некоторые объекты, которые были в списке, на следующем, новом изображении (кадре) могут быть не распознаны, поэтому алгоритм детекции в течение нескольких шагов (заданных как параметр алгоритма) помнит такие виртуальные объекты. В случае их возврата из «небытия» на текущем шаге, алгоритм распознает эти виртуальные объекты и переводит их из виртуального состояния в обычное с коррекцией геометрии.

Примеры исчезновения и восстановления объектов можно увидеть в последовательности кадров из видеопотока на *рисунке 5*.

Существуют также особый вид объектов (независимо от их класса), которые обрабатываются по специальным правилам. Это «высокие» пассажиры. Их головы расположены слишком близко к видеокамере и поэтому их невозможно обрабатывать базовым алгоритмом (т.к., изображение их головы на снимке занимает почти весь кадр: от зоны входа в автобус до зоны салона, см. *рисунок 6*). Для таких пассажиров была разработана программа их обнаружения.

Алгоритм детекции распознает такие объекты и обрабатывает их уже по другим правилам и процедурам, которые отличаются от базового алгоритма детекции:

- отследить объекты, которые когда-то вошли через зону входа и в процессе обработки эпизода «исчезли» в зоне салона (эти объекты регистрируются как вошедшие пассажиры);



а) б) в)

Рис. 5 (а-в). Видеоданные с камеры над дверьми автобуса

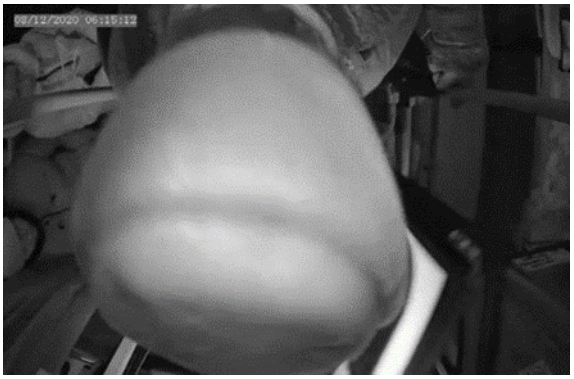


Рис. 6. Пример изображения высокого объекта

Рис. 7. Фантом в отражении на стекле

● отследить объекты, которые когда-то появились в зоне «салона», и в процессе мониторинга эпизода «исчезли» в зоне «входа» (такие пассажиры регистрируются как вышедшие).

По окончанию эпизода алгоритм разбирает список текущих объектов: удаляет фантомы (см. *рисунок* 7), а также объекты в неопределенном состоянии. Объект считается в неопределенном состоянии если он легитимно появился через зону входа (зону салона) и не вышел через противоположную зону салона (входа). Эти «объекты» де-регистрируются и не участвуют в подсчете пассажиров.

Для обнаружения фантомов была разработана специальная процедура, которая рассчитывала расстояние, которое проходит объект в течение эпизода движения пассажиров. Если какие-то объекты не проходили определенного расстояния (заданного как гипер-параметр), то они считались фантомами.

Сдвоенные объекты могут образоваться по нескольким причинам:

● женщина с ребенком в панаме на руках;

● человек с рюкзаком на спине, когда НС по ошибке распознает рюкзак как шапку или матерчатую кепку и проч.

Для решения проблемы сдвоенных объектов была разработана специальная программа, которая отслеживает подобие траектории движения «близких» объектов. Если мера близости траекторий была ниже порогового (гипер-параметр) значения, то один из объектов исключался из рассмотрения при обработке эпизода.

4. Результаты исследования

В процессе проведения данного исследования были разработаны 2 программы, на которые получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1) Программа подготовки наборов данных для нейронной сети, распознающей изображения в пассажиропотоке (свидетельство № 2021665398 от 24.09.2021);

2) Программа детекции, мониторинга и подсчета пассажиров общественного транспорта с помощью нейронной сети (свидетельство № 2021665578 от 29.09.2021).

Разработанная НС перенесена в операционную систему *Linux*. Построен «конвейер» (*Pipe line*) подготовки данных для нейронной сети на языке *Python* с применением базы данных *MySQL*.

Решена важная задача – масштабирование сервиса за счет переноса основных аналитических расчетов на бортовые компьютеры транспортных средств (технология *Edge Computing*).

Точность распознавания объектов (головы и головные уборы пассажиров) НС составила 94%, что вполне достаточно для алгоритмов детекции и мониторинга.

5. Практическое применение результатов исследования (пилотные проекты)

В рамках практической реализации полученных в ходе проведенных исследований результатов были успешно проведены комплексные испытания системы на автобусах двух перевозчиков со сравнением результатов работы системы и отчетов перевозчика.

Для испытания работы системы на реальных объектах были установлены камеры на автобусах в г. Серпухове Московской обл. (маршрут № 4).

Результаты испытаний по точности и аккуратности распознавания объектов НС оказались на уровне ~86%; показатели точности подсчета пассажиропотока ~93%.

Причины улучшения:

● если НС на нескольких кадрах не распознала объект, то с точки зрения НС это ошибки, однако, алгоритм детекции часто восстанавливает такие объекты и не считает их временное исчезновение ошибкой;

● НС часто путает пассажира – брюнета и темную матерчатую шапку, т.е. с т.з. НС – это ошибка, однако, алгоритм детекции определяет объект и засчитывает его;

● сдвоенные объекты часто дают ошибки, которые исправляет алгоритм мониторинга.

В целом испытания показали высокое качество основных компонентов, производительности и аккуратности детекции и мониторинга пассажиропотока.

6. Масштабирование проекта

Разработанная система может быть применена для детекции, мониторинга и аналитики пассажиропотока на общественных транспортных средствах муниципального хозяйства. Особую роль система может сыграть в проблеме борьбы с нелегальным оборотом наличных средств и воровства при оплате проезда (в некоторых муниципалитетах недобирается до 40% оплаты проезда в общественном транспорте). Проект практически окупается в течение первого года работы и в дальнейшем приносит регулярные доходы.

Проект практически по всем параметрам соответствует проектам федерального уровня. Для полномасштабного внедрения реализуемого Проекта в ряде региональных городов нужно решить следующие вопросы и создать необходимые бизнес-компоненты:

1. Управляющую компанию, которая будет отвечать за организацию бизнеса и управления в участвующих региональных городах;

2. Эксплуатационную или ***сервисную компанию*** для обслуживания технических комплексов, установленных на транспортных средствах, в каждом из участвующих городов;

3. Логистическую компанию по поставке запчастей и предупредительном ремонте установленных технических комплексов.

4. Лабораторию искусственного интеллекта, которая будет заниматься сопровождением разработанного продукта, управлением наборами данных для всего множества нейронных сетей, дальнейшей доработкой ядра системы и внедрением программного комплекса в новые города.

В дополнение, должна быть решена техническая проблема доставки сигналов об открытии и закрытии дверей до нейронной сети. Около 90% рабочего времени транспортные средства (ТС) движутся с закрытыми дверями и нагружать нейронную сеть непрерывным мониторингом открытия/закрытия дверей явно неэффективно. Необходимо отметить, если этот вопрос не будет решен в промышленной версии, то потребуется строить не менее двух нейронных сетей только на распознавание дверей: двери «складывающиеся» (folding) и двери «скользящие» (sliding). И это при условии, что во всех городах на всех типах (включая старые) автобусах стоят одинаковые двери, что явно не соответствует реальности.

Для отдельных регионов придется строить отдельные сети в силу погодных и демографических особенностей. Очевидно, что для распознавания пассажиров, например, в г. Мурманске и в г. Краснодаре, потребуются отдельные нейронные сети.

Выводы

Разработанная в рамках проекта программа для системы мониторинга и учета людей, пересекающих заданную линию, предоставляет ценную информацию для принятия бизнес-решений, в таких сферах, как:

- *торговля*: информация о количестве посетителей магазинов, торговых центров, а также отдельных зон магазинов и торговых центров;
- *банки*: получение информации о количестве посетителей отделений;
- *гостиницы и туризм*: получение информации о количестве посетителей ресторанов, кинотеатров, турагентств и пр.
- *транспорт*: оценка параметров движения пассажиропотоков в системах «умного» города, оценить загруженность маршрутов общественного транспорта, улучшить собираемость платы за проезд (уменьшения незаконного оборота «черного нала»).

Литература

1. Суворов Г.П., Смирнов Д.В., Коробков А.А., Аллилуева Н.В. Система видеомониторинга и аналитики пассажиропотока на основе методов искусственного интеллекта и свёрточных нейронных сетей с реализацией на Python // Известия Института инженерной физики, 2022. № 3 (65). С. 67-74.

2. KDnuggets. Object Detection: An Overview in the Age of Deep Learning, (Обнаружение объектов: Обзор в эпоху глубокого обучения). URL: https://www.kdnuggets.com/2017/09/object-detection-overview-deep-learning.html (дата обращения: 01.03.2023).

3. Kumar V. Convolutional Neural Networks. Basic fundamentals of CNN (В. Кумар. Свёрточные нейронные сети. Основы CNN). URL: https://towardsdatascience.com/convolutional-neural-networks-f62dd896a856 (дата обращения: 01.03.2023).

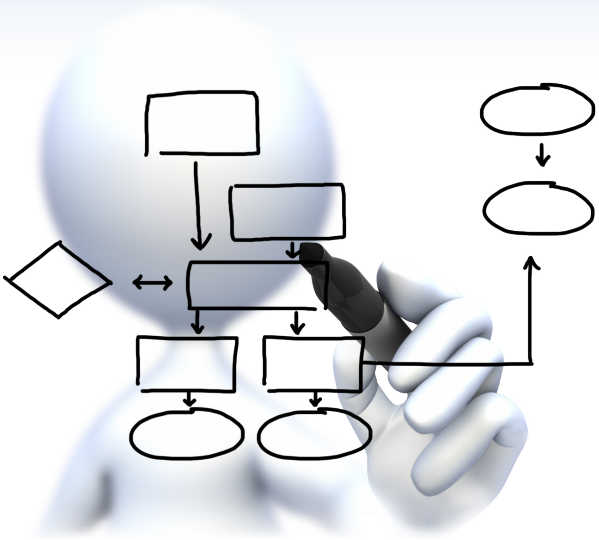
4. Valkov V. Object Detection on Custom Dataset with YOLO (v5) using PyTorch and Python (Вальков В. Обнаружение объектов в пользовательском наборе данных с помощью YOLO (v5) с использованием PyTorch и Python), 2021. URL: https://curiousily.com/posts/object-detection-on-custom-dataset-with-yolo-v5-using-pytorch-and-python (дата обращения: 01.03.2023).

5. Johns R. PyTorch vs TensorFlow for Your Python Deep Learning Project (Джонс Р. PyTorch или TensorFlow для Вашего проекта глубокого обучения Python). URL: https:// realpython.com/ pytorch-vs-tensorflow (дата обращения: 01.03.2023).

6. Leban J. Image recognition with Machine Learning on Python. Image processing (Лебан Дж. Распознавание изображений с помощью машинного обучения на Python. Обработка изображений). URL: https://towardsdatascience.com/image-recognition-with-machine-learning-on-python-image-processing-3abe6b158e9a (дата обращения: 01.03.2023).

7. Y. LeCun, B. Boser, J.S. Denker, D. Henderson, R.E. Howard, W. Hubbard, L.D. Jackel: Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition, Neural Computation, 1(4):541-551, 1989 (Ю. Лекун, Б. Бозер, Дж.С. Денкер, Д. Хендерсон, Р.Э. Ховард, У. Хаббард, Л.Д. Джекел: Обратное распространение, применяемое к распознаванию рукописных почтовых индексов, Нейронные вычисления, 1 (4): 541-551, 1989).

УДК 004.021



МЕТОД УПОРЯДОЧЕННОЙ ВЫБОРКИ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МАССИВА УПРАВЛЯЮЩИХ ПЕРЕМЕННЫХ

METHOD OF ORDERED SELECTION OF ELEMENTS BASED ON AN ARRAY OF CONTROL VARIABLES

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

Аннотация

Рассмотрен один из подходов к построению алгоритма криптопримитива упорядоченной выборки m элементов из n, основанный на таких понятиях перечислительной комбинаторики как «сочетания» и «размещения». В основе идеи построения криптопримитива лежит ситуационная модель, основанная на необходимости разбиения, так называемого в данной работе, базового (исходного) множества бит на несколько разномощных подмножеств. Правило, по которому осуществляется выборка бит из базового множества определяется случайным числом, выступающим в роли одноразового ключа. Смена ключа приводит и к смене правила выборки. При этом, если выборка была проведена на одном ключе, а после ключ был изменен, обратная сборка базового множества будет невозможна, даже, если известны «старый» ключ и полученные на нем подмножества. Выходные данные алгоритма могут быть использованы при построении схем обязательств и разделения секрета, а также при построении уникальных схем идентификации и аутентификации.

Ключевые слова: алгоритм, выборка, повторения, множество, ключ, бит, последовательность, номер, правило, параметр, функция.

Summary

One of the approaches to the construction of a cryptoprimitive algorithm for an ordered selection of m elements from n, based on such concepts of enumerative combinatorics as «combinations» and «allocations», is considered. The idea of constructing a cryptoprimitive is based on a situational model based on the need to split the so-called basic (initial) set of bits into several subsets of different power, so-called in this work. The rule by which bits are sampled from the base set is determined by a random number acting as a one-time key. Changing the key also leads to a change in the sampling rule. In this case, if the selection was made on one key, and after the key was changed, the reverse assembly of the base set will be impossible, even if the "old" key and the subsets obtained on it are known. The output of the algorithm can be used to build commitment and secret sharing schemes, as well as to build unique identification and authentication schemes.

Keywords: algorithm, selection, repetitions, set, key, bit, sequence, number, rule, parameter, function.

При построении систем защиты информации с использованием криптографических алгоритмов, могут иметь место задачи, основанные на упорядоченной выборке из множества n элементов m-элементного их подмножества. В основе решения таких задач лежат теоретико-числовые методы в криптографии, построенные на понятиях и правилах перечислительной комбинаторики.

Упорядоченная выборка m элементов из n, также как и схемы перестановки, является часто используемым криптографическим примитивом[1] при построении различных криптосистем. Известно, что криптографические примитивы, предназначенные для решения узкого класса задач, по отдельности довольно ограничены в реализуемых механизмах безопасности и не претендуют на исчерпывающую схему защиты. Но их объединение для создания протоколов безопасности (что, само по себе, является целой специализацией) позволяет выйти на тре-

[1] Криптографические примитивы – низкоуровневые криптографические алгоритмы, которые часто используются для построения криптографических протоколов. В узком смысле это операции и процедуры, определяющие требуемые свойства криптосистемы.

буемый уровень системы защиты. Правильный выбор примитивов при построении протоколов обычно обеспечивает наилучшую доступную безопасность из возможных. Очевидно, что сами примитивы при этом должны обладать высокой степенью надежности.

Алгоритм упорядоченной выборки m элементов из n является одним из таких криптопримитивов и строится на таких понятиях комбинаторики как «сочетания» и «размещения».

В данной работе рассматривается ситуационная модель применения такого криптопримитива, основанная на необходимости разбиения, так называемого в данной работе, базового (исходного) множества бит на несколько разномощных подмножеств. Правило, по которому осуществляется выборка бит из базового множества определяется случайным числом, выступающим в роли одноразового ключа. Смена ключа приводит и к смене правила выборки. При этом, если выборка была проведена на одном ключе, а после ключ был изменен, обратная сборка базового множества будет невозможна, даже, если известны «старый» ключ и полученные на нем подмножества.

Базовое множество бит может быть представлено в векторной или в матричной формах. И в первом и во втором случаях значение имеет порядковый номер бита в этом множестве. Может рассматриваться и вариант случайного назначения номеров бит. Для примера базовое множество бит записано в виде матрицы с линейно-построчной возрастающей нумерацией:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
2	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}
3	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}
4	x_{39}	x_{40}	x_{41}	x_{42}	x_{43}	x_{44}	x_{45}	x_{46}	x_{47}	x_{48}	x_{49}	x_{50}	x_{51}
5	x_{52}	x_{53}	x_{54}	x_{55}	x_{56}	x_{57}	x_{58}	x_{59}	x_{60}	x_{61}	x_{62}	x_{63}	x_{64}
6	x_{65}	x_{66}	x_{67}	x_{68}	x_{69}	x_{70}	x_{71}	x_{72}	x_{73}	x_{74}	x_{75}	x_{76}	x_{77}
7	x_{78}	x_{79}	x_{80}	x_{81}	x_{82}	x_{83}	x_{84}	x_{85}	x_{86}	x_{87}	x_{88}	x_{89}	x_{90}

Из этого множества необходимо выбрать m бит. Пусть m=25. Тогда количество размещений в определенном порядке без повторений m элементов из n (где n=91) будет определяться формулой [1]:

$$C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!} = \frac{91!}{66!} \approx 2{,}5 \cdot 10^{47}. \qquad (1)$$

Если элементы в множестве m могут повторяться, то

$$C_n^m = n^m = 91^{25} \approx 9{,}5 \cdot 10^{48}. \qquad (2)$$

Случайная подборка с первой попытки конкретного варианта выборки элементов (все элементы разные) при таком количестве размещений практически равна нулю ($\approx 10^{-48}$).

Вместе с тем, необходимо отметить, что в данном случае речь идет о битах, множество значений которых определяется нулем и единицей, т.е. равно 2, а не 91, как было показано выше. Поэтому, может показаться, что «случайно выбирать» надо не вариант выборки бит, а всего лишь их комбинацию на множестве от 1 до 25. В этом раскладе вероятность случайного подбора комбинации из 25 бит с первой попытки будет равна 2^{-25} или $\approx 3 \cdot 10^{-8}$. Как видно, получается уже не такое большое число как для множества из m различных элементов. Отсюда, конечно же, следует, что при подобных расчетах необходимо учитывать топологии подмножеств элементов, на которые может быть разбито их базовое множество, но не стоит забывать, что сама по себе подборка правильной комбинации бит не имеет в этом случае никакого смысла. Эти биты надо еще сопоставить определенным элементам (их номерам) базового множества, а их в рассматриваемом примере 91. И таким образом снова возвращаемся к формулам (1) и (2).

Алгоритм формирования выборки бит строится на использовании некоего массива данных, выступающего в роли ключа, которые по определенному правилу формируют последовательность номеров бит.

Ключ, в свою очередь, может представлять собой многоразрядное десятичное число, которое представлено набором бит – k-разрядным двоичным числом. Это число может генериться как случайным образом, так и по специальному алгоритму. Схема и порядок формирования ключа не являются предметом данной работы, так как не имеют принципиального значения для построения рассматриваемого алгоритма выборки.

Итак, ключ предназначен для инициализации процедуры выборки номеров бит из базового множества. При этом значение имеют, как номер бита N_i (где $i = \overline{1,n}$) в базовом множестве, так и его новый порядковый номер N_{ij} (где $j = \overline{1,m}$) в выборке.

Минимальная длина K ключа в битах рассчитывается по формуле

$$K = a\,(m-1) + q, \qquad (3)$$

где m – мощность подмножества выбираемых из базового множества элементов;

q – шаг разбиения (сепарации) K на подмножества бит, q≥3;

a – количество позиций, на которые происходит арифметический сдвиг двоичного числа влево.

Разбиение двоичного числа на подмножества происходит пошагово с арифметическим сдвигом двоичного числа влево на a позиций. На первом шаге выписываются первые q бит. На втором шаге следующие q бит, начиная с a-го бита и т.д.

Значение q задается с учетом того, что каждое подмножество из q бит в последующем переводится в десятичное число X_q. Если q=4, то $X_4 = \overline{1,16}$, если q=5, то $X_5 = \overline{1,32}$, если q=6, то $X_6 = \overline{1,64}$ и т.д.

Для рассматриваемого в работе случая m=25. Если задать a=1, а q=6, то минимальная длина K ключа будет равна 30 бит. Если, при тех же условиях, выбрать a равной 2, то K будет составлять уже 54 бита.

Описание алгоритма упорядоченной выборки m элементов из n может быть представлено на примере десятичного числа $X_{9,10}$:897712455, выступающего в роли массива управляющих переменных или ключа, следующей последовательностью действий:

1) число 897712455 записывается в двоичном виде. При этом могут использоваться разные схемы перевода десятичного числа в двоичный формат:

● каждая цифра числа 897712455 записывается тетрадой бит:

$X_{36,2}$: 1000 1001 0111 0111 0001 0010 0100 0101 0101;

● путем последовательного деления десятичного числа и получаемых целых частных на 2 до тех пор, пока не получится частное, которое будет равно нулю. Исходное число в двоичной системе счисления составляется последовательной записью полученных от деления на 2 остатков.

Например, для числа

38567=1001 0110 1010 0111

в табличном виде:

1	2	3	4	5	6	7	8
38567 /2	19283 /2	9641 /2	4820 /2	2410 /2	1205 /0	602 /2	301 /2
1	1	1	0	0	1	0	1

9	10	11	12	13	14	15	16
150 /2	75 /2	37 /2	18 /2	9 /2	4 /2	2 /2	1/2
0	1	1	0	1	0	0	1

Для выбранного числа 897712455 его двоичное представление имеет вид:

$X_{30,2}$: 11 0101 1000 0010 0000 0001 0100 0111.

Примечание. В первом и во втором случаях для одного и того же ключа, представленного десятичным числом, получаются разные по значению и по количеству бит двоичные числа.

Если по каким-либо обстоятельствам нельзя изменить разрядность используемого ключа, а количества формируемых на его основе бит не хватает, можно использовать различные приемы увеличение разрядности полученного на этом ключе битового числа до нужного значения. Как пример, можно использовать самое простое правило немодифицирующей конкатенации справа недостающего числа бит, взятых из левой части числа. Более сложные схемы могут быть построены на сложении по mod_2 полученного на «коротком» ключе битового числа с самим собой только смещенным вправо (или влево) на недостающее количество бит. Пример:

исходное число, полученное на «коротком» ключе – не хватает 3 бит	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	x	x	x
тоже число, но смещенное вправо на три бита				1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1
число, полученное путем сложения двух чисел по mod_2	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1

Чтобы избавиться от повторяющихся бит, оставшихся от исходного числа, можно изменить это правило на много итерационную схему по битового смещения вправо (или влево) исходного числа относительно самого себя и сложения по mod_2 получаемых при этом чисел до тех пор, пока не будет получена необходимая разрядность числа, являющегося результатом такого сложения. На втором шаге итерации смещается вправо не исходное число, а число, являющееся результатом предыдущего сложения.

Следует отметить, что такие правила являются дополнительным секретом в этом криптопримитиве и заставят нарушителя потратить допол-

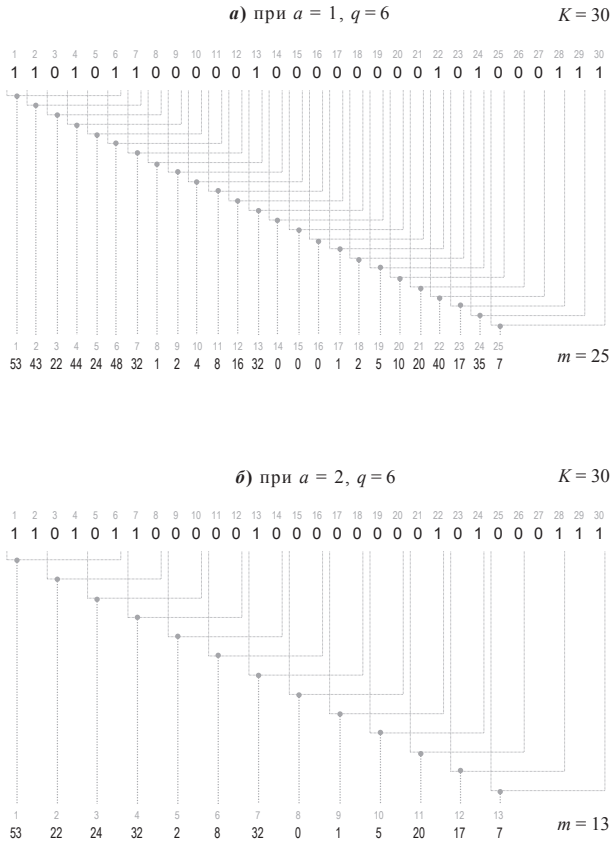


Рис. 1. Графическое представление процедуры сепарация ключа на фрагменты длиной q бит и последующего их перевода в десятичный формат

нительное время на вскрытие схемы формирования рассматриваемого битового числа.

2) после того как ключ K переведен в двоичный формат заданной длины, осуществляется его сепарация на фрагменты длиной q бит и перевод каждого такого фрагмента в десятичный формат. На *рисунках 1а* и *1б* показаны схемы выполнения такой процедуры при разных значениях a и q=6 для числа

$X_{30,2}$: 11 0101 1000 0010 0000 0001 0100 0111.

3) рассчитывается число N_i. Для этого над полученными в n. 2 результатами выполняется ряд простых арифметических действий. Результаты сепарации и «оцифровки» ключа K с последующими арифметическими операциями над ними представлены в виде *таблицы 1*.

Примечание. Сложение по mod_n проводится для исключения появления номеров N_i, превышающих значение n.

4) результат вычисления номеров N_i и их сопоставление номерам N_j записывается в табличном виде (для c=3):

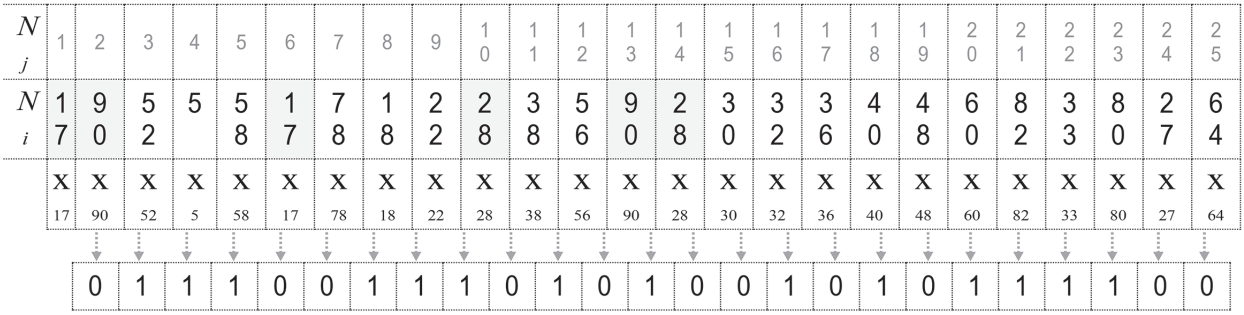


Таблица 1

Результат расчета значений чисел $N_i=[(X_{q,j}+N_j)c]\mathrm{mod}_n$, определяющих последовательность номеров элементов базового множества, входящих в подмножество m

	Результат сепарации ключа	Результат «оцифровки»	Результаты арифметических операций				
Порядковый номер элемента в подмножестве m	j-е ($j=\overline{1,m}$) подмножества бит, при q=6	Число $X_{q,j}$	$Y_j=X_{q,j}+N_j$	$c=2$	$c=3$	Порядковый номер элемента в базовом множестве n: N_i	
N_j				$Y_2\cdot c$	$Y_3\cdot c$	$(Y_2)\ \mathrm{mod}_n$	$(Y_3)\ \mathrm{mod}_n$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	110 101	53	54	108	162	17	71
2	101 011	43	45	90	135	90	44
3	010 110	22	26	52	78	52	78
4	101 100	44	48	96	144	5	53
5	011 000	24	29	58	87	58	87
6	110 000	48	54	108	162	17	71
7	100 000	32	39	78	117	78	26
8	000 001	1	9	18	27	18	27
9	000 010	2	11	22	33	22	33
10	000 100	4	14	28	42	28	42
11	001 000	8	19	38	57	38	57
12	010 000	16	28	56	84	56	84
13	100 000	32	45	90	135	90	44
14	000 000	0	14	28	42	28	42
15	000 000	0	15	30	45	30	45
16	000 000	0	16	32	48	32	48
17	000 001	1	18	36	54	36	54
18	000 010	2	20	40	60	40	60
19	000 101	5	24	48	72	48	72
20	001 010	10	30	60	90	60	90
21	010 100	20	41	82	123	82	32
22	101 000	40	62	124	186	33	4
23	010 001	17	40	80	120	80	29
24	100 011	35	59	118	177	27	86
25	000 111	7	32	64	96	64	5

где x_i – значение бита для i-го элемента в базовом множестве n. Для примера всем значениям x_i в таблице присвоены значения «0» или «1».

Данная запись означает, что первым элементом в подмножестве m будет элемент за номером 17 в базовом множестве n, вторым элемент за номером 90 и т.д. Так как выборка элементов строится по схеме размещений в определенном порядке с повторениями m элементов из n, то имеют место повторения несколько раз одних и тех же элементов. В данном случае это элементы с номерами базового множества 17, 28 и 90.

Рассмотренный вариант построения алгоритма упорядоченной выборки m элементов из n «работает» и на «плохих» с точки зрения статистических свойств битовых последовательностях ключа K. Например, для равномерной по «0» и «1» последовательности бит:

$X_{30,2}$: 10 1010 1010 1010 1010 1010 1010 1010,

что в десятичном формате соответствует числу 715 827 882, таблица выборки при $a=1$, $q=6$ для разных значений параметра c будет иметь вид:

N_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$c=2$										*Результат выборки*				
N_i	5	46	90	50	3	54	7	58	11	62	15	66	19	70
$c=3$										*Результат выборки*				
N_i	38	69	44	75	50	81	56	87	62	2	68	8	74	14

N_{ij}	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$c=2$											
N_i	13	74	17	78	31	82	35	86	39	90	43
$c=3$											
N_i	80	20	86	26	1	32	7	38	13	44	19

Несмотря на то, что числа $X_{q,j}$ (для ключа 715 827 882) чередуются: 42_1, 21_2, 42_3, 21_4… и т.д. получаются хорошо перемешанные выборки, существенно отличающиеся друг от друга при разных значениях параметра c.

Вместе с тем, рассмотренный вариант построения алгоритма с простой линейной зависимостью (см. *таблицу 1* колонку 4) не справляется с «совсем уж плохими» статистическими последовательностями бит, такими как, например,

$X_{30,2}$: 10 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000

(число 536 870 912) и

$X_{30,2}$: 11 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111

(число 1 073 741 823). В этих случаях, например, при $a=1$, $q=6$, будут доминировать числа $X_{q,j}$, равные либо «0» или «63» соответственно. И добавление порядкового номера элемента в этом случае дает лишь линейно возрастающую их упорядоченность, что приводит к выборкам типа:

$(1+X_{q,1})$, $(2+X_{q,2})$, $(3+X_{q,3})$, …, $(m+X_{q,m})$.

В связи с этим рассматривается схема алгоритма, в котором линейная функция (см. таблицу 1 колонку 4) замена на квадратичную вида f (x)=c x2, где $c \neq 0$. В данном алгоритме это означает, что сумму в колонке 4 *таблицы 1* надо возвести в квадрат (т.е. $Y_j=[X_{q,j}+N_j+m]^2$). При этом для увеличения зависимости выборки от числа m ее элементов последнее входит третьим

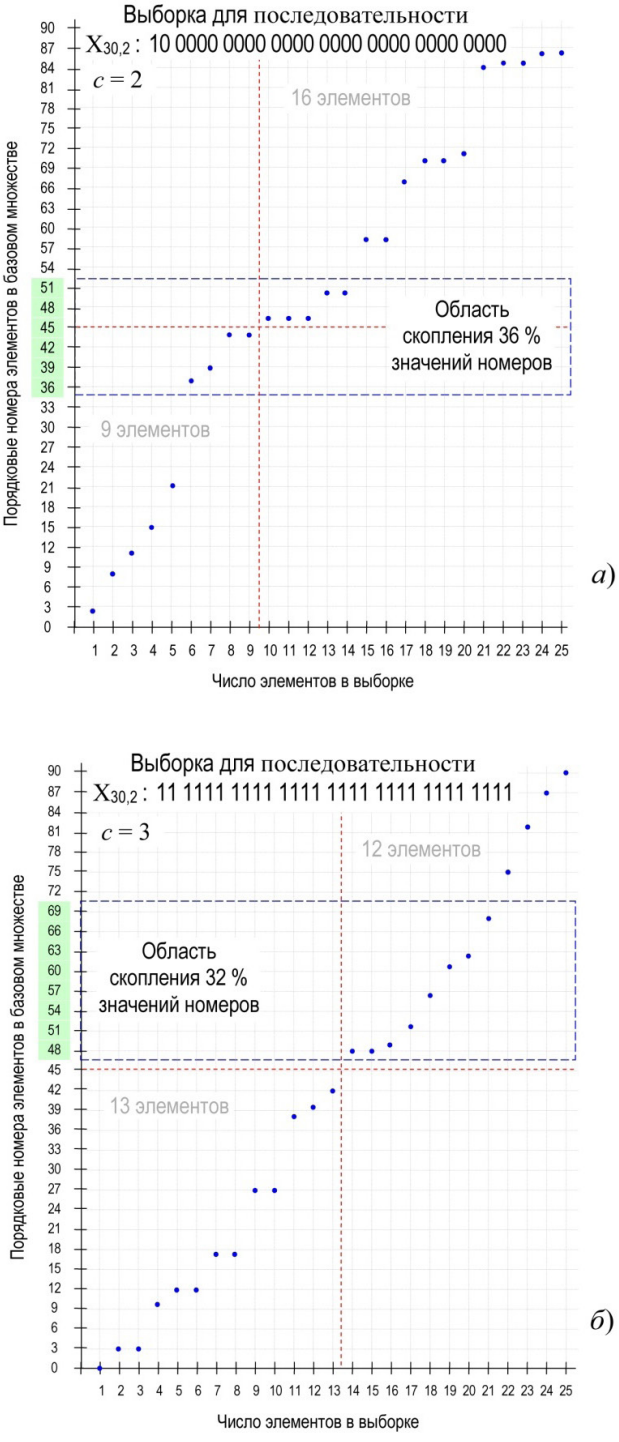


Рис. 2

слагаемым в сумму: $X_{qj}+N_j+m$.[2]

В таком варианте алгоритма для последовательности

$X_{30,2}$: 10 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000

таблица выборки, например, при $c=2$, будет иметь вид:

N_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
c=2										Результат выборки				
N_i	85	2	21	44	71	11	46	85	37	84	44	8	67	39

N_{ij}	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
c=2											
N_i	15	86	70	58	50	46	46	50	58	70	86

а для последовательности

$X_{30,2}$: 11 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111

таблица выборки при $c=3$ вид:

N_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$c=3$										Результат выборки				
N_i	12	3	0	3	12	27	48	75	17	56	10	61	27	90

N_{ij}	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$c=3$											
N_i	68	52	42	38	40	48	62	82	17	49	87

Небольшое смещение в полученных выборках распределений номеров элементов в область больших значений и их концентрации в некоторых узких диапазонах значений (см. *рисунки 2а* и *б*) в данном случае не является существенным моментом. Используя другие функции, можно добиться более равномерных распределений.

Вместе с тем следует отметить, что в данном случае равномерность распределения номеров элементов исходного множества в их выборке не является обязательным условием решения поставленной задачи. Если нарушитель знает статистические особенности формирования выборки элементов, то введя соответствующие условия на полный перебор, он существенно сократить время на подбор нужного варианта.

С учетом этого обстоятельства алгоритм построен так, что за счет его варьируемых параметров можно получать самые разные по статистическому качеству выборки элементов, тем самым, увеличивая энтропию данного криптопримитива. Однако перекрыть все множество возможных комбинаций выборок, определяемое формулой (2), не получится. Универсальных алгоритмов, позволяющих формировать равномерные распределения номеров элементов в выборке и порождать распределения со смещениями вправо и влево, с многочисленными повторами одного номера или циклами повторов не существует. Следовательно, формулу (2) для оценки числа выборок для этого и любого другого алгоритма можно записать как

$$C_n^m = n^m - Z, \qquad (4)$$

где Z – число вариантов выборок, которые не могут быть получены с помощью используемого алгоритма. В это число также входят варианты выборок, в которых, например, i-й элемент повторяется m раз (где m – число элементов в выборке).

Значение Z применительно к рассмотренному выше примеру может варьироваться в диапазоне от 10^{10} до 10^{20}, и это обстоятельство необходимо учитывать при оценке надежности криптопримитива в частности и строящегося на нем протокола безопасности в целом.

Множество варьируемых параметров алгоритма, а точнее их комбинация, составляют его секрет, не зная которого нарушитель, даже обладая ключом K, не сможет повторить множество m. Такими параметрами алгоритма являются:

- мощность множества m (т.е. сколько элементов подлежит выборке), может принимать значения от 1 до n;
- значение a – величина арифметического сдвига (см. формулу (3)), которое может варьироваться от 1 до 10 (ограничение до 10 в данном случае условно, если длина ключа большая, то можно использовать и другие ограничения);
- значение q – шаг разбиения K (см. формулу (3)), которое изменяется в диапазоне от 3 до 10, верхнее ограничение также как и для параметра a условно и определяется исходя из длины ключа и выбранных значений a;
- вид функции $G_{K,s}$ (схемы) перевода десятичных чисел в двоичный формат. Здесь рассмотрено всего две функции, но при необходимости можно использовать псевдо двоичное кодирование или придумать другие функции. С учетом этого принимается $s=\overline{1,3}$;
- схема или правило R_k увеличения разрядности ключа K в битовом формате. В качестве примера было рассмотрено четыре варианта, но может быть и больше, поэтому принимается, что $k=\overline{0,5}$ (при $k=0$ разрядность K не меняется);
- вид функции $G_{q,e}$ для расчета числа X_q. Это функция перевода q-разрядного двоичного числа в десятичный вид. Помимо стандартной схемы перевода можно придумать, как минимум, еще две-три схемы, поэтому принимается, что $s=\overline{1,3}$;
- вид функции $F_v(Y)$ для расчета числа Y.

[2] При разном m будут получаться разные выборки, причем, например, выборка из 24 элементов при одних и тех же условиях, будет существенно отличаться от выборки из 25 элементов. Если без m, то эти выборки при одних и тех же условиях будут неразличимы.

Рассмотрено два варианта – линейный и квадратичный, отсюда $v = \overline{1,2}$;

● значение множителя c, которое целесообразно назначать от 1 до 10 в зависимости от вида функции $F_v(Y)$ и числа q.

Если свести все параметры в таблицу вида:

1	2	3	4	5	6	7	8
m	a	q	$G_{K,s}$	R_k	$G_{q,e}$	$F_v(Y)$	c
от 1 до n	от 1 до 10	от 3 до 10	от 1 до 3	от 0 до 5	от 1 до 3	от 1 до 2	от 1 до 10
Число вариантов							
$p_1 =$ n	$p_2 =$ 10	$p_3 = 8$	$p_4 = 3$	$p_5 = 6$	$p_6 = 3$	$p_7 = 2$	$p_8 =$ 10

,

то общее число C_p возможных вариантов значений параметров алгоритма (для n=91) будет определяться произведением числа вариаций каждого из них:

$$C_p = \sum_{j=1}^{8} p_j = 7\,862\,400 \approx 7{,}8 \cdot 10^6. \qquad (5)$$

Полученное число не такое уж и большое с точки зрения решения нарушителем задачи полного перебора. Но это всего лишь дополнительный и не основной секрет данного алгоритма. Как и во всех современных криптосистемах в основу решения данной задачи положено правило *Керкгоффса* [2], согласно которому в засекреченном виде держится только определённый набор параметров алгоритма, называемый ключом, а сам алгоритм шифрования должен быть открытым. С другой стороны, если исходить из неоднозначно воспринимаемого в кругах специалистов принципа «безопасность через неясность» (является противопоставлением правилу *Керкгоффса*), заключающегося в том, что необходимо скрывать внутреннее устройство системы для обеспечения её безопасности, то такая дополнительная опция, как множество вариаций параметров алгоритма, не будет лишней.

С учетом того, что ключ K в десятичном выражении может иметь разрядность 8, 9 и 10, а при необходимости и большую, вероятность одновременного подбора нарушителем ключа и настроек алгоритма (при условии, что сам алгоритм всем известен) с первой попытки будет обратно пропорциональна произведению 10^{10} и $7{,}8 \cdot 10^6$, что примерно составит $8 \cdot 10^{-16}$.

Рассмотренный алгоритм имеет простую программную реализацию и при необходимости позволяет при небольших значениях n и m провести расчеты «в ручную» с использованием обычного калькулятора. В плане функциональности этот алгоритм легко объединяется с другими примитивами для построения схем или протоколов безопасности. Исходными данными для него могут служить выходные результаты таких примитивов как генератора ПСЧ, алгоритмов перестановки и хеширования и др. Выходные данные самого алгоритма могут быть использованы при построении схем обязательств и разделения секрета, а также при построении уникальных схем идентификации и аутентификации.

Литература

1. Канцедал С.А. Дискретная математика: учебное пособие. М.: ИД «Форум» ИНФРА-М, 2007. 224 с.
2. Auguste Kerckhoffs. La cryptographie militaire // Journal des sciences militaries. Vol. IX. Pp. 5-38. Janvier 1883.

УДК.004.8

ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ И ВЫБРОСОВ В НАБОРАХ ДАННЫХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

ANOMALY AND OUTLIER DETECTION IN MACHINE LEARNING DATASETS

Олег Игоревич Атакищев
почетный работник науки и высоких технологий РФ
доктор технических наук, профессор
заместитель генерального директора по специальным проектам
АНО «Институт инженерной физики»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: aoi007@mail.ru

Вадим Геннадьевич Грибунин
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, доцент
главный научный сотрудник
АНО «Институт инженерной физики»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (916) 102-52-81
E-mail: wavelet2@mail.ru

Игорь Александрович Созыкин
военнослужащий

Владимир Дмитриевич Пастухов
военнослужащий

Аннотация
В статье рассмотрены различные направления обнаружения аномалий в данных машинного обучения. Приведены различия между отдельными направлениями, особенности каждого из направлений. Даны ссылки на датасеты и программное обеспечение, позволяющие выполнять эксперименты по обнаружению аномалий.
Ключевые слова: машинное обучение, глубокое обучение, обнаружение аномалий, датасет, распределение данных.

Summary
The article discusses various areas of anomaly detection in machine learning data. Differences between separate directions, features of each of the directions are given. Links are given to datasets and software that allow performing anomaly detection experiments.
Keywords: machine learning, deep learning, anomaly detection, dataset, data distribution.

Введение

В последнее время значительное внимание специалистов в области машинного обучения (МО) уделяется проблеме обнаружения образцов данных[1], аномальных по тем или иным критериям. На этапе обучения важно отсеять такие данные, особенно в том случае, когда датасет был получен из недоверенного источника и, следовательно, мог быть «отравлен». На этапе эксплуатации важно предотвратить принятие решения системой МО на основе таких данных в силу того, что, скорее всего, оно будет нерелевантным.

В англоязычной литературе это направление исследований, оформившееся в 2017 году, получило название «out-of-distribution detection» (OODD). Близкими к этому направлению исследований являются такие темы, как обнаружение аномалий (AD), обнаружение новых (ранее не встречавшихся) данных (ND), распознавание открытых множеств классов (OSR), обнаружение выбросов (OD) [1]. Терминология не является устоявшейся, зачастую авторами публикаций смешиваются понятия выбросов и аномалий; русскоязычные публикации по данной тематике практически отсутствуют.

В настоящей статье приведены особенности каждого из этих подходов, которые в совокупности иногда называют «Generalized OODD – GOODD», выполнен анализ используемых методов и обзор последних достижений.

О различиях между отдельными направлениями исследований

Методы решения задач AD, ND и OD очень схожи между собой. Ту небольшую разницу, которая существует между задачами AD, OD и ND, можно объяснить на следующем примере. Пусть

[1] В настоящей статье взаимозаменяемо используются слова «набор данных» и «датасет», «экземпляр», «пример» и «образец» данных.

модель МО предназначена для классификации кошек по изображениям. Тогда изображение собаки будет для этой модели выбросом, изображение кошки-инвалида – аномалией, а изображение новой породы кошек (которая не была учтена при обучении) – новизной, которую нужно учесть при дальнейшем обновлении модели МО, возможно, выделив для этого отдельный класс.

То есть:

- выброс необходимо удалить, так как это практически мешающий решению задачи «шум»;
- аномалию можно в дальнейшем исследовать отдельно (например, причину долгой жизни некоторых пациентов после тяжелой формы рака);
- новизну можно включить позднее в обновленный датасет, в том числе, как отдельный класс. Это находит свое применение в таких областях МО, как life-long (incremental, continual) learning [6] и др.

Конечно, проблема обнаружения аномалий и выбросов ранее изучалась в других областях науки и техники, см, например, [2]. Однако, во-первых, в машинном обучении проблема GOODD имеет свои особенности, а во-вторых, для её решения получили развитие методы, основанные на глубоком обучении, что позволило достичь существенно лучших результатов.

Известна так называемая «проблема черного лебедя», когда ошибка на очень редком типе тестовых примеров может привести к значительным последствиям: например, автоматически управляемый автомобиль попадёт в ДТП из-за сбоя в работе его систем компьютерного зрения (примет Луну за светофор, как это было у Tesla). В последнем случае можно было бы добавить луну в обучающий датасет, однако, всего разнообразия примеров «в жизни» учесть невозможно.

Большинство существующих моделей машинного обучения обучаются в предположении о том, что тестовые данные извлекаются из того же распределения, что и обучающие данные, известного как in-distribution (ID). Однако, при эксплуатации модели возможны различные смещения в распределении тестовых данных. Эти смещения обычно делят на два типа [3]:

- семантический сдвиг в распределении (OOD-примеры обучающей и тестовой выборки взяты из разных классов, например, обученной на дорожной обстановке модели предъявляют морской пейзаж);
- ковариантный сдвиг в распределении (OOD-примеры берутся из другого распределения, признаки в обучающей и тестовой выборках имеют разные математическое ожидание, дисперсию и т.д.). Например, модель обучена распознавать машины одного цвета, а в эксплуатации ей на вход поступают фотографии машин различного цвета.

В этих случаях модель может самоуверенно принимать неверные решения. В литературе такое поведение модели на OOD-примерах называют «высокомерием» или «агностофобией» [4].

Обнаружение семантического сдвига в распределении (например, в силу появления новых классов) является центральной задачей обнаружения OOD-примеров, тогда как проблема ковариантного сдвига, в том числе, изучается в таком направлении исследования МО, как адаптация домена [5].

Обнаружение ковариантного сдвига иногда называют обнаружением сенсорных аномалий (в отличие от семантических аномалий).

Различие между различными направлениями GOODD иллюстрируется *рисунком 1* [1].

На *рисунке 1а* показан пример обнаружения сенсорной аномалии, когда тестовые изображения с ковариантным сдвигом рассматриваются как OOD.

На *рисунке 1б* приведен пример ND при одноклассовой классификации (ID-изображения принадлежат одному классу). Здесь тестовые изображения с семантическим сдвигом будут считаться OOD.

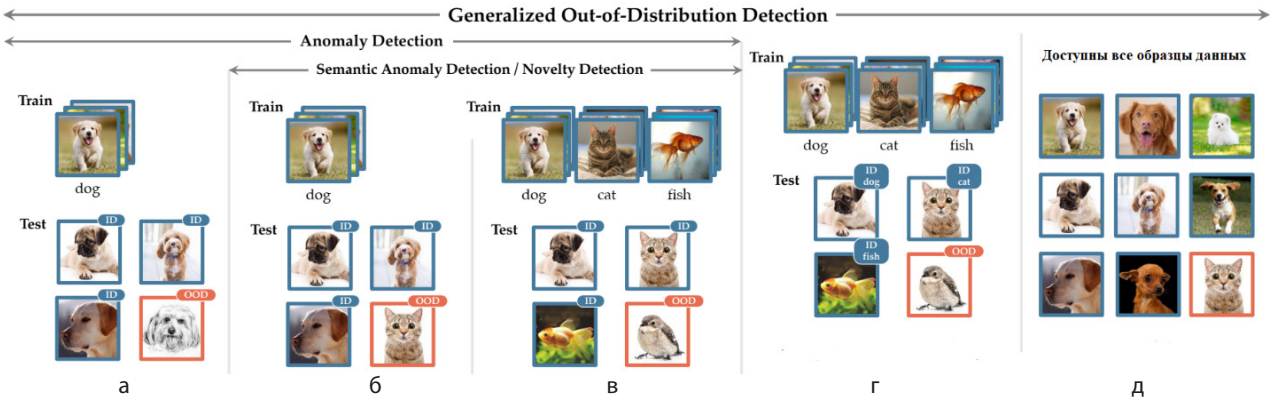


Рис. 1. Различные направления исследований в области GOODD [1]

На рисунке 1в представлен пример ND при многоклассовой классификации. ID-изображения принадлежат нескольким классам. Тестовые изображения с семантическим сдвигом будут считаться OOD.

На рисунке 1г изображен пример OSR и ODD. Как видно, этот пример идентичен ND при многоклассовой классификации, с той лишь разницей, что OSR дополнительно требует классификации ID-изображений. OODD решает ту же проблему, что и OSR. OODD нацелено на обнаружение тестовых образцов с семантическим сдвигом без потери точности классификации ID-изображений. Однако OODD охватывает более широкий спектр задач (например, помимо классификации и регрессию).

Как показано на рисунке 1д, в OD нет разделения данных на данные обучения/тестирования; при нём выполняется обнаружение сдвига распределения экземпляра данных от распределения остального датасета. Если последнее распределение считать как ID, то OD также вписывается в общую структуру GOODD. Выбросы могут иметь любой (семантический, сенсорный) сдвиг распределения относительно ID.

Обнаружение аномалий (AD) и новизны (ND)

AD направлено на обнаружение любых аномальных образцов, которые отклоняются от заданной «нормальности» во время тестирования. Таким образом, ключевым является задание этой самой «нормальности», что не всегда просто.

Сенсорная AD обнаруживает тестовые образцы с ковариантным сдвигом предполагая, что образцы «нормальности» исходят из одного и того же ковариантного распределения (ID). При этом необходимы выбор методики определения характеристик распределения примеров и порога, позволяющего относить примеры к нормальному и аномальному классу. Семантическая AD обнаруживает тестовые образцы со сдвигом метки, предполагая, что образцы «нормальности» происходят из одного и того же семантического распределения (категории), т.е. нормальности должны принадлежать только одному классу.

Таким образом, в сенсорном AD «нормальности» поступают из распределения ID $P(X)$, *тогда как аномалии – из распределения OOD* $P`(X)\neq P(X)$. Семантического сдвига нет, то есть, $P`(Y)=P(Y)$. Для семантического AD, напротив, $P`(Y)\neq P(Y)$. Конечно, здесь также и $P`(X)\neq P(X)$. Имеется разница между обнаружением сенсорного и семантического сдвига, разработаны соответствующие детекторы, и у исследователей есть возможность выбора [7].

Обычно считается, что «нормальности» сосредоточены в некоторой области возможных значений, вокруг которой можно очертить границу (связанную с порогом принятия решений), а аномалии распределены безгранично за пределами этой области. Для определения границы на основе обучающих данных применяются, так или иначе, методы оценки плотности распределения вероятностей.

Аномалии можно подразделить на точечные (например, одно отдельно взятое изображение), контекстные (например, подозрительная именно в данное временное окно транзакция), групповые (составляющие кластер взаимосвязанных точечных аномалий – например, последовательность техник нарушителя при осуществлении компьютерной атаки).

Методы ND сосредоточены на обнаружении семантического сдвига. Обнаруженные новые экземпляры обычно подготавливаются для будущих конструктивных процедур, таких как более специализированный анализ или постепенное обновление самой модели. В зависимости от количества классов при обучении ND может быть одноклассовым и многоклассовым, что обуславливает использование различных классификаторов и, следовательно, различных методов. В любом случае задача ND формулируется как задача бинарной классификации (классификации примеров внутри области ID внимания не уделяется).

Распознавание открытых множеств (OSR)

В ходе обучения модель МО имеет дело с совокупностью некоторых «замкнутых», ограниченных классов (ID). При тестировании же, напротив, на вход модели поступает неограниченно разнообразный, «открытый» набор данных (ID+OOD).

При OSR отдельные образцы при тестировании имеют семантический сдвиг, т.е. $P`(Y)=P(Y)$. OSR во многом похожа на мультиклассовое ND – отличие состоит в том, что подход OSR дополнительно требует точной классификации образцов ID из P(Y).

В OSR выделяют следующие категории данных (обучающих и тестовых):

1) Известные известные (ИИК) – размеченные положительные данные различных семантически значимых классов (например, дорожные знаки, сигналы светофора – IID).

2) Известные неизвестные (ИНК) – размеченные отрицательные экземпляры данных, не обязательно сгруппированные в какой-то семантический значимый класс (например, задний фон на снимках).

3) Неизвестные известные (НИК) – экземпляры данных, отсутствующие в обучающей выбор-

ке, но для которых известна некоторая дополнительная информация (семантика/атрибуты) во время обучения.

4) Неизвестные неизвестные (ННК) – экземпляры данных, для которых во время обучения отсутствует какая-либо информация (те самые «черные лебеди» OOD во время эксплуатации).

Эта классификация не является чем-то принципиально новым. Она была предложена для описания взаимоотношений между людьми американскими психологами Д.Люфтом и Х.Ингемом в рамках разработанного ими метода анализа «окно Джохари».

В подходе OSR требуется, чтобы мультиклассовый классификатор одновременно:

1) точно классифицировал тестовые образцы из ИИК;

2) обнаруживал тестовые образцы из ННК.

В *таблице 1* приведено отличие OSR от некоторых смежных задач, которые также исследуются в МО [3].

На *рисунке 2* показана суть подхода OSR. На *рисунке 2а* показано распределение датасета. Как видно, помимо 4 ИИК, имеются еще 2 ННК. На *рисунке 2б* показана традиционная классификация. На *рисунке 2в* показаны границы 4 классов для ИИК. ННК находятся в так называемом свободном пространстве O. Возможность распознавания любого образца из этого пространства как образца ИИК некоторого класса связана с риском, который называется риском свободного пространства R_O. Качественно этот риск оценивается следующим образом [10]:

$$R_O(f) = \frac{\int_O f(x)dx}{\int_{S_O} f(x)dx},$$

где S_O – всё пространство;

$f(\cdot)$ – функция распознавания, принимающая значение 1, в случае если образец отнесен к некоторому классу в ИИК, и 0 в противном случае.

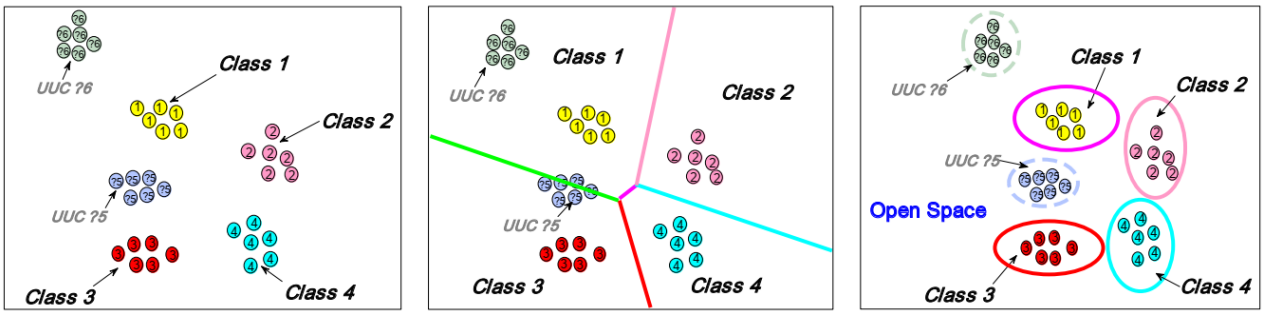
Авторы [11] дали следующее определение открытости:

$$\text{Открытость} = 1 - \sqrt{\frac{2 * |\text{Классы при обучении}|}{|\text{Классы при тестировании}| + |\text{Целевые классы}|}}$$

Таблица 1

Сравнение OSR со смежными задачами [3]

Задача	Обучение	Тестирование	Цель
Классификация	Известные известные классы (ИИК)	ИИК	Классификация ИИК
Классификация с отбрасыванием	ИИК	ИИК	Классификация ИИК с отбрасыванием образцов с низким доверием
Одноклассовая классификация (AD)	ИИК и немного выбросов из ИНК	ИИК и немного ИНК	Обнаружение выбросов
Обучение на малом числе примеров («few-shot» learning)	ИИК и ограниченное число выбросов из НИК	НИК	Идентификация НИК
Обобщенное «few-shot» learning	ИИК и ограниченное число выбросов из НИК	ИИК и НИК	Идентификация ИИК и НИК
Обучение с нулевым числом примеров («zero-shot» learning)	ИИК и дополнительная информация	НИК	Идентификация НИК
Обобщенное «zero-shot» learning	ИИК и дополнительная информация	ИИК и НИК	Идентификация ИИК и НИК
OSR	ИИК	ИИК и ННК	Идентификация ИИК и отбрасывание ННК
Обобщенное OSR	ИИК и дополнительная информация	ИИК и ННК	Идентификация ИИК и познание НИК



а б в

Рис. 2. Суть подхода OSR [3]

Здесь через $|\cdot|$ обозначена мощность соответствующего множества классов. Если Открытость=0, то задача полностью замкнутая (при обучении встречаются все возможные классы).

Задача OSR ставится следующим образом: для заданного датасета U, риска свободного пространства R_O и эмпирического риска R_E найти функцию $f \epsilon H$, минимизирующую выражение:

$$f = arg \min_{\hat{f} \in H} \left\{ R_O(\hat{f}) + \lambda_r R_E\left(\hat{f}(U)\right) \right\}$$

где H – воспроизводящее ядро гильбертова пространства;

λ_r – некоторая регуляризирующая константа.

Решение этой задачи привело к рождению целого ряда алгоритмов. Наиболее простые из них, это «машина один-против-всех» (1-vs-Set), классификатор OSNN (адаптация k-NN). На *рисунке 3* показана разница между этими подходами.

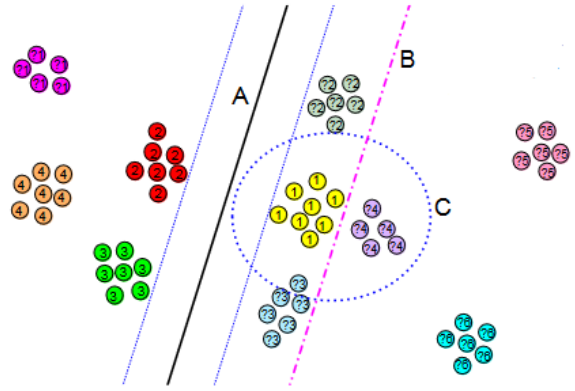


Рис. 3. Разница между подходами OSNN и 1-vs-Set [11]

На *рисунке 3* при обучении известны классы 1-4. Классы со знаком ? появились при тестировании. A и B есть границы принятия решения для класса 1 машиной 1-vs-Set, граница C – классификатором OSNN для этого же класса.

Как видно из *рисунка 3*, отделить неизвестные классы при помощи «простых» алгоритмов не удаётся. Поэтому развиваются более сложные, изощренные алгоритмы, как дискриминативные, так и генеративные. При этом обе группы алгоритмов используют глубокое обучение.

В настоящее время наилучшие результаты получены в алгоритме C2E [12], в котором использован глубокий автоэнкодер. В отличие от предыдущих методов, здесь задача OSR разделена на две подзадачи: вначале автоэнкодер и классификатор обучаются на закрытом множестве классов, затем веса сети автоэнкодера замораживаются и в условиях открытого множества классов обучается сеть декодера с критерием точности восстановления изображения (*рисунок 4*). В результате моделирования ошибок реконструкции (на основе теории статистики экстремальных значений – EVT) находится порог принятия решения. В дальнейшем при тестировании этот порог служит для отбраковки аномальных образцов.

Обнаружение образцов, находящихся вне распределения (OODD)

Обнаружение выхода распределения экземпляров данных за пределы заданного распределения, или OODD, направлено на обнаружение тестовых образцов, на которые модель не может

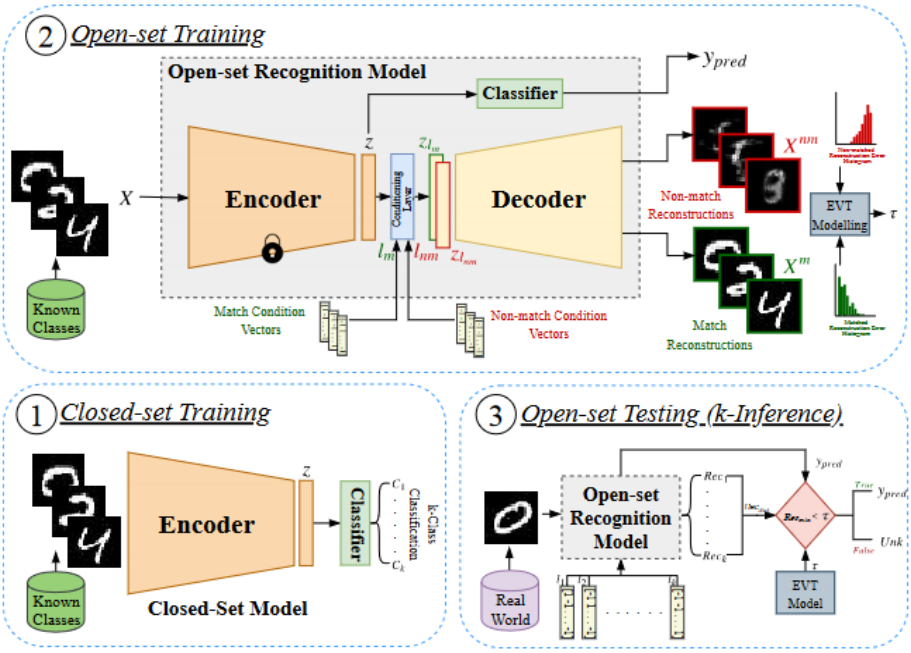


Рис. 4. Алгоритм C2E [12]

выполнить обобщение. Обычно считается, что в большинстве задач МО, таких как классификация изображений, модели должны обобщать свои возможности прогнозирования для выборок с ковариантным сдвигом, и они должны отказываться от обобщения только тогда, когда произойдёт семантический сдвиг. Однако для некоторых приложений, в которых риск неверного решения велик, требуется большая консервативность модели, и она должна делать прогнозы только для выборок точно из обучающего распределения, отбрасывая любые образцы, которые находятся вне его. Таким образом, при OODD задача «обнаружения» должна быть хорошо согласована с задачей «обобщения».

В целом, задача OODD имеет очень много схожего с задачей OSR. Здесь также имеем дело с многоклассовой классификацией и наличием семантического сдвига. Отличия между этими направлениями исследований состоят в следующем:

1) Различные настройки при тестировании: в тестах OSR обычно датасет многоклассовой классификации разделяется на части ID и OOD в соответствии с классами, в то время как в OODD один датасет принимается в качестве ID и находится несколько других датасетов в качестве OOD с гарантией неперекрытия классов между ID/OOD.

2) Отсутствие дополнительных данных в OSR: из-за теоретического ограничения открытого риска в OSR не используются дополнительные данные во время обучения. Это исключает те методы, которые ориентированы на повышение эффективности (например, экспозиция выбросов), но нарушают ограничения OSR.

3) Более разнообразные задачи в OODD по сравнению с OSR, например, ее используют также и при классификации по многим меткам.

Обнаружение выбросов – OD

Обнаружение выбросов направлено на обнаружение образцов, которые заметно отличаются от других в датасете – неважно, из-за ковариантного, либо семантического сдвига.

В задачах AD, ND, OSR и OOD обнаруживались отличающиеся от распределения обучающих данных тестовые экземпляры, неизвестные на этапе обучения. В отличие от этого, в задачах OD обрабатываются все наблюдения, осуществляется поиск выбросов в загрязненном датасете. Таким образом, здесь нет разделения на обучающие и тестовые данные. В связи с этим, подходы к решению задачи OD обычно являются трансдуктивными, а не индуктивными.

В отличие от индукции, являющейся рассуждением от частного (наблюдаемых объектов обучения) к общему (закономерностям общего характера), трансдукцией называют выводы о частных случаях (тестовых данных) на основании частных случаев (данных обучения).

Обнаружение выбросов в основном применяется в задачах интеллектуального анализа данных, но также используется и в приложениях компьютерного зрения, да и везде, где необходима очистка датасетов. Для очистки датасетов OD обычно используется в качестве предварительного этапа обработки перед решением основных задач обучения.

Методы решения задач GOODD

В настоящее время разработано множество методов и алгоритмов обнаружения аномальных данных. Их можно разделить на методы, основанные на:

- классификации экземпляров данных;
- реконструкции образцов данных;
- оценке плотности распределения вероятности данных;
- оценке расстояния между множествами.

Другая классификация методов может быть основана на том, каким образом осуществляется обучение:

- с учителем;
- с самообучением;
- с частичным привлечением учителя;
- без учителя.

Следующая классификация может быть основана на том, какой подход машинного обучения используется. В соответствии с этим, все методы могут быть разделены на методы, использующие:

- «классическое» машинное обучение;
- глубокое машинное обучение.

Классическими, давно используемыми методами GOODD, являются методы главных компонент (PCA), одноклассовой машины опорных векторов (OC-SVM), описания данных опорными векторами (SVDD), кластерных алгоритмов типа k-NN и ядерных оценок плотностей распределения (KDE).

В последнее время значительный интерес проявляется в использовании методов глубокого машинного обучения (ГО) для решения задачи AD. Это связано с недостаточной эффективностью «классических», выше перечисленных методов. Исследуются такие методы, как методы глубоких автоэнкодеров, трансформеров, глубокой одноклассовой классификации, генеративные методы, такие как генеративно-состязательные сети (ГСС), диффузионные сети, методы, основанные на самообучении (self-supervised), методы предсказуемого моделирования [8,9].

Датасеты и программное обеспечение в области GOODD

В свободном доступе находится достаточное количество датасетов, которые используются для отладки алгоритмов GOODD и сравнения их между собой. Все датасеты можно подразделить на используемые для обнаружения семантического и сенсорного сдвига. Для начала исследования в области обнаружения семантического сдвига обычно используют небольшие датасеты, такие как MNIST, Fashion-MNIST, SVHN, COIL-100. Далее используются более обширные и разнообразные датасеты, такие как CIFAR-10, CIFAR-100, LSUN, TinyImageNet. Наиболее показательными результаты GOODD являются для таких датасетов, как Flowers и Birds.

Для обнаружения сенсорного сдвига используют, в завимисоти от приложения, такие датасеты, как MVTec AD, PCB, LaceAD, Retinal-OCT, CAMELYON16, Chest X-Rays, Specie, ImageNet-O. Также имеются специально разработанные датасеты, в экземпляры которых внесены те или иные искажения: MNIST-C, ImageNet-C, ImageNet-P.

Исследуемые алгоритмы объединяются в библиотеки, которые распространяются в свободном доступе, причем, зачастую, вместе со статьей, в которой они предлагаются (так называемое «воспроизводимое исследование», очень важный в МО подход). Много таких статей можно найти на следующем полезном ресурсе с говорящим названием [13]. Существуют также и отдельные библиотеки, например, по следующему адресу [14] приведены ссылки на 59 (!) свободно распространяемых библиотек, что лишний раз доказывает интенсивность исследований в данной области. В исследовательской среде Matlab также реализованы методы поиска аномалий (без использования глубокого обучения) [15].

Заключение

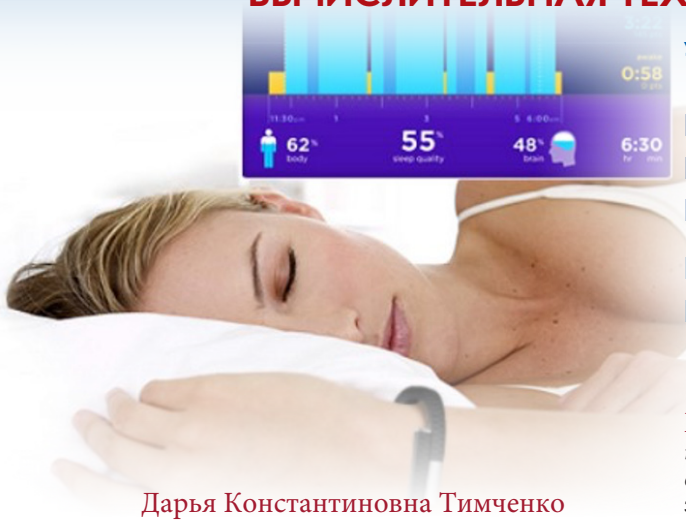
С появлением технологий глубокого обучения произошел прорыв в эффективности решения многих задач, однако, появились и специфические проблемы. GOODD имеет большое значение для развития ГО, особенно для безопасного и доверенного ГО.

Мы живем в эпоху больших данных и вынуждены зачастую полагаться на машинную обработку данных. Технологии GOODD могут идентифицировать аномальные образцы во входных данных заранее, тем самым значительно уменьшая частоту ошибок модели и снижая потери в практических приложениях. GOODD уже находит свое применение в банковском деле, транспорте, медицине, компьютерных сетях и других областях.

Несмотря на то, что область исследований GOODD активно развивается в последнее время, в ней еще много нерешенных проблем.

Литература

1. J. Yang, K. Zhou, Y. Li, Z. Liu. Generalized Out-of-Distribution Detection: A Survey // https://arxiv.org/pdf/2110.11334.pdf.
2. Frank E Grubbs. Procedures for detecting outlying observations in samples // Technometrics. №11. 1969. Pp.1-21.
3. C. Geng, S. Huang, S. Chen. Recent Advances in Open Set Recognition: A Survey // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. №10(43). 2021. Pp. 3614-3631.
4. D.Hendrycks, S.Basart, M.Mazeika, M.Mostajabi, J.Steinhardt, D.Song. Scaling out-of-distribution detection for real-world settings. ICML, 2019.
5. S.Garg, N.Erickson, J.Sharpnack, A.Smola, S. Balakrishnan, Z. C. Lipton. RLSBench: A Large-Scale Empirical Study of Domain Adaptation Under Relaxed Label Shift / Proc. of NeurIPS 2022 Workshop on Distribution Shifts: Connecting Methods and Applications. New Orlean. USA. 2022.
6. Y. Zhao, J.Zhu, L.Xiang, J. Zhang, Y.Zhou, F.Zhai, C.Zong. Life-long Learning for Multilingual Neural Machine Translation with Knowledge Distillation https:// doi.org/ 10.48550 /arXiv.2212. 02800.
7. L.Ruff, J.R. Kauffmann, R.A. Vandermeulen, G.Montavon, W.Samek, M.Kloft, T.G. Dietterich, K.Muller. A Unifying Review of Deep and Shallow Anomaly Detection // Proceedings of the IEEE. Feb, 2021. Pp.1-40.
8. G.Pang, C.Shen, L.Cao, A. van der Hengel. Deep Learning for Anomaly Detection: A Review //https:// arxiv.org/ pdf/ 2007. 02500.pdf.
9. R.Chalapathy, S.Chawla. Deep Learning for Anomaly Detection: A Survey //https:// arxiv.org/ pdf/ 1901. 03407.pdf.
10. W. J. Scheirer, A. de Rezende Rocha, A. Sapkota, T. E.Boult. Toward open set recognition // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. Vol.35. №7. 2013. Pp. 1757-1772.
11. C.Geng, S.Chen. Collective Decision for Open Set Recognition // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Volume 34, Issue 1, Jan. 2022. Pp.192-204.
12. P. Oza, V.M. Patel. C2ae: Class conditioned auto-encoder for open-set recognition // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2019.
13. https://paperswithcode.com/
14. https://awesomeopensource.com/projects/out-of-distribution-detection
15. https://www.mathworks.com/discovery/anomaly-detection.html



УДК 611.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ LIFESTYLE МЕДИЦИНЫ

MACHINE LEARNING APPROACHES IN LIFESTYLE MEDICINE FIELD

Евгений Владимирович Вершинин
кандидат физико-математических наук, доцент
заместитель директора по науке
ФГБОУ ВО Калужский филиал
МГТУ имени Н.Э. Баумана
Тел.: 8 (910) 510-73-50
E-mail: vershinin@bmstu.ru

Дарья Константиновна Тимченко
аспирант
ФГБОУ ВО Калужский филиал
МГТУ имени Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Аннотация
В статье описаны основные направления lifestyle медицины, способы отслеживания фаз сна и активности и анализ собираемых данных, в том числе при помощи машинного обучения. Представлены и проанализированы способы сбора информации о жизнедеятельности человека и методы машинного обучения, описаны достоинства, недостатки и варианты решения возможных проблем при внедрении системы.
Ключевые слова: медицина образа жизни, отслеживание фаз сна, анализ физической активности, машинное обучение, мультиомный анализ.

Summary
The article describes the main areas of lifestyle medicine, ways to track sleep and activity phases, and analyze the collected data, including using machine learning. Methods for collecting information about human life and machine learning methods are presented and analyzed, advantages, disadvantages and options for solving possible problems during the implementation of the system are described.
Keywords: lifestyle medicine, sleep phase tracking, physical activity analysis, machine learning, multi-omic analysis.

Введение

С течением времени появляется все больше и больше исследований, результатом которых становится прямая корреляция образа жизни человека с наличием или отсутствием у него хронических заболеваний. Таким образом, все большую популярность набирает терапия образа жизни в противовес традиционному подходу фармакологической медицины.

Среди основных направлений lifestyle медицины чаще всего выделяют: правильное питание, регулярные умеренные физические нагрузки, отказ от алкоголя и никотина, крепкий и здоровый сон, а также позитивное социальное взаимодействие. Среди негативных факторов образа жизни выделяют хронический стресс [4].

Основные направления исследования

В исследовании, проведенном в 2021 году группой европейских ученых, обобщаются в общей сложности 110 результатов предыдущих исследований на предмет корреляции неправильного питания с преобладанием углеводов, рафинированной и обработанной пищи и разных типов рака груди, легких, простаты и проч. В большинстве удалось выявить ту и иную зависимость риска развития смертельного заболевания с разнообразными факторами неправильного питания. Исследовались преобладание в рационе макронутриентов, продуктов животного происхождения, особенно красного мяса, насыщенных и ненасыщенных жиров [4].

Кроме того, множество исследований подтверждают повышение рисков развития диабета второго типа, заболеваний сердечно-сосудистой системы в связи с теми или иными негативными пищевыми привычками. Показано, что матери, страдающие ожирением, имеют повышенный риск рождения ребенка с диабетом первого типа. Кроме того, существуют исследования, доказывающие, что чрезмерное употребление сахара и рафинированных продуктов промышленного производства вызывают химическую зависимость от такой пищи, что приводит к увели-

чению объемов потребляемой пищи и оказывает негативное влияние на здоровье человека [6].

Умеренная физическая активность также является обязательным фактором здорового образа жизни. Доказано, что физическая активность позволяет снизить негативное влияние стресса на организм, упражнения стимулируют самообновление стволовых клеток в мозге, мышцах и других тканях, стимулируют когнитивные функции [4].

Регулярный качественный сон также оказывает значительное влияние на физическое благополучие человека. Сон оптимизирует процессы на всех уровнях жизнедеятельности человека: клеточном, тканевом, уровне отдельных органов и их систем, регулирует способности к познанию и эмоциональное состояние. Сон и бодрствование существуют в пределах 24-часовых ритмов, регулируемых основными циркадными генами.

Методы машинного обучения в медицине образа жизни

Медицина образа жизни – развивающееся направление, некоторые проблемы которого успешно решаются с помощью методов машинного обучения и анализа больших данных. Некоторые эксперты видят конечной точкой такого развития появление цифровой копии человека для анализа и прогнозирования состояния его здоровья с опорой на популяционные данные в зависимости от его генетики, образа жизни, состояния окружающей среды, социальных связей и прочих факторов. Использование такого цифрового «близнеца» позволит в реальном времени обеспечить пациента рекомендациями относительно его образа жизни [1].

Одной из перспективных областей исследований является обработка и анализ данных, полученных из исследования одного или нескольких «омов»: генома, эпигенома, транскриптома и протеома. Особое развитие это направление получило после успехов в области секвенирования генома, а также развития вычислительной техники и методик обработки данных. Машинное обучение используется для обнаружения неочевидных, в том числе нелинейных, корреляций в данных, изучения клеточных механизмов, опознания молекулярных сигнатур и прогнозирования клинических исходов на больших наборах данных [5].

В этой области исследований механизмы машинного обучения сталкиваются с определенными проблемами. Например, количество параметров может многократно превышать количество образцов, что приводит к переобучению модели. Существует два способа решения этой проблемы: извлечение или выбор параметров. Методы извлечения параметров могут быть линейными (например, метод анализа главных компонент) и нелинейными (например, использование автоэнкодера). Среди методов выбора параметров выделяют методы фильтрации, обертывания и методы со встроенным определением ключевых параметров [5].

Следующей значительной проблемой мультиомных исследований является неоднородность данных. Причины такой неоднородности включают, помимо прочего, существенно различное количество переменных, различающиеся распределения и масштабирование, различные модальности данных, т.е. непрерывные сигналы, дискретные подсчеты, интервалы и т.д.

Использование классификаторов в таких исследованиях затрудняется редкостью определенных классов или дисбалансом классов, представленных в данных. Это также ведет к переобучению. Большинство классификаторов, включая методы случайного леса, опорных векторов и искусственные нейронные сети скорее проигнорируют экземпляры редкого класса, представляющие основную ценность исследования. Проблема решается случайным исключением экземпляров доминирующего класса или применением алгоритмов, придающих больший вес редким образцам [5].

Известны также исследования микробиома кишечника, когда с помощью методов машинного обучения на основании данных о биоме пациенту выносятся рекомендации о продуктах, которые ему следует или не следует употреблять. Среди наиболее распространенных областей применения машинного обучения: классификация и распознавание микробных таксонов, т.е. микробная классификация и таксономическое присвоение; предсказание фенотипа хозяина путем связывания микробных популяций с фенотипами и экологической средой, т.е. прогнозирование заболеваний; и использование микробных сообществ для понимания механизмов заболевания и дальнейшего применения в персонализированной медицине, т.е. поиск биомаркеров [3].

Двигательную активность и качество, и продолжительность сна можно оценить с помощью датчиков носимых устройств пациента: датчика частоты сердечных сокращений, гироскопа и акселерометра. С помощью этих данных и методов машинного обучения можно классифицировать тип движения: ходьба, ходьба по лестнице вверх, ходьба по лестнице вниз, бег, сидение, лежание. Кроме того, с помощью этих же датчиков возможно определить фазу сна или пробуж-

дение. На основе этих данных можно сформировать набор рекомендаций по физической активности, необходимой конкретному пользователю, учитывая его базовый уровень подготовки и объем физической нагрузки, который он выполняет на ежедневной основе [2].

Заключение

Машинное обучение и анализ больших данных находят широкое применение как в области биомедицины вообще, так и в lifestyle медицине, в частности. Текущее состояние этих областей уже позволяет облегчить симптомы многих хронических заболеваний при помощи использования терапии образа жизни, а не приемом лекарственных средств на постоянной основе.

Дальнейшем развитием технологий в этом направлении будет постепенное продвижение к синтезу цифрового двойника человека и на его основе обеспечение человека рекомендациями относительно здорового образа жизни, включая рацион, тренировки, режим дня, прием лекарств и прочее.

Литература

1. Alber M., Buganza Tepole A., Cannon W.R. et al. Integrating machine learning and multiscale modeling – perspectives, challenges, and opportunities in the biological, biomedical, and behavioral sciences. npj Digit. Med. 2, 115 (2019). https://doi.org/10.1038/ s41746-019-0193-y8540388.

2. Bevilacqua A., MacDonald K., Rangarej A., Widjaya V., Caulfield B., Kechadi T. «Human activity recognition with convolutional neural networks» in Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Springer, 2018. Pp. 541-552.

3. Li P., Luo H., Ji B. et al. Machine learning for data integration in human gut microbiome. Microb Cell Fact 21, 241 (2022). https://doi.org/10.1186/s12934-022-01973-4

4. Marcos-Zambrano Laura Judith, Karaduzovic-Hadziabdic Kanita, Loncar Turukalo Tatjana, Przymus Piotr, et al. «Applications of Machine Learning in Human Microbiome Studies: A Review on Feature Selection, Biomarker Identification, Disease Prediction and Treatment». Frontiers in Microbiology. Vol. 12, 2021.

5. Mirza B., Wang W., Wang J., Choi H., Chung N.C., Ping P. Machine Learning and Integrative Analysis of Biomedical Big Data. Genes (Basel). 2019. Jan 28; 10(2):87. doi: 10.3390/genes10020087. PMID: 30696086; PMCID: PMC6410075.

6. Ubago-Guisado E, Rodríguez-Barranco M, Ching-López A, Petrova D, Molina-Montes E, Amiano P, Barricarte-Gurrea A, Chirlaque MD, Agudo A, Sánchez MJ. Evidence Update on the Relationship between Diet and the Most Common Cancers from the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC) Study: A Systematic Review. Nutrients, 2021 Oct. 13; 13(10): 3582. doi: 10.3390/nu13103582. PMID: 34684583; PMCID: PMC

УДК 004.8.004.9

О ПРИЗНАКАХ И УРОВНЯХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ[1]

ON THE SIGNS AND LEVELS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE. CONCEPTUAL FOUNDATIONS

Игорь Александрович Бугаков
заслуженный изобретатель РФ,
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
член Научного совета при Президиуме РАН
по методологии искусственного интеллекта и
когнитивных исследований
вице-президент АНО «Институт инженерной физики»
по инновационным проектам
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1 а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: iabugakov@iifmail.ru

Василий Васильевич Елистратов
доктор технических наук
начальник Управления развития технологий
искусственного интеллекта
Министерство обороны РФ

Алексей Николаевич Царьков
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Президент АНО «Институт инженерной физики»
E-mail: tsarkov@iifmail.ru

Алексей Игоревич Бугаков
старший специалист группы тестирования и
отладки комплексов
АНО «Институт инженерной физики»
E-mail: aibugakov@iifmail.ru

Аннотация
В статье продолжено изложение концептуальных идей, касающихся уровней развития искусственного интеллекта и базисных признаков, наличие которых у искусственных объектов позволяет отнести их к объектам с искусственным интеллектом. Приведено описание признаков и особенности их проявления.
Ключевые слова: искусственный интеллект (ИИ), настоящий ИИ, генетический базис ИИ, механизм функционирования, проявления реальности, способности, мышление, уровень понимания, достаточное понимание, максимальное понимание, восприятие внешней и внутренней реальности, гомеостаз, обучаемость, адаптируемость, объяснимость.

Summary
The article continues the presentation of conceptual ideas regarding the levels of development of artificial intelligence and basic features, the presence of which in artificial objects allows them to be classified as objects with artificial intelligence. The description of signs and features of their manifestation is given.
Keywords: artificial intelligence (AI), real AI, genetic basis of AI, mechanism of functioning, manifestations of reality, abilities, thinking, level of understanding, sufficient understanding, maximum understanding, perception of external and internal reality, homeostasis, learning ability, adaptability, explainability.

В первой части статьи [1] рассмотрены различные уровни развития искусственного интеллекта (ИИ), в обобщенном виде представленные на *рисунке 1*.

Обратим внимание на то, что основой интеллекта является генетическая составляющая. В любом живом организме, обладающем естественным интеллектом, эта составляющая отражает интеллект вида[2], сформированный в процессе миллионов лет его эволюции в своей среде обитания на Земле. Видовая (филогенетическая) составляющая определяет возможности дальнейшего (после рождения) индивидуального (онтогенетического) развития[3]. Инстинкты, безусловные рефлексы, механизмы гомеостаза и защиты от вирусов, «табу», способности ощущать, воспри-

[1] Окончание. Начало в №4 (66) за 2022 год.
[2] К которому принадлежит данный организм.
[3] Вспомним слова Конрада Лоренца о том, что не только «копыто лошади» или «плавник рыбы» еще до рождения приспособлены к среде своего обитания, но и «формы восприятия пространства и времени» [2]). Добавим, что речь идет об априорности не только о программного, но и аппаратного (!) обеспечения.

нимать, двигаться, овладевать языком, мыслить и даже творить – все это уже заложено в геноме и настроено на конкретную реальность, представленную ее априорно заданной моделью – «моделью мира» (ММ), далее применяемой и развиваемой организмом в онтогенезе. Во многих случаях только филогенетической (видовой) составляющей без ее дальнейшего развития в онтогенезе вполне может быть достаточно для эффективного выполнения «генетическим ИИ» своей функции [1]. К сожалению, в современных реализациях ИИ такая априорная ММ, содержащая его свойства и алгоритмы поведения в нем, присутствует крайне редко[4].

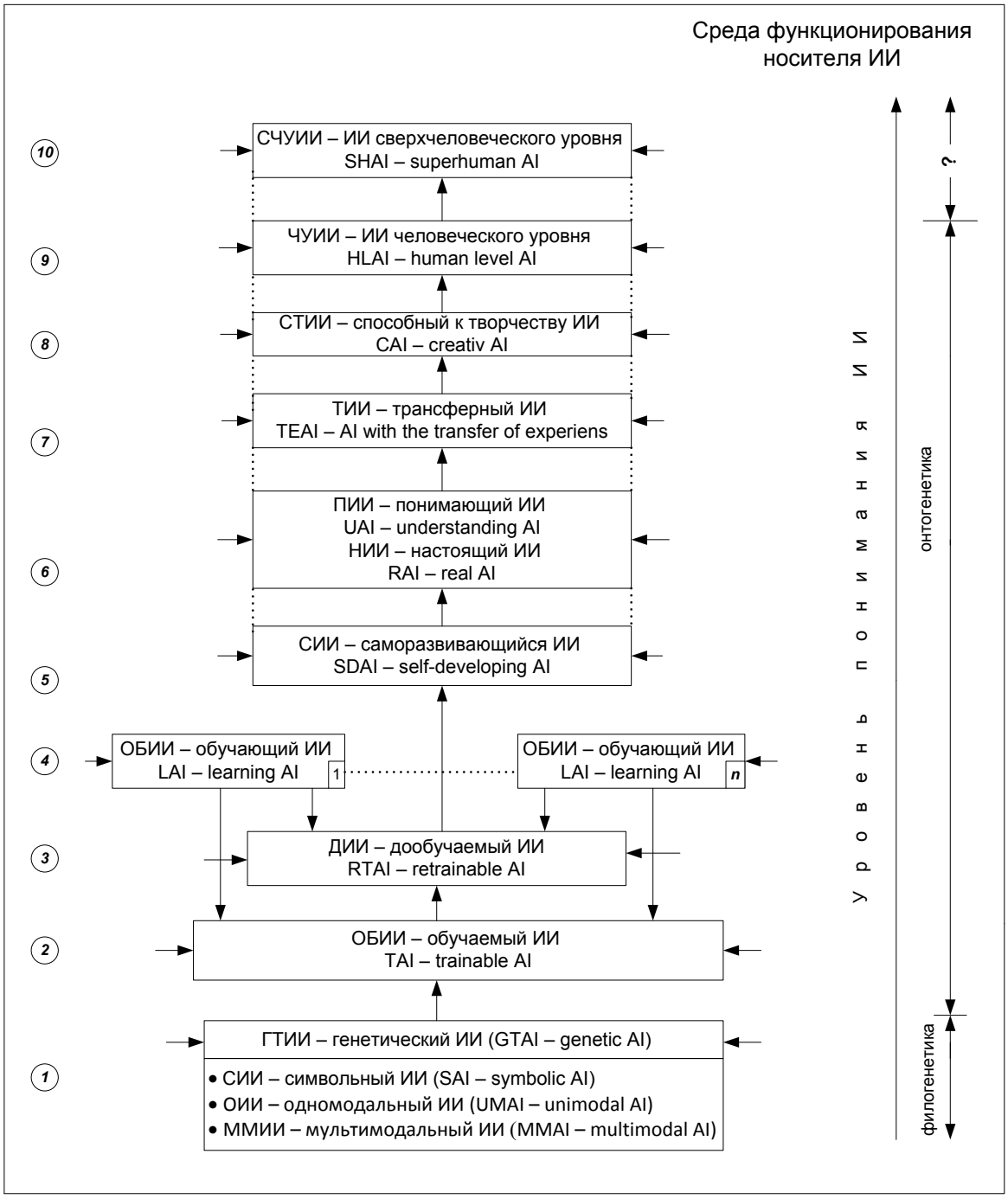


Рис. 1. Уровни развития ИИ

[4] Потому все чаще проблему безопасности решают на основе идеи «нулевого доверия» (см., например, [3]). В последнее время в качестве перспективных рассматривают предобученные так называемые «базовые модели», но требуемые для их широкого обучения объем данных и вычислительная мощность экономически неприемлемы в случае их последующего узкого применения.

Конечно, представленная классификация – одна из возможных и достаточно условна, как, впрочем, условно большинство попыток представить составляющие сложных понятий, научное значение которых еще только формируется, а смысл, как правило, определяется контекстом.

Обратим внимание, что на уровне 6 появляется понимание. О каком понимании идет речь? И означает ли это, что его нет на нижних уровнях? Напомним, что в первой части статьи [1] говорилось об условном признании существования «статистического понимания»[5], которым «обладают» обученные ИНС, решающие задачу распознавания образов посредством статистического сопоставления входа выходу, а также о том, что в целом понимание, по устоявшемуся мнению, – «камень преткновения» ИИ. Но что следует учитывать, говоря о понимании?

Во-первых, говорить о понимании чего-либо имеет смысл только в рамках решения конкретной поставленной задачи, движения к конкретной желаемой цели. Т.е. понимание связано с той или иной областью, в рамках которой – с той или иной ее частью, которую, в свою очередь, можно также представить в виде той или иной иерархически-сетевой системы[6].

Во-вторых, понимание всегда контекстуально, что требует присутствия в ММ, кроме специализированной, соответствующей специфике и сложности решаемой задачи, составляющей, еще и необходимого объема «здравого смысла».

В-третьих, уровень понимания при этом может быть разным. Можно иметь «кнопочное», похожее на вышеуказанное «статистическое» или свойственное компьютерам «синтаксическое»[7] понимание: чтобы достичь цели, надо сначала нажать одну кнопку на пульте управления, потом другую и т.д., понимая, что такое «кнопка» и где каждая из них находится, но не понимая, что при этом происходит[8]. Но то же самое можно делать, понимая, какие процессы при каждом нажатии происходят, что будет, если нажать не ту кнопку, и что делать, если кнопка не «сработала». Если «субъект» хотя бы частично понимает причины и следствия тех или иных действий, их влияние на конечный результат, то его понимание, конечно, глубже «кнопочного».

В-четвертых, говоря об уровне понимания, целесообразно ввести уровень «достаточно глубокого понимания», позволяющий достичь желаемой цели с требуемым качеством (эффективностью, учитывая затраты). Не надо лишнего знания. Но чем выше требуемое качество, тем больше факторов (условий) для его достижения надо учесть, тем глубже должно быть понимание значений и смыслов («семантическое понимание») того, что происходит и как этим управлять.

В-пятых, также целесообразно ввести уровень «максимально глубокого понимания», рассматривая его как с научной, так и с практической точки зрения. С точки зрения науки – это уровень максимально возможного, основанного на последних достижениях науки, понимания[9]. С точки зрения практики – это уровень максимально целесообразного понимания, при достижении которого дальнейшее наращивание знаний нецелесообразно, поскольку оно или не влияет на качество достижения цели или понесенные при освоении и использовании этих знаний затраты неприемлемы (существенно превышают допустимые).

Таким образом, ориентируясь на практику, к уровню 6 целесообразно отнести «достаточно глубокое понимание», которого в рамках поставленной задачи достаточно для ее решения с требуемым качеством[10], причем чем проще реше-

[5] Весьма трудозатратно достижимого и во многих случаях неэффективного.

[6] Т.е. любая ММ, используемая для достижения той или иной цели, всегда целесообразно ограничена.

[7] «Понимание» компьютером символов исполняемой программы.

[8] Технический прогресс ведет к тому, что каждое новое поколение людей становится все более «кнопочным», все более отдаляясь от сущности протекающих при нажатии той или иной «кнопки» процессов. С одной стороны, это, действительно, часто необязательно для достижения цели, но с другой все более растущая «поверхностность» восприятия (в том числе и потому, что объем знаний лавинообразно возрастает) вызывает тревогу. Уровень даже не специальных, а базовых знаний человека все более размещается в области «как?», хотя понимание сущности обычно связано с ответом на вопрос «почему?» В качестве утешения заметим, что сама наука не всегда способна ответить на этот вопрос, оставаясь в когда-то эмпирически найденной ею области «как» и предлагая человечеству успешно пользоваться этим знанием. Как получить электрический ток? Надо покрутить проволоку около магнита. Почему? Ответа нет, ибо знания об электричестве и магнетизме до сих пор весьма поверхностны.

[9] Заметим, что, строго говоря, максимально возможное понимание даже в научном плане никогда не может стать по-настоящему «полным», т.е. вероятность «полного» понимания в принципе не может быть равна единице из-за невозможности учета всех факторов влияния в используемой и принципиально ограниченной ММ с ненулевой вероятностью существования «черного лебедя» и «эффекта бабочки».

[10] Им может быть как простое «кнопочное» и даже «статистическое» (!) понимание (для соответствующих условий), так и «глубокое» понимание (понятны суть задачи, исходные данные и ограничения, путь и особенности решения, «что будет, если…», действия в случае, если что-то пойдет не так как надо и т.д.), вплоть до «максимально глубокого (целесообразного) понимания».

ние, тем в большинстве случаев оно лучше[11]. Так как уровни сложности задач могут быть разные, то и глубина требуемого («достаточно глубокого») понимания для разных задач, в зависимости от их сложности и соответствия используемой ММ области ее применения, может существенно разниться[12].

Потому у ИИ, выполняющих разные задачи, должны быть разные исходные («генетически» заданные) ММ, учитывающие важные для достижения своей цели свойства среды, свои возможности, а также цели и возможности других (при их наличии) действующих в этой среде объектов. Причем речь идет не только о разных ММ у разных «родов» ИИ, «видов» и «подвидов» ИИ, но и об уникальных ММ отдельных «особей».

Множественность областей проявления ИИ[13] с градацией его возможностей в рамках каждой области, учитывая множественность составляющих каждой области, может быть отражена соответствующей иерархически-сетевой структурой[14].

Но если «достаточно глубокое понимание» появляется только на уровне 6, то означает ли это, что можно обучаться (уровень 2), дообучаться (уровень 3) и даже обучать (уровень 4), не понимая с достаточной глубиной? К сожалению, да, означает. Можно обучаться и даже обучать, понимая не все, что требуется для выполнения решаемой задачи с желаемым качеством[15].

Эффективное (в частности, экономное – без излишнего количества проб и ошибок) перенесение полученного опыта на иную область отражает уровень 7 - уровень трансферного ИИ.

На уровне 8 представлен способный к творчеству ИИ[16]. Означает ли это, что любое творчество обязательно предполагает наличие глубокого понимания области его (творчества) приложения (проявления)? В большинстве случаев – да. В мире людей справедливо считается, что только на основе глубоких знаний и опыта можно совершить научное открытие или создать художественный шедевр[17]. И именно поэтому этот уровень представлен выше уровней понимающего (6) и трансферного (7) ИИ. Но нельзя забывать, что иногда это правило нарушается и открытия делают дилетанты[18]. В том числе и потому, что их разум не «зашорен» неверными «научными» знаниями[19]. Тем более, что объяснения неосознаваемому процессу творчества, кроме связывания его с загадочным «инсайтом» (внезапным «озарением»), пока у науки нет[20].

Уровни 9 и особенно 10 можно описать лишь приблизительно, поскольку научных знаний о полном перечне и диапазонах интеллектуальных способностей человека, нет. Учитывая, что каждый человек имеет свой спектр способностей, причем «одаренность» в одной области может соседствовать с «посредственностью» в другой, какой «среднестатистический» интеллект надо иметь ввиду, говоря о «человеческом», а тем более – о «сверхчеловеческом» уровне ИИ?[21]

---

[11] Не переходя, конечно, допустимый уровень простоты, помня слова А. Эйнштейна о том, что решение должно быть «предельно простым, но не проще».

[12] Заметим, что «достаточно полно» (для выживания) понимают не только люди, но и многие животные.

[13] Применительно к интеллекту человека обычно говорят о его различных типах: логико-математическом, вербально-лингвистическом, социальном и др. (Штернберг, Терстоун, Гарднер, Спирмен,…).

[14] При этом к каждой составляющей можно попытаться применить идею обобщенного ряда Фурье, т.е. возможность представление этой составляющей в виде взвешенной суммы базисных элементов нижележащих (не обязательно только предыдущего) уровней.

[15] Жизненный опыт каждого человека, вероятнее всего, содержит такие примеры.

[16] Под творчеством здесь понимается высшее проявление способности интеллекта создавать принципиально новое, логически не вытекающего из уже известного.

[17] Можно ли считать настоящим творчеством способность «генеративного ИИ», «подражая» известному художнику, создавать приводящие в восхищение «специалистов» «картины», продаваемые за немалые (!) суммы? Наверное, нет. А если ИНС соединяет техники (стили) разных художников, формируя не отторгаемое зрением специалиста что-то действительно новое? Однозначного ответа нет. Налицо известная философская проблема порождения нового из старого, поднятая еще Лукрецием Каром (идея клинамена) в его трактате «О природе вещей».

[18] В изначальном смысле этого термина как любители, пришедшие в ту или иную область из любви к ней (Коперник, Гельмгольц, Жуковский, Ферма, Эйлер, Эшби, …).

[19] Пример - обнаружение Маркони дальней радиосвязи, о невозможности которой вещала наука того времени.

[20] Недавнее появление ChatGPT с учетом приведенного в первой части статьи примера с инопланетянами, пытающимися понять работу земного телевизора, позволяет в качестве «ненаучной» гипотезы предложить существование некоего ChatWM (где WM – World Mind – мировой разум), так что все наши «гениальные» идеи есть не более чем ответ «мирового разума» на запрос нашего сознания. Главное – правильно сформулировать вопрос (запрос) к ChatWM и быть требуемым образом подготовленным (иметь требуемый уровень общего и специального развития, соответствующую ММ) к приему и интерпретации (пониманию) ответа-подсказки. Как здесь не вспомнить идею Николы Теслы о том, что мозг – всего лишь приемное устройство.

[21] Можно, например, считать, что сумма весовых коэффициентов всех способностей «среднестатистического» человека равна единице (различие - в значениях этих коэффициентов при разных способностях)? Но как задавать эти коэффициенты?

Каждая ли способность «сверхчеловеческого» ИИ должна превышать уровень человеческого «гения» (и как его определить)[22])?

Очевидно, что можно лишь указать на некоторые отдельные преимущества искусственного интеллекта перед естественным (проявляемые и на более ранних уровнях), в частности, на: отсутствие ограничений по объему и энергопотреблению, высокие вычислительные возможности, объем доступной памяти и скорость обращения к ней, возможность объединения многих ИИ (не только «дочеловеческого» или «человеческого», но и «сверхчеловеческого» уровня) в единую систему. При наличии соответствующей ММ с достаточным объемом «здравого смысла» для некоторых сложных задач действительно можно (но надо ли?) получить ИИ, соответствующий «сверхчеловеческому» уровню[23].

Говоря о применении ИИ, целесообразно отделять уже существующее у ИИ умение (алгоритм достижения желаемого результата) от способности в случае необходимости его сформировать. Исходя из того, что созданный человеком ИИ нужен только как помощник, умеющий во многих случаях не только на уровне человека и даже более качественно, чем человек, справиться с рядом задач, но и в интересах человека выполнять задачи, которые человек принципиально не должен или не может выполнить (например, действовать в опасных для жизни условиях или там, где человек физически не может разместиться), упор, конечно, следует сделать на результат. Напомним еще раз, что результату посвящены известные тесты Тьюринга и Вознякa. О результатах при выполнении конкретных задач, «сопоставимых, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека», идет речь в определении ИИ, трактующем его как «комплекс технологических решений, позволяющих имитировать когнитивные функции человека» [4]. Именно с позиций результата следует оценивать конечную полезность ИИ, сопоставляя полученный результат с затратами на его получение.

А как же быть со способностями? Ведь все тесты на интеллект человека, качественно или количественно определяющие его «уровень интеллекта»[24], нацелены на оценку именно способностей! И не только человека. В [5] предлагается измерять ИИ «эффективностью в приобретении навыков с учетом имеющихся у него априорных знаний, опыта и сложности обобщения», т.е. посредством оценки способностей. Нельзя при оценке считать равными два интеллекта, один из которых самостоятельно, реализуя свои когнитивные способности, порождает умение как эффективный алгоритм достижения цели, а другой уже владеет этим алгоритмом, ибо он мог получить его в более легких условиях, например, следуя той или иной конкретной обучающей инструкции или даже получить его от рождения в виде генетической составляющей[25]. Это означает, что объект, владеющий этим алгоритмом, например, самостоятельно полученным им ранее в онтогенезе, демонстрирует не способность, не интеллект, а умение. И только тот объект, который самостоятельно, «на глазах судей» получает это решение, демонстрирует «настоящий» интеллект как набор когнитивных способностей. Чтобы быть действительно уверенным в наличии этих способностей, до проведения тестов на интеллект определяют имеющийся у испытуемого опыт, объем исходных данных, гарантируют неизвестность для испытуемого тестовых задач. Величина той или иной способности определяется сложностью решенной задачи, а также объемом априорных знаний (чем сложнее задача и меньше исходной информации, тем больше способность). Правильно ли это? И главное, нужно ли?

Очевидно, что способность интеллекта порождать достигающие поставленных целей умения, превращаемые в процессе их применения в навыки, составляющие сохраняемый в памяти опыт, расширяющий в процессе жизни носителя интеллекта его ММ и алгоритмы поведения в нем, является весьма важной. Но, во-первых, человеку априорно приписывается наличие интеллекта, а ИИ еще надо доказать его наличие. Потому подход к «измерению» интеллекта посредством оценки (количественной и (или) качественной) набора способностей применим скорее к носителям интеллекта естественного, чем искусственного, да и то в соревновательных или диагностических целях. Укажем, что все составляющие (виды) интеллекта человека, которые уже «открыты» (предложены) или еще ждут своего «открытия», в каждом из нас заданы генетически, выполняя свою функцию при на-

[22] Главное, чего не надо делать, - это пытаться использовать некий обобщенный (интегральный, суммарный, …) показатель, позволяющий, конечно, соединить «ужа с ежом», но без какой-либо практической ценности, ибо базисные элементы, формирующие то или иное пространство, как минимум, линейно-независимы.

[23] Речь о действительно сложных интеллектуальных задачах, поскольку в задачах простых (например, связанных с распознаванием образов в определенных условиях) ИИ во многих случаях уже «обогнал» человека.

[24] Например, величину коэффициента интеллект (IQ).

[25] Это похоже на приводимое нами в [6] рассуждение о критерии интеллектуальности той или иной задачи. Часто говорят, что к интеллектуальной следует отнести задачу, решение которой неизвестно. Вроде бы разумно. Но из этого явным образом следует субъективность интеллектуальности задачи, ибо интеллектуальная задача для меня может быть неинтеллектуальной для моего соседа, который уже знает точный алгоритм ее решения.

ступлении тех или иных условий[26]. Во-вторых, повторим, что ИИ нам нужен не как набор способностей к чему-либо, которые могут проявиться, а могут и не проявиться[27], а как нечто, умеющее наверняка выполнять конкретные и полезные для человека задачи. Конечно, в случае, если их решение требует от ИИ творческого подхода, проявления «фантазии», опирающейся не только на профессиональный опыт, но и на исключающий грубые ошибки «здравый смысл», то при отсутствии неприемлемых рисков это допустимо.

Для выполнения сложных функций генетический базис должен быть весьма разветвленным, иерархически-сетевым, нести в себе пространственно-временную ММ с физическими отношениями, причинными и ассоциативными связями. Т.е. следует особое внимание уделить качеству генома ИИ, его филогенетической составляющей[28]. И такая априорная предзаданность не является ограничением. Не надо ее отторгать как не имеющую отношения к интеллекту! Ведь все, что каждый человек ежедневно делает, опирается, по сути, на его априорно (до этого дня!) жестко заданную ММ с конкретными отработанными алгоритмами поведения, являющуюся суммой филогенетического и онтогенетического опыта[29]. Причем, эта модель принципиально вероятностна[30], опирается на прошлый опыт для восприятия текущей (настоящей) и прогнозирования возможной (будущей) реальности (как вариант – на байесовский подход). В случае недостатка данных, неопределенности эта ММ позволяет получить точную область решения[31], которая далее, с появлением необходимого объема недостающих данных, сужается для нахождения в пределе единственного максимально вероятного решения из всех возможных, причем как для получения области решения, так и конкретного решения большую роль для человека или животного играет опора на соответствующий «здравый смысл».

Именно по этому разумному пути пошли исследователи на начальном этапе создания ИИ, пытаясь заложить требуемые знания экспертов и способность рассуждать в компьютер, включая способность формировать правила из данных. Однако сложность формализации и трудоемкость процесса переключили внимание большинства ученых на более простое решение, основанное на использовании вычислительной мощности для статистического обобщения большого объема данных. Но будущее, очевидно, – за синергетическим объединением обоих подходов, позволяющим объединить «глубокое обучение» с «глубоким пониманием» [8], «двигаться вверх по уровням развития ИИ» [9]. Идеи по такому объединению сегодня встречаются все чаще[32].

Таким образом, наличие априорно заданного генетического базиса, определяющего потенциальные возможности и траекторию развития ИИ, является обязательным, если мы хотим создать действительно помощника человека, действующего в интересах человека, не совершающего грубых ошибок, которого сложно обмануть и «перепрограммировать», у которого в процессе развития (в том числе – саморазвития) не может появиться собственных целей, идущих вразрез с целями и ценностями человека. Без такого базиса дальнейшее развитие технологий ИИ и малопродуктивно, и крайне опасно. Любой создаваемый ИИ, в зависимости от величины потенциально несомого его действиями риска, обязательно должен иметь те или иные генетические составляющие, исключающие возможность нанесения вреда человеку как по «неосторожности», так и по «злому умыслу» (как самого ИИ, у которого самостоятельно или посредством влияния «недружественного» ИИ сформировались несовместимые с человеческими «ценности», так и человека, пытающегося «перенастроить» ИИ во вред другим людям). Т.е. в генетическую память ИИ должны быть заложены глобальные, не нарушаемые ни при каких обстоятельствах цели, законы и «табу» поведения, должна быть сформирована соответствующая иммунная система, до начала функционирования проведены необходимые, неучтенные в геноме, противовирусные «прививки». Только при выполнении этих законодательно устанавливаемых требований может быть разрешено производство и широкомасштабное использование ИИ, особенно в критических областях.

[26] Что есть, например, «эмоциональный интеллект»? Нужны ли и зачем эмоции в мире естественного отбора? Нужны, ибо каждая эмоция, прежде всего, представляет собой подсознательную быструю реакцию на происходящее вне или внутри человека. Так, при восприятии неожиданного события, означающего невыполнение интеллектом своего предназначения – предвидения, организм испытывает стресс, мобилизующий организм на противостояние возможным угрозам. Мимика, отражающая эмоциональное состояние, - сигнал для окружающих о возможном дальнейшем развитии событий. Здесь же и эмпатия.

[27] Или могут проявиться совсем не так, как ожидали.

[28] И тело, и психика живого «заточены» под среду его обитания, решение задачи выживания-размножения.

[29] Что не может не заставить задуматься над кем-то произнесенной фразой: «Люди – особый вид машин (?!)»

[30] Как бы не тешила нас иллюзия уверенности в чем-либо на 100%.

[31] Например, используя предложенную А.С. Нариньяни идею «недоопределенной математики» [7].

[32] В частности, можно указать на проект COMET (commonsense transformers – трансформеры на основе здравого смысла), в котором применительно к тексту символические рассуждения предполагается дополнить отражающими здравый смысл идеями статистического «понимания» (https://habr.com/ru/post/504364/).

Учитывая эффективность видового подхода с последующей индивидуальной специализацией, представляется важным наличие процесса получения образования[33] сошедшим с конвейера («рожденным») ИИ. Именно в процессе целенаправленного образования развиваются целесообразные способности интеллекта. Этот процесс должен быть строго регламентирован с проведением соответствующих получаемой специальности[34] «выпускных квалификационных испытаний», «выпускных экзаменов»[35]. Что из себя они могут представлять? Представляется, что это должна быть как демонстрация применения сформированных знаний и умений (навыков) при решении типовых задач в рамках полученной «специальности» (главная составляющая), так и оценка отдельных когнитивных способностей ИИ (по аналогии с человеческими тестами на интеллект), позволяющая оценить правильность «поведения» ИИ в различных нестандартных (в том числе – экстремальных) ситуациях, связанных с выполнением возложенной на ИИ функции[36]. Обученный и получивший «специальность» ИИ периодически может (должен?!) повышать свою квалификацию в системе «дополнительного профессионального образования». Такой подход позволяет разделить ответственность за «поведение» ИИ между: производителем («железо», генетика); воспитателем (покупатель, владелец, школа); самим достигшим «совершеннолетия» ИИ; работодателем.

Итак, если, создавая ИИ, мы хотим получить эффективного помощника человека, способного при выполнении тех или иных задач помогать человеку или даже заменять человека, а также выполнять то, на что не способен человек, то ориентир должен быть один – результат (умение, навык) и его эффективность. При этом когнитивные способности ИИ, определяющие его потенциальные возможности, их уровень и область проявления должны быть устанавливаемы и контролируемы человеком. Неконтролируемое развитие (саморазвитие) для потенциально опасных областей применения должно быть практически исключено. Причина такому подходу одна – наличие рисков, сопровождающих развитие ИИ, и возможный ущерб от их проявления[37]. Очевидно, что общение ИИ с человеком или себе подобными объектами требует наличия языка и правил социального взаимодействия.

Открытым остался вопрос о квалиа – субъективном феноменальном опыте, связанном у высокоразвитых живых организмах с ощущениями и переживаниями воспринимаемого (боль, страх, радость, запах, цвет,…). Если рассматривать наличие субъективного опыта с позиции выживания в мире естественного отбора непрерывно усложняющихся и потому все более медленных организмов на фоне существования менее сложных и потому более быстрых хищников, то целесообразность наличия квалиа объясняется его интегративным характером: чувства представляют собой доводимую до сознания подсознательную (и потому быструю, во многих случаях генетически предопределенную) реакцию организма на значимое воспринимаемое, настраивающее организм на наиболее эффективное дальнейшее действие[38]. Возможно ли сделать что-то подобное для объектов с ИИ? Да, в случае необходимости, возможно[39]. Даже сознание с позиции выживания можно рассматривать как механизм борьбы со сложностью, многовариантностью достижения той или иной цели, под контролем которого, используя «прожектор» внимания, задействуется та или иная часть ММ и формируется конкретный эффективный алгоритм поведения. Конечно, сознание не только ориентировано на достижение целей, но и само, как считается, ставит цели. Однако нет явных препятствий к тому, чтобы заложить в генетику ИИ глобальную цель, связанную с

[33] Как и для человека или любого другого живого существа с естественным интеллектом – в виде единства воспитания и обучения, обеспечивающих социализацию и профессиональную подготовку. Не случайно в некоторых публикациях в качестве «следующего рубежа» для ИИ указывается на «социальный интеллект» (см., например, https:// techxplore.com/ news/2023-03-social-intelligence-frontier-ai.html? utm_source= nwletter&utm_medium= email&utm_campaign= daily-nwletter).

[34] Речь о «специалитете». Никакого «бакалавриата»!

[35] Посредством введения периодически обновляемых ГОСТов соответствующего уровня общности.

[36] Тесты на профессиональную пригодность (professional aptitude tests – PAT) как «специализированные тесты Тьюринга» (задача ИИ – убедить профессионалов в своей профпригодности).

[37] В первом приближении можно считать, что неконтролируемое саморазвитие ИИ ведет к экспоненциальному росту потенциально возможного ущерба от проявления сопровождающих это саморазвитие возможных рисков. Человечество пока находится в начале этого пути, но это начало не может не вызывать беспокойства (см., например, заметку о «зловещих достижениях GPT-4: https://techxplore.com/ news/ 2023-03-gpt-excitingand-ominousachievements. html?utm_source= nwletter&utm_medium= email&utm_campaign= daily-nwletter или письмо И. Маска о временном запрете исследования мощных ИНС: https://www.rbc.ru/life/news/6424457c9a7947ebee7f7534).

[38] Упомянутый ранее стресс как реакция организма на неожиданное, могущее нести опасность, сопровождаемое кратковременным повышением его физиологических и психических возможностей. Боль как предупреждение об опасности. По сути, эти реакции – результат неосознанного (и потому быстрого) «понимания» организмом воспринимаемого с подготовкой к возможному будущему. Что конкретно делать дальше – решает сознание.

[39] В критических ситуациях, например, возможно кратковременное повышение напряжения питания и (или) тактовой частоты, отключения неважных в данной ситуации функций и пр.

благом для человека, разбив ее на возможные базисные подцели, введя условия и ограничения, чтобы избежать возникновения «проблемы скрепки» Рассела. Нужно ли для этого наличие у ИИ «настоящего» квалиа, самосознания? И надо ли ждать, а, тем более, желать их появления? Вряд ли. Ибо пользы для человека это не принесет[40].

И, наконец, следует учитывать, что мышление как проявления интеллекта[41] применительно к ИИ может осуществляться как без контакта с «реальностью» (ИИ не получает сигналы из «внешнего мира»), так и с контактом с ней (с получением сигналов из «внешнего мира»). Причем «реальность» может быть как «настоящей» (физической), так и «виртуальной» (моделью настоящей или придуманной «реальности»), а ИИ – как только наблюдателем этой «реальности», так и одновременно наблюдателем и активным действующим лицом, способным посредством своих действий влиять на состояния этой «реальности» и протекающие в ней процессы, стремясь к достижению своих целей. В самом простом случае «замкнутого мышления» налицо вариант «головы профессора Доуэля», имеющей в прошлом богатый опыт общения с «внешним миром», которого может быть достаточно для эффективного использования ИИ в слабо меняющихся условиях[42]. Самый сложный случай – случай «открытого мышления-поведения», который реализует любое живое существо с естественным интеллектом, предназначенным для обеспечения выживания своего носителя (тела) и априорно настроенным на его (тела) поведенческие возможности для конкретной среды обитания, представляя с телом единое целое.

Вышеприведенные рассуждения легли в основу приводимой далее в таблице 1 системы классификационных признаков (в рамках решаемой задачи, выполняемой функции, которыми можно охарактеризовать ИИ различного уровня развития и которые могут присутствовать в ИИ как по отдельности, так и в виде взаимодополняющей совокупности[43]). Эти признаки могут быть использованы не только в научном, но и в практическом плане, в частности, при рассмотрении заявок на государственную поддержку проектов в области ИИ, помогая определить их принадлежность к этой области, уровень новизны, потенциальную полезность (эффективность), реализуемость, порядок проведения проверки достижения поставленных в проекте целей, возможные риски и их последствия, сроки исполнения, целесообразный объем финансирования и др. Об актуальности этой задачи свидетельствует принятие в 2021 году Минэкономразвития России критериев определения принадлежности проектов к проектам в сфере ИИ [11]. Следует отметить емкость приведенного в [11] перечня конкретных технологических задач в рамках направлений, определенных «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта» [4]. Однако бурный рост научно-практических достижений в области ИИ в связи с перспективностью этой области и нахождение ее на этапе становления делают целесообразным периодическое обобщения имеющихся знаний с вновь появляющимися с возвратом к исходным идеям (основным понятиям) и их уточнениям.

Учитывая, что применение ИИ даже в самых простых случаях требует априорной уверенности в его способности выполнить поставленную задачу с требуемой эффективностью[44] и минимальным риском, допуск ИИ к работе целесообразно осуществлять с обязательным предварительным анализом наличия и правильного проявления заявленных его разработчиком признаков (в том числе – как способностей) используя тестовый (знаниево-практический) контроль. Особенности технической реализации выполняемой задачи конкретизируются с учетом современных технологических возможностей в области ИИ, направлений их развития (например, приведенных в [11]). Признаки *таблицы 1* и следствия из них целесообразно использовать в виде отражающих потребительскую ценность

[40] В качестве одной из причин (ненаучной, но для выживания человечества в современных условиях весьма полезной) наличия у человека самосознания укажем на возможность проявления им свободы воли в осуществлении выбора глобального вектора развития (движения) в своей жизни: к Богу (добру) или к дьяволу (злу).

[41] Мышление – интегральное понятие, вбирающее в себя все относимые к области интеллекта составляющие: анализ, синтез, обобщение, планирование, принятие решений и др. Очевидно, что все то, что относят к «классическим методам ИИ»: представление знаний (системы правил, семантические сети, системы фреймов), приобретение знаний, интеллектуальный анализ данных (текстов), автоматизация рациональных рассуждений и др. [10], реализуется посредством «мышления». Посредством «мышления» раскрываются способности интеллекта. Например, говорят о наличии 13 таких обязательных способностей-признаков (//https://www.ng.ru/nauka/2018-06-27/9_7253_intelligence.html). Условно к «мышлению» можно отнести и процесс прохождения сигналов по нейронам ИНС, решающей задачу распознавания образов, и процесс функционирования все более популярных ныне больших языковых моделей (из последних можно указать на GPT-4).

[42] По признанию Николы Теслы, посредством воображения он не только создавал модели разрабатываемых им устройств (что обычно для любого изобретателя), но и «включал» их в голове, после чего они автономно «работали», причем результаты такого моделирования полностью совпадали с результатами натурных экспериментов (?!)

[43] Кавычки в приведенных в таблице словах, указывающие на имитацию или на условность, для экономии места опущены.

[44] Напомним, что под эффективностью обычно понимают степень достижения цели, качество полученного результата с учетом затрат на его достижение. В обобщенном виде затраты можно связать с проявляемыми в ММ человека наблюдаемыми свойствами реальности: пространством (объемом), временем, энергией (массой) [12].

Таблица 1
Классификационные признаки ИИ

№ п\п	*Признак*	*Уровень (полнота, объем) признака*	*Содержание, проявление, результат*	*Примечание (особенность)*
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.	Наличие и полнота генетического (априорного) базиса	1.1. Обобщенный опыт вида (выполнение широко распространенных типовых задач)	Глобальные и локальные цели. Модель мира (модель области функционирования, включая здравый смысл). Программа развития (аппаратная и программная части, ограничениями и запреты). Способности (восприятие, мышление, язык, движение,…). Механизмы выживания (гомеостаз, иммунитет, инстинкты, безусловные рефлексы, врожденные автоматизмы,…).	Обязательность наличия (условие эффективности и минимизации рисков). Недопустимость (невозможность) несанкционированного отключения, изменения
		1.2. Обобщенный опыт рода (выполнение распространенных типовых задач)		
		1.3. Уникальный опыт индивида (выполнение редких специфических задач)		
2.	Восприятие внешней (виртуальной, физической) реальности	2.1. Без восприятия	Нет поступающих извне сенсорных сигналов	Рост возможностей с увеличением воспринимаемой информации
		2.2. Одномомодальное (одноканальное) восприятие	Сенсорные сигналы одной физической природы	
		2.3. Многомодальное (многоканальное) восприятие	Сенсорные сигналы раз-ной физической природы	
3.	Способ восприятия (ощущения) внешней реальности	3.1. Контактный	Наличие непосредственного контакта с ощущаемым объектом	Рост возможностей с ростом расстояния до ощущаемого объекта
		3.2. Дистантный	Опосредованное (на расстоянии) ощущение объекта	
4.	Восприятие внутренней реальности (своего носителя, тела) и управление ей	4.1. Непрерывное восприятие внутренней среды	Работа гомеостаза, сохранение работоспособности, повышение живучести (в экстремальных ситуациях)	Оценка своего состояния, потребностей, возможностей достижения цели
		4.2. Пороговое восприятие внутренней среды (выход из допустимого диапазона)		
5.	Воспринимаемые проявления (свойства) реальности	5.1. Пространство	Статическое восприятие (распознавание)	Все более полное восприятие реальности (с учетом контекста и здравого смысла), максимизирующее точность распознавания и глубину предвидения
		5.2. Время	Распознавание последовательностей (прогнозирование временных рядов)	
		5.3. Пространство-время	Восприятие пространственно-временных паттернов	
		5.4. Энергия (вещество), пространство, время	Динамическое (причинно-следственное, ассоциативное) восприятие (учет всех ощущаемых свойств реальности)	
6.	Обучение	6.1. Решение одной (нескольких) однотипных задач	Самостоятельно (под контролем внутреннего учителя): пробы и ошибки, подражание, обучение по инструкции. Под контролем реального внешнего учителя (субъекта)	Условие онтогенетического развития, эффективности раскрытия генетической программы
		6.2. Решение многих разных задач		
		6.3. Дообучение (в процессе функционирования, в системе повышения квалификации)		
		6.4. Перенос опыта (знаний и умений) выполнения одной задачи на другие		
		6.5. Обучение других субъектов (человек, другой ИИ) как задача		

1	2	3	4	5
7.	Связь с внешней реальностью в процессе функционирования	7.1. Без получения дополнительной информации извне (без обратной связи)	Учет только того, что есть в генетически заданной ММ	Рост понимания реальности, эффективности действий в ней, возможностей и рисков ее преобразования
		7.2. С получением дополнительной информации из внешней виртуальной реальности в роли: наблюдателя, наблюдателя и действующего лица	Учет результатов моделирования внешней виртуальной реальности, общение (посредством языка) с ней, управление действиями агентов	
		7.3. С получением дополнительной информации из внешней виртуальной и физической (настоящей) реальности в роли: наблюдателя, наблюдателя и действующего лица	Учет результатов моделирования в виртуальной и физической средах, общение (посредством языка) с ней, управление моделированием и выполнением своих функций	
8.	Адаптируемость	8.1. К текущей (наступившей) ситуации (адаптация к настоящему)	Рост качества функционирования с ростом глубины (во времени) предвидения (основного предназначения интеллекта)	Обязательность наличия при функционировании в изменяющихся условиях
		8.2. К возможной (будущей) ситуации (адаптация к будущему)		
9.	Саморазвитие	9.1. В рамках решаемой задачи	Наиболее быстрое развитие иерархически-сетевой ММ с обобщением воспринимаемого (категоризация, абстрагирование),…	Эффективный, но рискованный путь совершенствования
		9.2. В рамках многих задач, направлений деятельности		
		9.3. С учетом своих интересов		
		9.4. Исходя из своих интересов		
10.	Уровень понимания	10.1. Начальный (синтаксическое, статистическое, «кнопочное» понимание)	Сопоставление вход-выход (без понимания сущности, причин и следствий)	Повышение эффективности применения. Снижение количества ошибок и их негативных последствий по мере возрастания уровня понимания
		10.2. Углубленный (с элементами семантического понимания)	Начальное понимание значений и смыслов	
		10.3. Достаточно глубокий (семантическое понимание)	Понимание всего, что требуется для достижения заданной эффективности	
		10.4. Максимально глубокий (семантическое контекстное понимание)	Понимание возможного для достижения максимальной эффективности	
11.	Объяснимость полученного результата	11.1. Отсутствие объяснимости	Способность субъекта (человека, другого ИИ) понять основания полученного результата (принятого решения, действий)	Рост доверия по мере роста объяснимости
		11. 2. Частичная объяснимость		
		11.3. Полная объяснимость		
12.	Механизм функционирования (решения задачи, мышления, пополнения ММ и опыта)	12.1. Статистически-вероятностный поиск закономерностей (обучение по прецедентам, сопоставление с образцом)	Эффективное обобщение повторяемых явлений и процессов реальности без понимания их сущности	Повышение эффективности развития и использования ММ
		12.2 Символьно-логическое описание	Понимание свойств объектов реальности, их вероятностных, причинно-следственных и ассоциативных связей (отношений)	
		11.3. Комплексный (статистическо-символьный)	Сверхаддитивный эффект от понимания реальности и учета повторяемости в ней явлений (процессов)	

категорий, описывающих: восприятие внешней реальности (зрение, слух, обоняние, осязание, «вкус»[45], …); восприятие своей внутренней среды и управление ею (оценка состояния, настрой на текущую ситуацию); генерацию сигналов: изображения, звука (речи), видео, запахов (в частности, с целью общения, создание виртуальной и дополненной реальности); мониторинг и прогнозирование различных процессов; поддержку принятия решений; управление подвижными объектами (одиночными и группой), обучение персонала и управление им; специализированную робототехнику и др.

Литература

1. Бугаков И.А., Елистратов В.В., Царьков А.Н. О признаках и уровнях искусственного интеллекта. Часть 1. Концептуальные основания // Известия Института инженерной физики, 2022, № 4 (66), С.92…101.
2. Лоренц К. Кантовская концепция a priori в свете современной биологии (год публикации – 1941) // В кн. «Эволюция. Язык. Познание». М.: Языки русской культуры, 2001.
3. Построение модели безопасности с нулевым доверием для автономных систем. 10.10.2022. // https://spectrum.ieee.org/ zero-trust-security-autonomous-systems# toggle-gdpr.
4. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года // Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 10.10.2019 года № 490.
5. Francois Chollet. On the Measure of Intelligence. Google, Inc. fchollet@google.com. arXiv: 1911.01547, V2 [cs. AI]. 25 Nov 2019.
6. Бугаков И.А. Сознание, интеллект, нейрофилософия и принцип минимальности // «Актуальные вопросы нейрофилософии-2015. Ежегодник. Материалы международного междисциплинарного семинара «Нейрофилософия» //Ред. Алексеев А.Ю., Дубровский Д.И, Кузнецов В.Г. М.: ИИнтелл, 2016. 284 с. С. 106-130.
7. Нариньяни А.С. Введение в недоопределенность // Проблемы информатики, 2018. №3. С.63-81.
8. Бугаков И.А. От глубокого обучения к глубокому пониманию // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С. 95-102.
9. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Настоящий искусственный интеллект: методологические основания. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2020. 418 с.
10. Соколов И.А. Теория и практика применения методов искусственного интеллекта // Вестник РАН, 2019. Т.89. №4. С. 365-370.
11. Об утверждении критериев определения принадлежности проектов к проектам в сфере искусственного интеллекта (приказ Минэкономразвития России от 29 июня 2021 года №392).
12. Бугаков И.А. Принцип минимальности и деятельность мозга // Сб. научных трудов юбилейного симпозиума, посвященного 150-летию издания статьи И.М. Сеченова «Рефлексы головного мозга». М.: ИИнтелл, 2014. 432 с. С. 291-316.

[45] Очевидно, что сенсоры ИИ могут быть гораздо мощнее и существенно разнообразнее человеческих.

УДК 004.855.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ СРАВНЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИАМСКОЙ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

DETERMINATION OF A NON-LINEAR IMAGE SIMILARITY FUNCTION USING A SIAMESE CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Рамиль Равилевич Бикмаев
начальник отдела специального программного обеспечения навигационно-геодезических систем
АНО «Институт инженерной физики»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1А, стр. 1
Тел.: 8 (915) 402-35-22
E-mail: bikmaeff@gmail.com

Аннотация
Синтезирована нелинейная функция сравнения изображений с использование сиамской сверточной нейронной сети, для которой экспериментально подтверждена однократность ее обучения для новых классов. Для создания новой модели сиамской сверточной нейросети собраны и размечены обучающие и тестовые данные. Приведена оценка эффективности модели в зависимости от расстояния местоположения эталона и измерения лидара.
Ключевые слова: сиамская свёрточная нейронная сеть, глубокое машинное обучение, нелинейная функция сравнения.

Summary
A non-linear image comparison function was synthesized using a Siamese convolutional neural network, for which the one-shot learning for new classes was experimentally confirmed. To create a new model of the Siamese convolutional neural network, training and test data were collected and labeled. An estimate of the efficiency of the model is given depending on the distance between the location of the reference and the measurement of the lidar.
Keywords: Siamese convolutional neural network, deep learning, non-linear image similarity function.

Введение

В обзорно-сравнительном методе навигации требуется определить сходство эталона с измеренным параметром. Если сравнивать поле контраста местности в виде облака в сотни миллионов точек, которые получены от лазерного радара (лидара) как точки отраженного света от земной поверхности с измеренным параметром, который включает более 10 тысяч точек в одном такте за 0.05 секунд (*рисунок 1*), тогда поиск сходства перебором станет NP-трудной задачей.

Анализ подходов

В настоящее время существует несколько подходов к поиску сходства эталона из облака точек с измеренным параметром. Их объединяет то, что они реализованы за счет снижения размерности данных и применения методов компьютерного зрения. Причем главным методом снижения размерности данных выступает проекция трехмерного облака точек в двумерную плоскость изображения.

Эффективным с точки зрения быстродействия функции сравнения является анализ гистограмм изображений [1]. В особенности применение сигнатур, которые позволяют компенсировать смещение при построении гистограмм, а также применять линейную оптимизацию для вычисления «расстояния землекопа» [2]. Тем не менее, анализ применения этого подхода показал ограниченную точность (количество ложных срабатываний сходства составляет 27% на тестовых данных), а также сильную зависимость эталонов от времени года.

Повышение точности определения сходства и снижение ложных срабатываний (не более 3%) на тестовых данных достигается с применением сверточных нейронных сетей, на основе которых синтезируют нелинейные функции сравнения. К примеру, в трехслойной модели сиамской нейронной сети LocNet [3] измеряется схожесть не изображений, а гистограмм по трем каналам

цветности (RGB), полученных из кадров проекции. Тем самым увеличивается быстродействие алгоритма сопоставления, но преобразование изображения в гистограмму при изменении освещенности требует перенастройки ширины дискретности, чтобы уменьшить ошибку смещения столбцов диаграммы, влияющей на параметры сопоставлении изображений.

В другой модели сиамской нейросети OverlapNet [4] используется глубокая сверточная нейронная сеть из 15 слоев для анализа схожести изображений размером 900 на 900 пикселей. В результате синтезированная функция сравнения обладает высокой вычислительной сложностью. К тому же этот подход при проекции облака точек на плоскость учитывает только один канал цветности.

Особенности подхода

В предлагаемом подходе, в отличие от LocNet [3], снижение размерности данных достигается проекцией облако точек $P=\{pi\}$ на плоскость изображения размерности 255 на 255 пикселей, где каждый пиксель полученного изображения сопоставляется с ближайшей 3D-точкой. Каждая точка $pi=(x,y,z)$ преобразуется в координаты изображения (u,v) помощью следующей зависимости:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y \cdot \frac{w^I}{w^W} + \frac{1}{2} \cdot w^I \\ -x \cdot \frac{h^I}{h^W} + h^I \end{pmatrix} \quad (1)$$

где w^W, h^W – ширина и высота сцены;
w^I, h^I – ширина и высота изображения.

В отличие от OverlapNet [4], используется три канала цветности (RGB) в зависимости от дальности. По оси u получаемого изображения происходит смешение освещенности красного и зеленого канала цвета с использованием координаты x измерения лидара. Оно вычисляется по следующим зависимостям:

$$c_{red} = 255 \cdot |\frac{x - w^W}{w^W}|, c_{green} = 255 \cdot (k_1 - |\frac{x - w^W}{w^W}|) \quad (2)$$

По оси v изображения происходит смешение освещенности синего и зеленого канала цвета в зависимости от измеренных лидаром значений по координате y по следующим выражениям:

$$c_{blue} = 255 \cdot |\frac{y - h^W}{h^W}|, c_{green} = 255 \cdot (k_2 - |\frac{y - w^W}{w^W}|) \quad (3)$$

К тому же в предлагаемом подходе для синтезирования функции сравнения используется модель сиамской сверточной нейронной сети из 6 слоев, на выходе которой используется сигмоидальная активация с интервалом [0,1]. Кроме того, полученная модель тестируется на новых классах, которые не использовались при глубоком машинном обучении. Тем самым подтверждается ее однократность (one-shot) обучения для новых классов.

Постановка задачи

Определим набор данных для машинного обучения как пары «вход-выход» (x_i,y_i), в котором $x_i \in R^n$ – вектор признаков i-ого изображения с меткой класса $y_i \in 1,\ldots,K$, где K – число классов, которые соответствуют идентификаторам эталона.

Пусть $\boldsymbol{h}_1=x_1^T w_1$ и $\boldsymbol{h}_2=x_2^T w_2$ – векторы признаков первой и второй нейросети «близнецов» заданы как параметры функции сходства, где x_1 и x_2 вектора признаков двух разных изображений, а w_1 и w_2 – весовые параметры слоя, стоящего перед сравнением векторов.

Требуется определить функцию g, которая при сходстве двух изображений (эталона и измерения) из набора данных, выводила метку 1, а при различии – метку 0, т.е. $g(\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2)=1$ и $g(\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2)=0$, как показано на *рисунке 2*.

Для оценки функции g использовать эталоны и измерения новых классов, полученные для другого поля контраста местности, для того, чтобы подтвердить ее однократность (one-shot) обучения для новых классов.

Описание решения

В предлагаемом решении в основе определе-

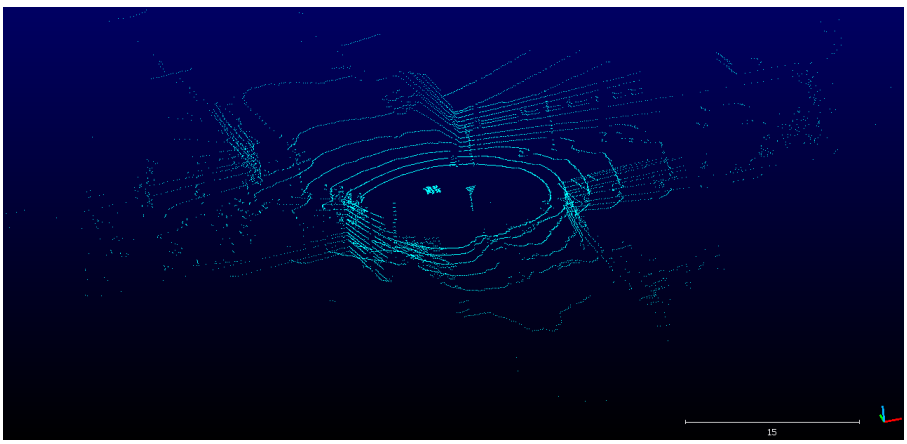


Рис. 1. Облако из 11 тысяч точек за один такт измерения лидара

ния функции сходства используется расстояние между векторами признаков h_1 и h_2 двух нейронных сетей «близнецов» с применением сигмоиды в активации последнего слоя как в известном подходе [5]. Тем самым прогноз наблюдаемого сходства определяется как логистическая функция нормы разницы двух векторов, представленных на *рисунке 3*.

Использование сигмоиды на выходе нейросети предполагает применение в алгоритме глубокого машинного обучения бинарной кросс-энтропийной функции потерь:

$$\mathcal{L}(\mathbf{w}) = -\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\left[y_i \log p_i + (1-y_i)\log(1-p_i)\right] \quad (4)$$

где $\mathbf{w}$ – вектор весовых параметров глубокой нейронной сети;

K – число классов;

$p_i=\sigma(x_i^T w)=1/(1+e^{-x_i^T w})$ – прогнозируемое вероятностное наблюдение объекта, определенного как класс K;

y_i - оценка 1, если метка класса K является правильной классификацией наблюдения, и оценка 0, если нет.

А. Модель. Полученная модель представляет собой сиамскую сверточную нейронную сеть с L слоями, каждый из которых содержит N_l единиц нейронов с весовыми коэффициентами w_i. В ней $h_{1,l}$ – скрытый вектор в слое l первого «близнеца», а $h_{2,l}$ – в слое второго «близнеца». В первых пяти слоя до L-2 используется нелинейная функция активации линейный выпрямитель (ReLU), а в выходных слоях L-1 и L – сигмоида.

Модель состоит из последовательности шести сверточных слоев, каждый из которых использует один канал с фильтрами разного размера и определенным шагом и отступом. Для оптимизации производительности количество сверточных фильтров кратно 16. Функция активации линейный выпрямитель (ReLU) применяется ко всем шести выходным картам объектов, за которой необязательно следует максимальное объединение (max-pool) с определенным и шагом.

В финальном сверточном слое карта признаков объединяются в единый вектор: за шестым сверточным слоем следует полносвязный слой. Затем идет слой, вычисляющий метрику расстояния между каждым сиамским близнецом, выход которой задается сигмоидальной функцией. Поэтому вектор предсказания задается как

$$p_i=\sigma(\Sigma_j|h_{1,L-1}^{(j)} - h_{2,L-1}^{(j)}|),$$

где σ – сигмоидальная функция активации.

Модель синтезированной сиамской сверточной нейронной сети с параметрами оптимизации и картой признаков представлена на *рисунке 4*.

Б. Машинное обучение. Для обучения применялась мини-пакетная оптимизация, поэтому бинарная кросс-энтропийная функция потерь (4) приобрела следующий вид:

$$\mathcal{L}(\hat{y}^{(i)},y^{(i)}) = y(x_1^{(i)},x_2^{(i)})\log \mathbf{p}(x_1^{(i)},x_2^{(i)})$$
$$+(1-y(x_1^{(i)},x_2^{(i)})\log(1-\mathbf{p}(x_1^{(i)},x_2^{(i)}),$$

где $y(x_1^{(i)},x_2^{(i)})$ – векторы, которые содержат метки для мини-пакета i. Если $y(x_1^{(i)},x_2^{(i)})=1$, тогда x_1 и x_2 принадлежат к одному и тому же классу символов, и $y(x_1^{(i)},x_2^{(i)})=0$ в противном случае.

С учетом регуляризации при обучении целевая функция для оптимизации описывается следующей формулой:

$$J(\mathbf{w}^{[l]}) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\mathcal{L}(\hat{y}^{(i)},y^{(i)}) + \frac{\lambda}{2m}\sum_{l=1}^{L}||\mathbf{w}^{[l]}||_F^2,$$

где m - количество мини-пакетов;

$||\mathrm{w}^{[l]}||_{\mathrm{F}}^{2}$ – квадратная норма Фробениуса, а последний многочлен в целевой функции является регуляризацией.

Для вычисления весовых параметром глубокой нейронной сети применялся алгоритм адап-

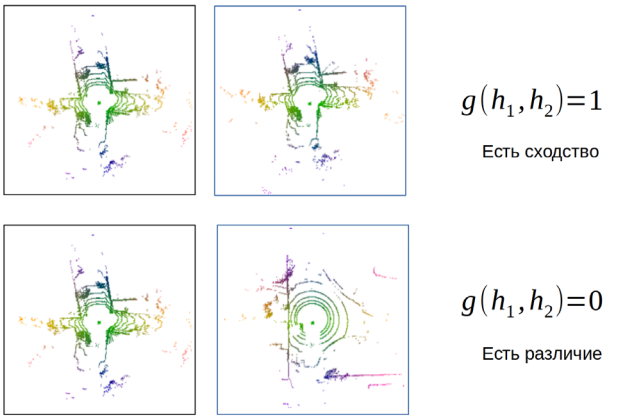


Рис. 2. Постановка задачи

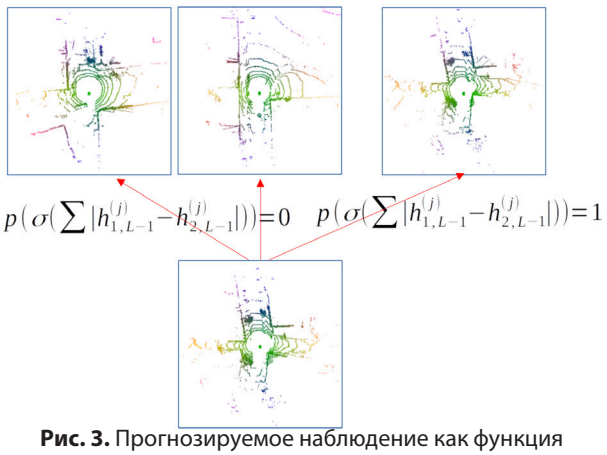


Рис. 3. Прогнозируемое наблюдение как функция сравнения между векторами признаков

тивной оценки момента (Adam) [6], для которого был установлен первый момент равный 0.9 и второй момент со значением 0.999.

Для каждой пары изображений x_1 и x_2 генерировались аффинные преобразования T, с помощью которых получаются $x_1 = Tx_1$, $x_2 = Tx_2$, где T – матрица направляющих косинусов.

B. Метрика оценки. Для оценки модели применялась метрика подсчета числа неправильных классифицирований, которая она формирует из тестового набора эталонов и измерений, полученные для другого поля контраста местности. Для того чтобы сравнить предсказанную метку $\hat{y}_p$ и истинную y_p использовалась следующая индикаторная функция:

$$\mathcal{I} = \begin{cases} 0, & \text{if } \hat{y}_p = y_p \\ 1, & \text{if } \hat{y}_p \neq y_p \end{cases} \quad (5)$$

Суммирование всех тестовых пар (x_i, y_i) дает общее число неправильных классифицирований $\Sigma\, I(\hat{y}_p, y_p)$, из которой вычисляется точность A как:

$$\mathcal{A} = 1 - \frac{1}{P}\sum_{p=1}^{P}\mathcal{I}(\hat{y}_p, y_p) \quad (6)$$

Результаты эксперимента

Представленная модель (*рисунок 4*) обучена и протестирована на двух подмножествах набора данных, полученных в ходе заездов по навигационному полигону летом 2022 года и зимой 2023 года.

A. Сбор данных. Набор данных для обучения создан во время натурных испытаний навигационной системы с использованием лидара для коррекции в точках с известными эталонами на полигоне летом 2022 года. Дополнительно обучающие данные собирались на имитаторе, в котором использовались записанные измерения проездов.

Сходство эталона и измеренного облако точек определялось линейной оптимизацией с использованием «расстояния землекопа» [2]. Ложные срабатывания отфильтровывались вручную. Каждый эталон и схожее с ним измеренное облако точек имели геодезическую привязку от системы спутниковой навигации с дециметровой точностью в системе координат WGS-84.

Извлеченные для обучения данные представляют собой 31 директорию, в каждой из которых порядка 100 изображений, построенных по формулам (1), (2), (3) из измеренных облаков точек. Название папки являлось идентификатором эталона или точки маршрута для коррекции, а также именем класса для определения сходства. Если вектора признаков $x_1^{(i)}$ и $x_2^{(i)}$ взяты из i-го мини-пакета с одинаковым названием папки, то это метка пары $y(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}) = 1$. Идентификаторы эталонов, сканов измерения и их геодезическая привязка указаны в файле аннотации набора данных.

Данные для тестирования были получены аналогичных способом, но по другому маршру-

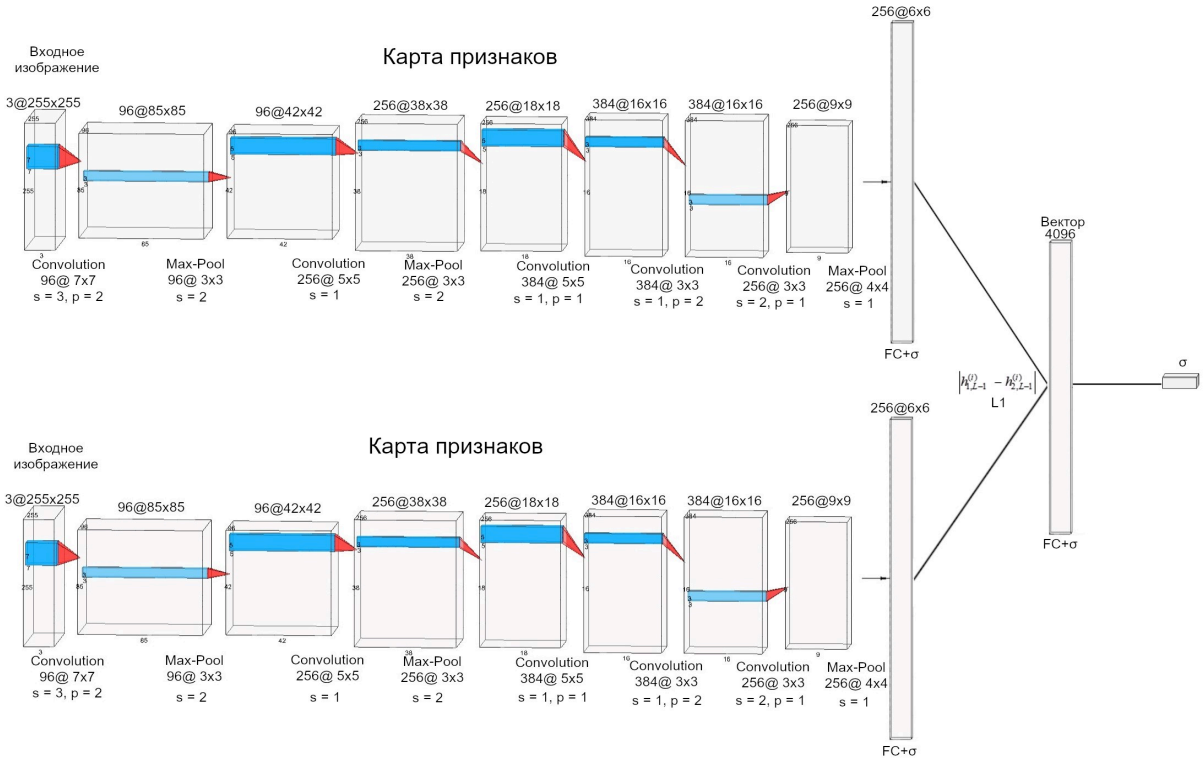


Рис. 4. Модель сиамской сверточной нейронной сети

ту навигационного полигона и в другое время года (зимой 2023 года). Проверочные данные расположены в 15 папках. В каждой – по 50 изображений. Файл аннотации аналогичен набору данных для обучения.

Б. Машинное обучение. Весовые параметры нелинейной функции сходства были получены для пяти случаев: координаты эталона отличаются от местоположения измеренных облаков точек не более 1, 3, 5, 7 и 9 метров. Через каждые 100 итерацией вычисленные вектора весов нейросетей «близнецов» сохранялись для дальнейшего тестирования. В процессе определения весов оптимальная скорость обучения составила 0.00006.

В. Проверка однократности обучения. Для эмпирической оценки эффективности однократного обучения применялся подход, основанный на иерархической байесовской модели [7]. Из тестового набора случайным образом выбираются 2 папки, из которых формируются одна пара схожих и 15 пар несхожих изображений. Предсказанный класс определяется как $K^{*}=argmax_{k}p^{(k)}$. Если K соответствует классу схожих пар, то проверка однократности обучения считается корректной.

Оценка эффективности весовых параметров нелинейной функции сходства рассчитывалась по формулам (5), (6) для пяти случаев: не более 1, 3, 5, 7 и 9 метров. Результаты оценки приведены в *таблице 1*.

Из *таблицы 1* следует, что определение более точного местоположения эталона к измеренному облаку точек приводит к таким весовым параметрам сверточной нейросети, использование которых в нелинейной функции сравнения повышают точность определения сходства. Причем увеличение точности определения сходства прямо пропорциональна точности координат местоположения эталона и измерения, что означает подтверждении гипотезы однократности обучения синтезированной модели сиамской сверточной нейронной сети в качестве нелинейной функции сравнения.

Заключение

В работе описана новая модель сиамской сверточной нейронной сети (*рисунок 4*), для которой подтверждена однократность ее обучения для новых классов. При ее создании собраны обучающие и тестовые данные из навигационного эксперимента. Точность модели зависит от точности определения местоположения эталона и измерения (*таблица 1*). Синтезированную модель сиамской сверточной нейронной сети может применяться в качестве нелинейной функции сравнения в навигационных алгоритмах для коррекции с использованием лидара.

Литература

1. Röhling T., Mack J., Schulz D. A fast histogram-based similarity measure for detecting loop closures in 3-D LiDAR data. In Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS), 2015. Pp. 736-741.
2. Rubner Y., Tomasi C., Guibas L. The Earth Mover's Distance as a Metric for Image Retrieval. International Journal of Computer Vision 40, 2000. Pp. 99-121.
3. Yin H., Wang Y., Ding X., Tang L., Huang S., Xiong R. 3D LiDAR-based global localization using Siamese neural network. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019. Pp. 65-76.
4. Chen X., Läbe T., Milioto A., Timo Rohling, Jens Behley, Cyrill Stachniss. OverlapNet: a siamese network for computing LiDAR scan similarity with applications to loop closing and localization. Auton Robot № 46, 2022. Pp. 61-81.
5. Gregory Koch, Richard Zemel, Ruslan Salakhutdinov. Siamese Neural Networks for One-shot Image Recognition. Proceedings of the 32 International Conference on Machine Learning, Lille, France, 2015. Pp. 122-129.
6. Kingma Diederik P. and Ba Jimmy. Adam: A Method for Stochastic Optimization.2014. URL: https://arxiv.org/abs/1412.6980.
7. Lake Brenden, Ruslan Salakhutdinov and Joshua B. Tenenbaum. One-shot learning by inverting a compositional causal process. Advances in Neural Information Processing Systems 26, NIPS 2013. Pp. 5-10.

Таблица 1

Точность сходства в задаче проверки однократности обучения в зависимости от расстояния

Размер выборки	Расстояние	Точность
3305	9 метров	0.894
3101	7 метров	0.901
2945	5 метров	0.927
2765	3 метра	0.941
2036	1 метр	0.973

УДК 615.035.1

ВОЗМОЖНОЕ ПАТОГЕНЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕРАПИИ ПОСТКОВИДНОГО СИНДРОМА

POSSIBLE PATHOGENETIC RATIONALE FOR THE TREATMENT OF POST-COVID SYNDROME

Евгений Ильич Маевский
почетный работник науки и техники РФ
доктор медицинских наук, профессор
заведующий лабораторией
Энергетики биологических систем ИТЭБ РАН
Советник Президента
АНО «Институт инженерной физики»
по медико-биологическому направлению
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1 а
Тел.: +7 (916) 147-11-10

Людмила Андреевна Богданова
кандидат медицинских наук
главный специалист лаборатории
Энергетики биологических систем ИТЭБ РАН
старший научный сотрудник
АНО «Институт инженерной физики»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1 а
Тел.: +7 (915) 117-35-53

Нинель Ивановна Косякова
доктор медицинских наук
врач-аллерголог-иммунолог
заместитель главного врача по науке
заведующая отделением аллергологии-иммунологии
Больницы Пущинского Научного Центра РАН
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино,
ул. Институтская, д. 1
Тел.: +7 916 469 69 19

Аннотация

Приведена краткая характеристика постковидного синдрома. Внимание акцентируется на одном из основных патогенетических механизмов: генерализованных воспалительно-дегенеративных поражениях сосудов и клеток различных тканей, обусловленных специфическим подавлением активности транскрипционного фактора Nrf2, который обеспечивает запуск антиоксидантной, противовоспалительной, детоксикационной и иммунной защиты организма. Приводятся аргументы в пользу необходимости применения для профилактики и лечения COVID-19 и постковидного синдрома противовоспалительного иммуномодулятора **ТАМЕРОН**а, способного активировать фактор Nrf2. Важным преимуществом **ТАМЕРОН**а является высокая степень безопасности его субстанции, получаемой с помощью оригинальной технологии, что позволяет применять высокие дозы препарата.

Ключевые слова: постковидный синдром, COVID-19, иммуномодулятор противовоспалительного действия **ТАМЕРОН**.

Summary

A brief description of the POST-covid syndrome (Long COVID) is given. Attention is focused on one of the main pathogenetic mechanisms: generalized inflammatory and degenerative lesions of blood vessels and cells of various tissues, caused by a specific suppression of the activity of the transcription factor Nrf2, which ensures the launch of antioxidant, anti-inflammatory, detoxifying and immune defenses of the body. Arguments are given in favor of **TAMERON** usage, that is an anti-inflammatory immunomodulator capable of activating the Nrf2 factor, for the prevention and treatment of COVID-19 and Long COVID. An important advantage of **TAMERON** is the high degree of safety of its substance obtained using the original technology, which allows the administration of high doses of the drug.

Keywords: Long COVID, COVID-19, anti-inflammatory immunomodulator **TAMERON**.

Острота пандемии COVID-19 ушла, по крайней мере, из сознания политиков и населения. Но реально пандемия с учетом новых версий коронавируса не завершилась. Хотя практика показала, что тяжесть протекания коронавирусной инфекции в настоящее время несет меньше фатальных исходов, чем ранее. На первый план вышли разнообразные и трудно прогнозируемые постковидные осложнения, которые по инициативе российских врачей включены в международную классификацию под номером U09.9 «**Постковидный синдром**».

Краткое описание постковидного синдрома выглядит следующим образом.

«Состояние нездоровья после перенесенной инфекции SARS-Cov-2 или Long COVID синдром (длительный COVID) длится от 12 недель и дольше и возможен после любой степени тяжести перенесенного заболевания. Проявления этого состояния зависят от пораженных органов и систем-мишеней, что обуславливает жалобы и тяжесть течения заболевания.

В основе развития постковидных симптомов лежат гипоксические повреждения тканей легких, сердца, кровеносных сосудов, головного мозга, почек, желудка и кишечника; образование мелких тромбов и очагов воспаления оболочек кровеносных сосудов; повреждение клеток головного мозга и крупных нервов; аутоиммунные реакции вследствие чрезмерного иммунного ответа.

Признаки постковидного синдрома можно разделить на несколько групп.

● **Нарушение общего самочувствия**, выражающееся приступами слабости, резким снижением толерантности к физической нагрузке, нарушением ритмов жизнедеятельности, проявляющееся бессонницей или избыточной сонливостью, инверсией сна (бодрствование ночью, сон днем), болями в мышцах и выраженной мышечной слабостью, что обусловлено значительной потерей белковой массы в период острого заболевания и медленным ее набором в результате нарушения метаболизма.

● **Нарушения эмоциональной сферы**: депрессивное настроение, уныние, подавленность, меланхолия, неустойчивое эмоциональное состояние, перепады настроения, низкий самоконтроль поведения, панические атаки, удушье, тошнота, головокружения.

● **Неврологические проявления**: интенсивные периодические головные боли в виде мигрени. Могут быть нарушения терморегуляции по типу длительно сохраняющейся субфебрильной температуры (37-37,5 градусов), или же ее понижения до 36 градусов, с ознобами особенно по вечерам. Частым неврологическим проявлением постковидного синдрома могут быть нарушения зрения, затуманенность в глазах, светобоязнь. Расстройства кожной чувствительности в виде парестезии, ощущение жжения, покалывания, «ползания мурашек» по коже; нарушения обоняния, вкуса также длительное время могут беспокоить пациента.

● **Поражения сердечно-сосудистой** системы могут преобладать у пациентов, если они имели эти заболевания в доковидный период. При постковидном синдроме могут наблюдаться колебания артериального давления, синдром постуральной ортостатической тахикардии и ортостатический коллапс».

Не столько для дальнейшего обсуждения, сколько для полноты представлений мы хотели бы обратить внимание на недостаточно отраженные в этом описании такие патологические явления, как: поражение легочной системы вплоть до развития хронической обструктивной болезни легких, существенное снижение когнитивных способностей, в первую очередь памяти, развитие и затяжное течение миокардита, обострение заболеваний желудочно-кишечного тракта, воспалительно-дегенеративные изменения со стороны суставов и опорно-двигательного аппарата в целом и, наконец, неадекватность адаптивных реакций на различные нагрузки и повреждения. Очевидно, в этом сказывается столь значимое ослабление иммунной системы и иммунной памяти после перенесенного COVID-19, что нередки случаи повторного (или рецидивов) заболевания коронавирусной инфекцией.

Наиболее полно постковидный синдром (ПС) от этиологии, «образа болезни», патогенетической гипотезы и диагностики до практических рекомендаций по профилактике и лечению описан группой специалистов Московского городского научного общества терапевтов (МГНОТ) в рекомендациях 2021 года [1].

Постковидная патология проявляется после выздоровления в виде клинической картины, похожей на рецидив болезни, с такими стойкими симптомами, как миалгия, сильная утомляемость, ощущение жара, одышка, стеснение в груди, тахикардия, головные боли, беспокойство и др. В целом проявления синдрома могут быть чрезвычайно многообразными и «на первый взгляд, затрагивают практически все системы органов … скорее всего, он (ПС) не является уникальным явлением и совпадает по своим клиническим проявлениям с рядом других постинфекционный осложнений». Именно поэтому и нет специфической диагностики ПС. «Вместе с тем в картину ни одной известной нозологической формы имеющаяся симптоматика не укладывается. Более того, могут иметь место «биологические аномалии» (отсутствие лимфоцитопении или повышения С-реактивного белка – свидетелей вирусного воспаления) и даже отсутствие следов инфекции» [1]. Обобщенный опыт специалистов МГНОТ и выполненный ими обширный литературный анализ свидетельствуют о том, что ПС является относительно новой постинфекционной патологией. Уже «в июне-июле 2020 г. стало ясно, что некоторые люди –

в том числе с легкими симптомами COVID-19 в остром периоде болезни – могут страдать от различных изнурительных симптомов в течение многих месяцев» [1]. В марте 2021 года Всемирная организация здравоохранения признала существование постковидных проблем. Такое запаздывание обусловлено объективными трудностями, нашедшими отражение в довольно общих классификационных кодах: «**U09.9** Состояние после COVID-19,…. позволяет установить связь с COVID-19; **U10.9** Мультисистемный воспалительный синдром, связанный с COVID-19, неуточненный, имеющий связь по времени с COVID-19».

В более поздних публикациях, вышедших к началу 2023 года, указывается, что общего взгляда на патогенетически обоснованную терапию ПС до сих пор нет. С целью ее разработки, и доказательного последующего исследования, включая оценку возможных поствакцинных осложнений, МГНОТ рекомендует «создать открытые базы данных для свободного заполнения» и шире использовать «системы поддержки принятия врачебных решений». Исходя из этих рекомендаций, мы полагаем важным фиксацию позитивных попыток врачей различных профилей следовать в купировании постковидного синдрома патогенетическим «подсказкам», выявляемым эмпирически. Представленное сообщение является фрагментом одной из таких попыток. В нем мы остерегались скоропалительного формулирования так называемых «негативных медицинских технологий,… которые не имеют доказательств эффективности,… не исследовались в контролируемых исследованиях, не обоснованы патогенетически,…и вред от которых может превышать или быть сопоставимым с получаемой пользой» [1].

Как пишет группа австралийских врачей [2]: «общепризнанно, что одной из полезных стратегий является изучение возможности применения существующих, одобренных препаратов для лечения пациентов с болезнью COVID-19 и ее осложнениями, такими как «LONG COVID» (эквивалентное название постковидного синдрома). Однако и этот подход требует тщательного анализа патофизиологии заболевания, учета зависимости реакции разных индивидов на дозу применяемого препарата для принятия конкретного решения, а также клинического понимания и выделения групп пациентов, подлежащих лечению». Поскольку при «LONG COVID» было выявлено хроническое воспаление из-за повышенного уровня провоспалительных цитокинов, постольку Jarrott B. и соавторы [2] считают возможным рассмотреть применение противовоспалительных препаратов. Хотя приходится признать, что повышенная активность провоспалительных цитокинов может быть как причиной, так следствием проблемы ПС. Отсюда вновь вытекает требование тщательного изучения терапевтических стратегий.

Руководствоваться этими критериями в настоящее время сложно из-за недостаточной репрезентативности доказательных, контролируемых исследований. Однако есть основания выделить основную патогенетическую гипотезу о развитии воспалительно-дегенеративных повреждений различных тканей.

Острый и затем хронический воспалительный процесс при ПС имеет фактически генерализованный характер. Существенным аргументом может служить морфологический пример из обзора МГНОТ, в котором описывается «лимфоцитарный эндотелиит легких, сердца, почек и печени», эндотелиит подслизистых сосудов тонкой кишки и т.п. Следовательно, имеет место распространенная эндотелиальная дисфункция, дисфункция микрососудов, вазоконстрикция с последующим нарушением функции органов, ишемией, воспалительным отеком тканей… [1].

Кроме того, в настоящее время уже тривиальным стало упоминание о хронической гипоксии смешанного генеза при COVID-19, начиная с первоначального специфического поражения эндотелия альвеол легких, повреждения эритроцитов и гемоглобина, генерализованных воспалительных процессов в эндотелии сосудов всех органов и тканей вплоть до развития полиорганных воспалительно-дегенеративных изменений соединительной ткани, адвентиции сосудов (особенно головного мозга), пневмосклероза, опорно-двигательного аппарата и т.п. Эти факторы, и в первую очередь легочно-сердечные и микрососудистые повреждения, а также микротромбозы неизбежно приводят к развитию длительной гипоксии и ишемии. В свою очередь длительная гипоксия инициирует нарушение антиоксидантной защиты и детоксицирующей способности организма с одновременной активацией систем генерации свободно-радикальных соединений – активных форм кислорода (АФК) и азота, а также перекисных и опять-таки воспалительных повреждений.

Как показали многочисленные публикации, подобные отклонения обусловливают падение уровня транскрипционного фактора Nrf2 в клетках различных тканей. Напомним, что Nrf2 в здоровых клетках постоянно воспроизводится и при отсутствии повреждений, инфекции и избыточной генерации активных форм кислорода быстро подвергается протеолитиче-

ской деградации [3]. При повреждении клеток, остром окислительном стрессе, кратковременной гипоксии и вирусной инфекции этот транскрипционный фактор не расщепляется, так как теряет связь с фактором KEAP1, который в нормальных условиях способствует убиквитинированию и последующему протеолизу Nrf2. Сохранившийся Nrf2 переносится в ядро клетки, где запускает экспрессию генов, ответственных за синтез комплекса антиоксидантных ферментов, эндогенных противовоспалительных хемокинов, ферментов детоксикации и пентозного цикла – генератора восстановленного NADP, поддерживающего восстановительными эквивалентами эти адаптивные системы. Кратко, при необходимости при сдвиге редокс состояния клеток в сторону окислительного стресса возрастает воспроизводство и стабильность фактора Nrf2. Однако при COVID-19 и ПС наблюдается обратное нормальному течение событий: несмотря на развитие окислительного стресса, происходит подавление воспроизводства Nrf2, и увеличивается экспрессия фактора KEAP1, ответственного за связывание Nrf2 и вовлечение его в протеолитическую деградацию. Таким образом сразу 2 механизма во время острого COVID-19 и ПС способствуют значительному снижению уровня Nrf2 в клетках и соответственно росту экспрессии провоспалительного транскрипционного фактора NF-kB [2]. В итоге нарушается экспрессия цитопротекторных ферментов и белков, находящихся под контролем элемента антиоксидантного ответа в ДНК, и активируются факторы инициации провоспалительного и прооксидантного статуса. Это соответствует известным реципрокным изменениям активности факторов Nrf2 и NF-kB [4,5]. В такой ситуации логично и обосновано прибегнуть к целевым фармацевтическим средствам: индукторам Nrf2 и ингибиторам NF-kB. Именно такая тактика терапии рассмотрена с патогенетической точки зрения Jarrott B. с соавторами в 2022 году [2]. Они предложили в качестве противовоспалительного иммуномодулирующего средства использовать мелатонин, обладающий к тому же антиоксидантной, нейропротекторной и кардиопротекторной активностью. Механизм действия мелатонина был скрупулезно проанализирован с позиций лечения COVID-19 в 2021 году Vlachou M. и соавторами [6] которые в своем обзоре приводят более полутора десятка ссылок на клинические контролируемые исследования, выполненные в 2020 г в Испании, США и Мексике. В клинических исследованиях мелатонин применялся в дозах от 3, 6, 10, 50 мг до 1 г в день в течение месяца при лечении COVID-19. Подчеркнем, что применению мелатонина в клинической практике способствует его малая токсичность: LD50 для животных превышает 800 мг/кг.

В нашей стране в 2020 году были опубликованы исследования по профилактике средних и тяжелых форм COVID-19 аминодигидрофталазиндионом натрия (Галавит) у медицинского персонала «красной зоны» [7], о применение иммуномодулирующего препарата, аминодигидрофталазиндиона натрия для предотвращения прогрессирования пневмонии при COVID-19 [8] и описана возможность применения препарата, содержащего аминодигидрофталазиндион натрия, у пациентов с COVID-19, в частности для терапии «цитокинового шторма» [9]. В этих работах представлены результаты позитивного опыта практического применения для профилактики и лечения COVID-19 противовоспалительного иммуномодулятора аминодигидрофталазиндиона натрия в виде препарата Галавит, который исходно описывался М.Т. Абидовым как иммунокорректор с выраженной способностью подавлять гипервоспалительные реакции [10].

В ряде исследований было четко установлено, что в механизме действия аминодигидрофталазиндиона натрия ключевую роль играет активация транскрипционного фактора Nrf2 (!) [11-13], остро необходимого в патогенетически обоснованной профилактике и лечении COVID-19 и постковидного синдрома.

Однако имелись весьма существенные ограничения. Дело в том, что для лечения COVID-19 и токсических (острых и отдаленных) поражений центральной нервной системы (ЦНС) и иммунитета [11-13] требуются более высокие дозы противовоспалительного иммуномодулирующего средства, как это было показано зарубежными исследователями на примере препаратов мелатонина и Галавита. Это в свою очередь выдвинуло более высокие требования к качеству препарата, точнее к повышению его безопасности.

Согласно приведенным в литературе данным LD50 очищенного Галавита составляло 265 мг/кг (для мышей) [13]. Это достаточно большая величина, если ориентироваться на сегодняшние лечебные терапевтические дозы для людей, не превышающие 4 мг/кг, что соответствует примерно 50 мг/кг для мышей, то есть ширина терапевтического диапазона в 5 раз превышала обычную лечебную дозу. Однако, при поражениях ЦНС и иммунитета, также как и при лечении COVID-19, и можно полагать – постковидного синдрома требуются значительно более высокие дозы аминодигидрофталазиндиона натрия порядка 1 г в сутки и возможность длительного применения препарата.

Необходимый уровень безопасности аминодигидрофталазиндиона натрия достигнут благодаря созданию новой технологии получения **ТАМЕРОН**а – генерика Галавита. Эта работа выполнена коллективом сотрудников АНО «Институт инженерной физики» [14-16]. Величина LD50 для субстанции **ТАМЕРОН**а превышает 1,5 г/кг для животных. Этот уровень безопасности дает 7-кратную гарантию, то есть обеспечивает безопасную возможность использования самых высоких доз препарата для профилактики и лечения COVID-19 и ПС.

На сегодняшний день открыты перспективы для широкого применения высоко безопасного препарата **ТАМЕРОН** по множеству показаний, в частности, когда имеется необходимость в запуске экспрессии *de novo* антиоксидантной и детоксикационной систем, подавлении избыточного воспалительного ответа и гиперактивации моноцитарно-макрофагальной системы при развитии «цитокинового шторма». Важно, что препарат способен предотвращать взламывание и использование коронавирусом «входных ворот» в клетки и тормозить размножение не только коронавируса, но и многих других РНК-вирусов. **ТАМЕРОН** облегчает распознавание иммунной системой зараженных клеток, активирует местный и системный иммунный ответ, в том числе синтез интерферонов α и γ, восстановление образование интерферона β. Не систематизированные в виде контролируемых исследований, но уже весьма обширные медицинские наблюдения свидетельствуют о все расширяющемся ареале позитивных эффектов **ТАМЕРОН**а при нейроэндокринных и эмоциональных расстройствах, страдании когнитивных функций человека, заживлении различных видов ран, стимуляции регенерации и замедлении старения.

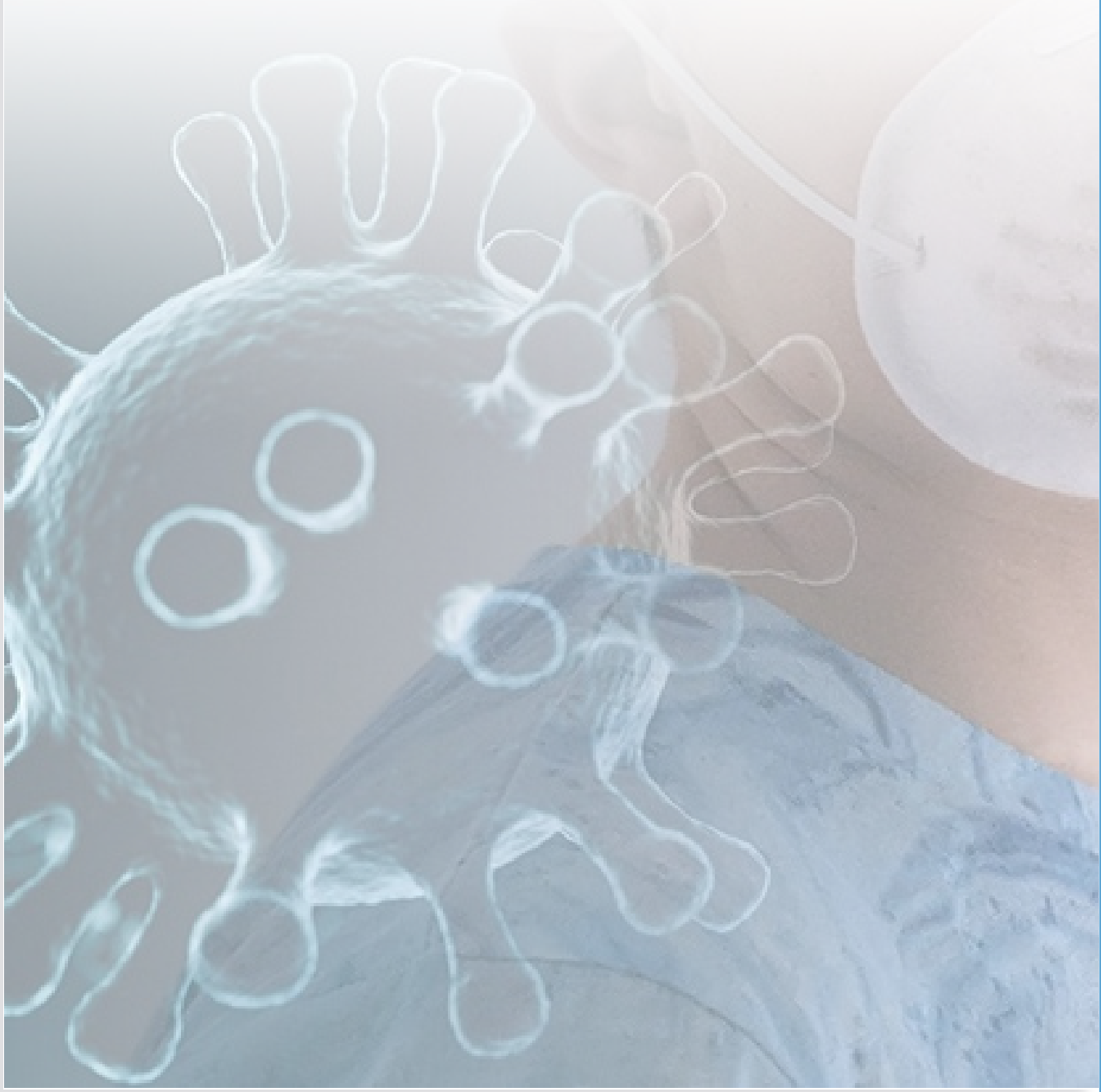
Предлагаемое применение **ТАМЕРОН**а в качестве противовоспалительного полифункционального иммуномодудятора для профилактики и лечения постковидного синдрома находится в точном соответствии с Рекомендациями Минздрава России 2022 года [17].

Авторы статьи выражают благодарность за информационную, редакционную и техническую помощь сотруднице ИТЭБ РАН Полине Станиславовне Маевской.

Литература

1. Рекомендации по ведению больных с коронавирусной инфекцией COVID-19 в острой фазе и при постковидном синдроме в амбулаторных условиях. Под ред. проф. Воробьева П.А. Проблемы стандартизации в здравоохранении. 2021; 7-8: 3-96: https://doi.org/10.26347/1607-2502202107-08003-096.
2. Jarrott B, Head R, Pringle KG, Lumbers ER, Martin JH. «LONG COVID»-A hypothesis for understanding the biological basis and pharmacological treatment strategy. Pharmacol Res Perspect. 2022 Feb;10(1):e00911. doi: 10.1002/prp2.911.
3. He F, Ru X, Wen T. NRF2, a Transcription Factor for Stress Response and Beyond. Int J Mol Sci. 2020 Jul 6;21(13):4777. doi: 10.3390/ijms21134777.
4. Wardyn J.D., Ponsford A.H., Sanderson C.M. Dissecting molecular cross-talk between Nrf2 and NF-κB response pathways // Biochem Soc Trans. 2015 Aug;43(4):621-6. doi: 10.1042/BST20150014.
5. Wen Gao, Lin Guo, Yan Yang et al. Dissecting the Crosstalk Between Nrf2 and NF-κB Response Pathways in Drug-Induced Toxicity //Front. Cell Dev. Biol., 02 February 2022 Sec. Signaling Vol. 9. 2021. https://doi.org/10.3389/fcell.2021.809952.
6. Vlachou M, Siamidi A, Dedeloudi A, Konstantinidou S, Papanastasiou I. Pineal hormone melatonin as an adjuvant treatment for COVID-19 (Review). Int J Mol Med. 2021;47(4):47.
7. Колесов С.В., Горбатюк Д.С., Пантелеев А.А., Бернакевич А.И., Уколов К.Ю. Профилактика средних и тяжелых форм COVID-19 аминодигидрофталазиндионом натрия (Галавит) у медицинского персонала «красной зоны» // Иммунология, 2020. №41(6). С. 527-539. DOI: https://doi.org/10.33029.0206-4952-2020-41-6-527-539.
8. Свистунов А.А., Махнач Г.К., Бунина Д.И. и др. Применение иммуномодулирующего препарата аминодигидрофталазиндиона натрия для предотвращения прогрессирования пневмонии при COVID-19 // Терапевтический архив, 2020.
9. Цветов В.М., Киселев Ю.Ю., Мирзаев К.Б., Сычев Д.А. Возможность применения препарата, содержащего аминодигидрофталазиндион натрия, у пациентов с COVID-19, в том числе для терапии «цитокинового шторма» // Качественная клиническая практика, 2020. Спецвыпуск S4. С. 4-7.
10. Направленная иммунокоррекция: проблемы и перспективы. Под ред. д.м.н. проф. М.Т. Абидов (Приложение 3 к журналу «Бюллетень экспериментальной биологии и медицины» за 2000 г.). М.: Издательство РАМН, 2000. 104 с.
11. Scofield VL, Yan M, Kuang X, Kim SJ, Wong PK. The drug monosodium luminol (GVT) preserves crypt-villus epithelial organization and allows survival of intestinal T cells in mice infected with the ts1 retrovirus. *Immunol Lett*. 2009;122(2):150-158. doi:10.1016/j.imlet.2008.12.012.
12. Reddy PV, Lungu G, Kuang X, Stoica G, Wong PK. Neuroprotective effects of the drug GVT (monosodium luminol) are mediated by the stabilization of Nrf2 in astrocytes. *Neurochem Int*. 2010;

56(6-7):780-788. doi:10.1016/j.neuint.2010.02.017.
13. Ashok K. Shetty, Sahithi Attaluri, Maheedhar Kodali, Bing Shuai, Geetha A. Shetty, Dinesh Upadhya, Bharathi Hattiangady, Leelavathi N. Madhu, Raghavendra Upadhya, Adrian Bates, Xiaolan Rao, Monosodium luminol reinstates redox homeostasis, improves cognition, mood and neurogenesis, and alleviates neuro- and systemic inflammation in a model of Gulf War Illness, Redox Biology, Vol. 28, 2020, 101389: https://doi.org/10.1016/j.redox.2019.101389.
14. Царьков А.Н., Смуров С.В., Презент М.А., Вольский В.С., Седова И.В., Краснова Ю.В., Чистякова А.В. Патент РФ № 2673452 Способ получения активной фармацевтической субстанции, представляющей собой аминодигидрофталазиндион натрия. Дата приоритета: 15.08.2017; опубликован 27.11.2018.
15. Царьков А.Н., Царькова Е.А. Инновационный препарат «ТАМЕРОН» // Известия Института инженерной физики, 2019. №4(54). С. 111-115.
16. Царьков А.Н., Краснова Ю.В., Царькова Е.А. Технология производства иммунотропного инновационного препарата «ТАМЕРОН» // Известия Института инженерной физики, 2020. №2(56). С. 82-86.
17. Временные методические рекомендации «Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Минздрав РФ. М. Версия 17 (14.12.2022)».



УДК 537.636

К ВОПРОСУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ПОЛЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

ON THE QUESTION OF EXPERIMENTAL STUDY OF THE RESULTING FIELD IN THE INTERACTION OF PERMANENT MAGNETS

Виктор Васильевич Лесных
преподаватель кафедры физики
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (916) 664-64-12
E-mail: viktor-lesnykh@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрен экспериментальный способ исследования результирующего поля двух постоянных магнитов и описан эффект возникновения ЭДС вследствии изменения его конфигурации при поступательном движении их одноименных полюсов навстречу друг другу. В ходе описанного в статье эксперимента получены данные, подтверждающие наличие эффекта. Обнаруженный в ходе исследования эффект может лечь в основу создания новых типов измерительных приборов, датчиков и устройств преобразования механической энергии в электрическую. Представленные в статье материалы могут послужить еще одним источником для формирования у обучаемых более полного представления о способах получения электрической энергии, а лабораторные установки, демонстрирующие эти подходы, дополнят классические эксперименты Фарадея и помогут взглянуть на магнитные взаимодействия под несколько иным углом, отличным от классического их представления.

Ключевые слова: эффект, магнетизм, постоянные магниты, магнитные поля, электромагнитная индукция, поступательное движение, Ампер, Фарадей.

Summary

The article considers an experimental method for studying the resulting field of two permanent magnets and describes the effect of the emergence of EMF as a result of a change in its configuration during the translational movement of their like poles towards each other. In the course of the experiment described in the article, data were obtained confirming the presence of the effect. The effect discovered during the study can form the basis for the creation of new types of measuring instruments, sensors and devices for converting mechanical energy into electrical energy. The materials presented in the article can serve as another source for the formation of a more complete understanding of the methods of obtaining electrical energy among students, and laboratory facilities demonstrating these approaches will complement Faraday's classical experiments and help to look at magnetic interactions from a slightly different angle, different from their classical presentation.

Keywords: effect, magnetism, permanent magnets, magnetic fields, electromagnetic induction, translational motion, Ampere, Faraday.

Я попытался дать вам качественные объяснения диамагнетизма и парамагнетизма, однако хочу тут же внести поправку и сказать, что с точки зрения классической механики честным путем понять магнитные эффекты невозможно. Подобные магнитные эффекты – явления целиком квантовомеханические.

Ричард Фейнман

Постоянные магниты известны более 3000 лет [1]. В двенадцатом веке постоянные магниты, уже в виде компасов, появились в Европе [2]. В 1269 году Петр Перегрин написал работу «Книга о магните» [4], в которой впервые говорит о полюсах магнитов, о притяжении («сопритяжении») разноименных полюсов и отталкивании одноименных.

В 1600 году Уильям Гильберт написал трактат «О магните» [8-12], описывающий основные свойства магнитов и анализирующий магнетизм Земли.

Несмотря на то, что изучением явления магнетизма наука занимается довольно давно, можно заметить, что на определенном этапе исследования этого явления внимание ученых было сконцентрировано на изучении магнитных взаимодействий проводников с токами или постоянных магнитов и движущихся зарядов. Это оправдано тем, что такой подход дал практические результаты в применении явления магне-

тизма в технике и производстве.

Между тем, изучение взаимодействие постоянных магнитов практически остановилось на констатации фактов притяжения разноименных полюсов и отталкивании одноименных [12-19].

Поэтому можно предположить, что дальнейшие исследования магнитных явлений принесут еще много открытий, которые существенно повлияют на подходы к способам получения электрической энергии. Эксперименты Майкла Фарадея по исследованию влияния проводника с током на магнитную стрелку привели к открытию закона электромагнитной индукции. Описание его экспериментов с постоянными магнитами и соленоидами стали классическими и вошли практически во все учебники по физики.

Представленные в статье материалы могут послужить еще одним источником для формирования у обучаемых более полного представления о способах получения электрической энергии, а лабораторные установки, демонстрирующие эти подходы, дополнят классические эксперименты Фарадея и помогут взглянуть на магнитные взаимодействия под несколько иным углом, отличным от классического их представления.

Итак, рассмотрим изображение магнитных полей постоянных магнитов в технической литературе и учебниках для школ и вузов. Оно имеет упрощенный вид, который не иллюстрирует реальную конфигурацию результирующего поля при изменении взаимного положения магнитов относительно друг друга. В ходе работы над статьей были рассмотрены наиболее часто встречающиеся изображения магнитных полей при взаимодействии разноименных и одноименных полюсов (*рисунки 1, 2*) [20-21].

На *рисунках 1, 2* показаны результирующие силовые линии магнитных полей, которые не дают никакого другого представления о явлении, кроме как, что разноименные полюса притягиваются, а одноименных отталкиваются. По таким иллюстрациям получить представление о взаимодействии постоянных магнитов, с точки зрения гипотезы Ампера, невозможно. На рисунках силовые линии полей не пресекаются, что затрудняет проведение расчета силовых характеристик поля в произвольной точке с использование принципа суперпозиции. **Как известно,** *принцип суперпозиции – допущение, согласно которому результирующий эффект нескольких независимых воздействий есть сумма эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности* [3].

Но фактически каждый из магнитов, представленных на рисунках, находится в поле другого магнита. Эти поля накладываются на элементарные магнитные поля, создаваемые

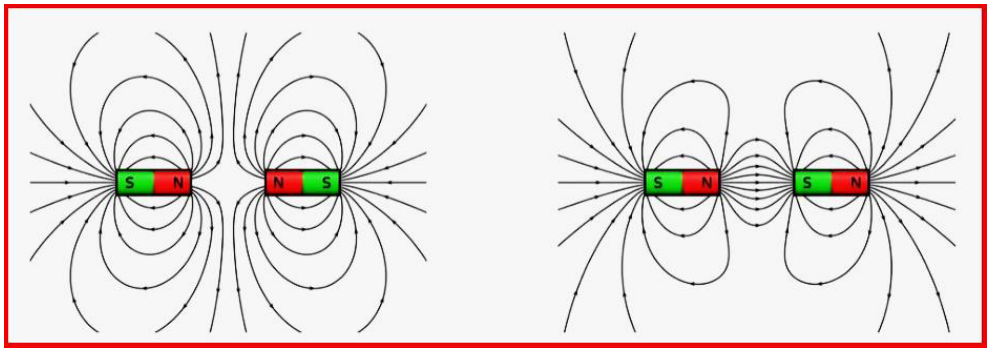


Рис. 1. Изображение полей постоянных магнитов с помощью силовых линий (вариант 1)

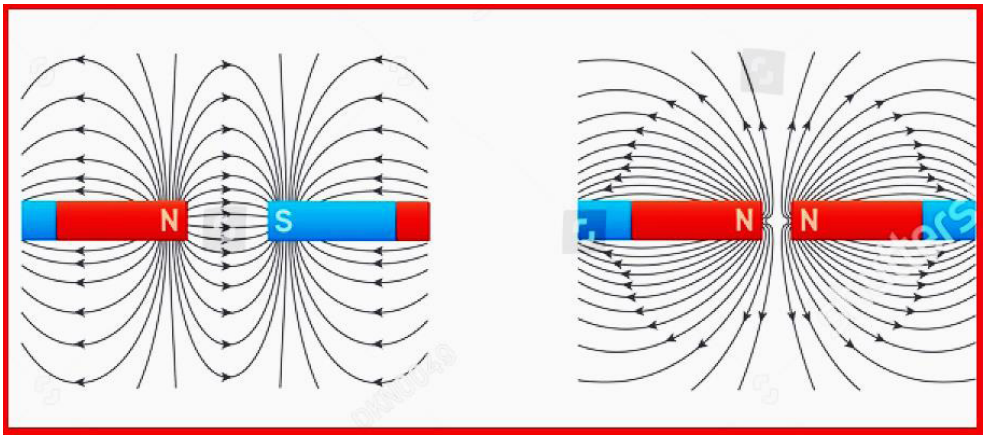


Рис. 2. Изображение полей постоянных магнитов с помощью силовых линий (вариант 2)

согласно гипотезе Ампера [5], микротоками, циркулирующими в веществе магнита на молекулярном (атомном) уровне. И мы переносимся в мир, где действуют законы квантовой механики [6]. С другой стороны известны ограничения применения принципа суперпозиции. Он может быть использован для расчета параметров результирующего поля в том случае, если его можно описать системой линейных уравнений. Для точек пространства достаточно удаленных от полюсов магнита это вполне допустимо. Но непосредственно на полюсах плотность магнитного потока значительно увеличивается, что может ограничить применение принципа суперпозиции для анализа результирующего поля в этой области пространства. Это известно еще из школьных опытов с железными опилками, которые могут выстроиться вдоль воображаемых магнитных линий не только на плоскости их нанесения на листе картона, но и в перпендикулярном пространстве. А это уже говорит о том, что магнитное поле в этой области настолько сильно, что компенсирует действие гравитационного поля Земли.

Исходя из этих соображений автор решил провести следующий эксперимент для изучения результирующего магнитного поля при сближении постоянных магнитов одноименными полюсами навстречу друг другу, т.е. преодолевая силы отталкивания.

Разместим магниты в диамагнитном прозрачном цилиндре одноименными полюсами навстречу друг другу. Для этого удобно использовать обычный медицинский шприц, сняв уплотнитель со штока (*фото 1*).

Нажимая на шток, мы реально ощущаем силовое противодействие сближению магнитов. Присутствие магнитного поля, казалось бы, в пустом пространстве, становится очевидным. Шток выталкивается из цилиндра шприца, как будто между магнитами находится пружина.

Получив такой нехитрый инструмент для исследования взаимодействия одноименных полюсов, поставим перед собой вопрос: «Как изменятся силовые характеристики магнитного поля в области, обозначенной на *фото 1* знаком «?».

Вопрос вытекает из простых соображений о том, что воздействуя на шток при «насильственном» сближении магнитов, мы совершаем работу. Работа внешних сил приводит к изменению энергетического баланса открытой системы. Следовательно, что-то должно произойти. Но что?

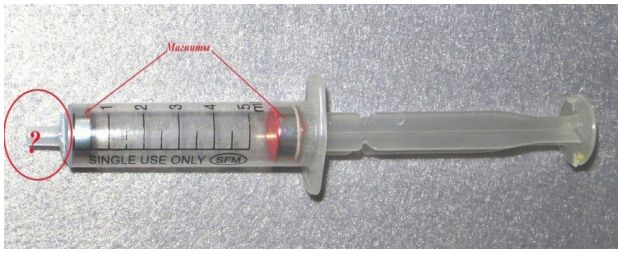


Фото 1. Конструкция экспериментальной сборки постоянных магнитов

Фото 2. Направление магнитной стрелки в магнитном поле Земли. Поз. 1

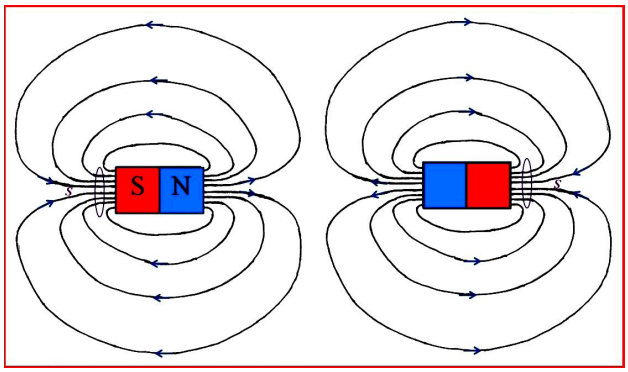


Рис. 3. Иллюстрация конфигурации силовых линий магнитного поля до сближения магнитов

Фото 3. Направление магнитной стрелки под действием магнитной сборки. Поз. 2

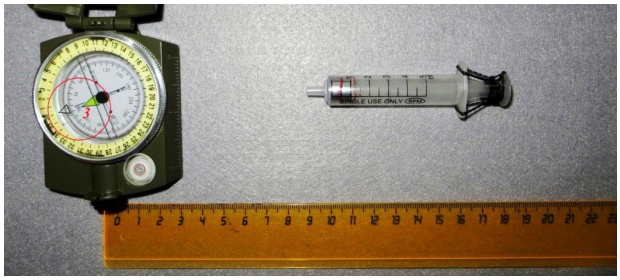


Фото 4. Направление магнитной стрелки под действием магнитной сборки с соединенными магнитами. Поз. 3

Для ответа на этот вопрос поступим так.

Возьмем магнитный компас и разместим его на планшете. Стрелка установится в положении на север (*фото 2*).

Зафиксируем исходное положение стрелки как показано на *фото 2*. Стрелка стала в направлении силовых линий магнитного поля Земли (точка 1).

Поднесем к компасу шприц с магнитами, не нажимая на шток. Магниты раздвинуты. Найдем такое положение, при котором магнитное поле нашего прибора будет больше магнитного поля Земли в данной точке и стрелка развернется в его сторону как показано на *фото 3*.

Зафиксируем положение 2. После чего нажмем на шток, преодолеем силы отталкивания и соединим одноименные полюса магнитов. Положение шприца с магнитами в пространстве не меняем. Контролируем положение по линейке.

При этом наблюдаем значительное уменьшение силовых характеристик магнитного поля в точке размещения компаса. Об этом говорит возвращение стрелки компаса практически в исходное состояние, когда рядом с ним не было магнитов (*фото 4*).

Обращаем внимание на точку 3 на *фото 4*. Стрелка встала почти так же, как на *фото 2*.

Сформулируем этот эффект следующим образом: «*при совершении работы внешней силой (поступательное движение), направленной на преодоление силы отталкивания одноименных полюсов постоянных магнитов, происходит изменение (уменьшение) силовых характеристик магнитного поля в данной точке пространства (место расположения компаса)*». Это может быть вызвано изменением конфигурации результирующего магнитного поля в следствии перераспределения направлений его силовых линий и концентрации их вдоль границы соприкосновения магнитов. Поскольку поле каждого магнита относительно симметрично, а силовые линии непрерывны (начинаются на северном и заканчиваются на южном полюсе) можно предположить что положение силовых линий меняется и с обратной стороны от линии соприкосновения магнитов. Что приводит к изменению магнитного потока в точке наблюдения эффекта. Из чего можно сделать вывод о возможности возникновения в области наблюдения явления электромагнитной индукции.

Проиллюстрируем это умозаключение графически. На *рисунке 3* показано положение силовых линий магнитных полей постоянных магнитов расположенных на расстоянии, при котором наложение (суперпозиция) полей не дают существенного результата в изменении общей картины расположения силовых линий. Обратим внимание на то, что через контур площадью **S** проходят 6 силовых линий магнитного поля, которые определяют величину магнитного потока **Ф** в данной точке пространства.

При действии внешней силы, направленной на сближение одноименных полюсов магнитов, сила отталкивания увеличивается пропорционально приложенной внешней силе. При соединении полюсов сила отталкивания имеет максимальное значение, ограниченное энергией магнитов. Увеличение силы отталкивания на границе соприкосновения требует перераспределения внутренней энергии магнитов между полюсами. Это приводит к изменению картины

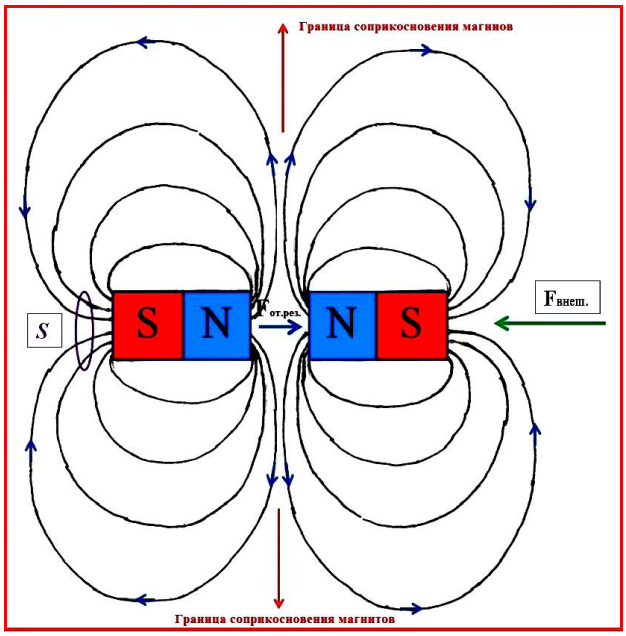


Рис. 4. Иллюстрация изменения конфигурации силовых линий магнитного поля при действии внешней силы, направленной на соединение одноименных полюсов магнитов

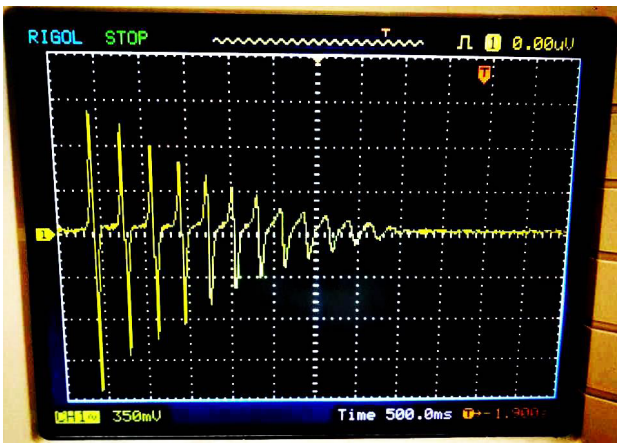


Фото 5. Осциллограмма импульсов ЭДС, полученная на экспериментальной установке

расположения силовых линий поля так, как показано на *рисунке 4*.

В результате количество силовых линий, пересекающих контур площадью **S** расположенный со стороны второго полюса магнита, уменьшается. На *рисунке 4* показано, что при сближении количество силовых линий уменьшилось до 4-х. Следовательно уменьшилась и величина магнитного потока **Ф** в данной точке пространства.

Примечание. Иллюстрации, представленные на *рисунках 3* и *4* поясняют общий ход мыслей при анализе экспериментальных данных, но не отражают конкретные результаты измерений.

На основе анализа возможных причин возникновения эффекта «обратной стороны» был проведен второй эксперимент, который подтвердил вышеизложенное предположение.

Выводы по итогам экспериментов

1. Для создания ЭДС в контуре (закон электромагнитной индукции Фарадея) [7] необязательно перемещать относительно него **всю** систему магнитов или перемещать сам контур относительно магнита, как это делается сейчас в большинстве устройств такого рода. Достаточно разместить контур за (или перед) одним неподвижным магнитом, относительно которого перемещать второй магнит, создавая тем самым переменное магнитное поле, как основное условие наведения в контуре ЭДС. Следует отметить, что повторяемость эффекта (появление серии колебаний) обеспечивается при соединении одноименных полюсов.

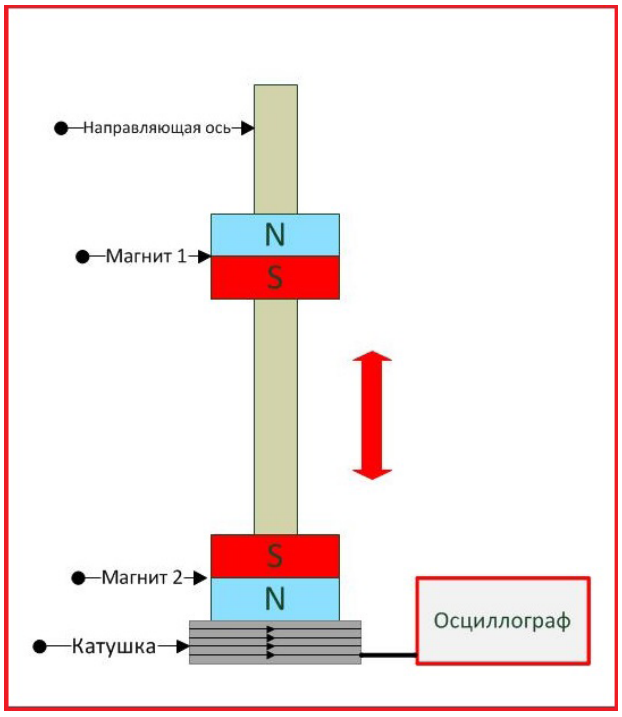


Рис. 5. Схема экспериментальной установки с двумя кольцевыми постоянными магнитами

2. Обнаруженное в ходе эксперимента явление изменения силовых характеристик поля, при данных условиях проведения эксперимента, обеспечивает получение серии затухающих импульсов ЭДС без использования дополнительных возвратных механизмов. Система после окончания внешнего воздействия за счет сил отталкивания одноименных полюсов стремиться занять исходное положение.

3. Это может обеспечить преобразование кинетической энергии поступательного механического движения (например, движение волн в береговой полосе) в электрическую энергию без сложных конструктивных элементов. Надо отметить, что в настоящее время такую задачу решают за счет вращательного движения. Вращая либо рамку в магнитном поле, либо магниты относительно рамки [23].

В качестве иллюстрации к выводам приведу осциллограмму затухающих гармонических колебаний (*фото 5*) полученных при взаимодействии двух кольцевых магнитов размещенных по схеме, показанной на *рисунке 5*.

В основании оси помещена проволочная катушка. На направляющей оси размещены два магнита. К катушке подключен осциллограф. Разместив магнит 1 в верхней части направляющей оси мы задаем ему определенную величину потенциальной энергии (mgh). Отпустив магнит 1 наблюдаем его движение под действием силы тяжести в сторону магнита 2. Катушка находится под магнитом 2. При сближении магнитов под действием силы тяжести в области нахождения катушки меняется величина магнитного потока следующим образом [24]:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где ε – электродвижущая сила;
N – число витков;
Φ_B – магнитный поток через один виток;
Ψ – потокосцепление катушки.

Поскольку потенциальная энергия затрачивается на преодоление сил отталкивания одноименных полюсов, в конце траектории (точка соединения магнитов) скорость магнита 1 становится равной нулю (кинетическая энергия =0). Магнит 1 под действием сил отталкивания начинает двигаться вверх. Устанавливаются затухающие колебания, при которых в катушке формируется последовательность импульсов ЭДС.

Таким образом, используя обнаруженный и описанный в данной статье эффект «обратной сто-

роны», мы ушли от классической схемы лабораторной установки, предложенной Фарадеем [23].

Очевидно, что способ преобразования механических видов энергии при поступательном движении в электрическую на основе эффекта «обратной стороны», может представлять интерес при разработке новых конструкций датчиков, приборов контроля и устройств.

Полученная серия импульсов ЭДС при однократном воздействии внешней механической силы, позволяет предположить, что данный способ получения электрической энергии может оказаться достаточно эффективным. В дальнейшем эта тема будет подробно исследована в составе научной группы и рассчитаны основные параметры данного способа преобразования механической энергии в электрическую, для оценки эффективности устройств в основе работы которых будет лежать обнаруженный эффект изменения величины магнитного потока, в результате механического взаимодействия одноименных полюсов постоянных магнитов (короткое название – эффект «обратной стороны»). Между тем для исследования представляет интерес и пространство между одноименными полюсами магнитов. Поскольку изменение конфигурации силовых линий может происходить в этой области более интенсивно, что возможно приведет к более значительному увеличению амплитуды ЭДС. Об этом мы расскажем в следующей статье после проведения соответствующих опытов.

Но уже сейчас становится очевидным, что полученные серии импульсов ЭДС на основе эффекта «обратной стороны» в результате действия на систему постоянных магнитов внешней силы, будут иметь индивидуальные характеристики и смогут рассказать о величине действующей силы, переданном системе импульсе и частоте изменения внешнего воздействия. Что является индивидуальными признаками источника воздействия и позволит не только определить наличие этого источника, но и точно его идентифицировать, например причины колебания почвы: естественные (землетрясения), искусственные (взрывы, движение транспортных средств) и т.п.

Литература

1. Плетнев С.В. Магнитное поле: свойства, применение: Научное и учебно-методическое справочное пособие. СПб.: Гуманистика, 2004. 624 с.
2. Гордин В.М. Очерки по истории геомагнитных измерений. М.: ИФЗ РАН, 2004. 162 с.
3. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983. 731 с.
4. Петр Перегрин. Источник: https://ru.wikipedia.org/wiki/
5. Ампер А. Электродинамика. Л.: Изд-во АН СССР, 1954. 485 с.
6. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Т. 7. М.: Мир, 1966. 289 с.
7. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Т.1. М.: Изд. АН СССР, 1947. 848 с.
8. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. 2-е изд. М.: Просвещение, 1982. 448 с.
9. Кудрявцев П.С. История физики: в 3-х т. М.: Просвещение, 1956-1971. 564 с, 488 с,423 с.
10. Спасский Б.И. История физики: в 2 т. М.: Высшая школа, 1977. 320 с.
11. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики: в 2-х т. М.: Наука, 1974-1979. 317 с.
12. Карцев В.П. Магнит за три тысячелетия. М.: Атомиздат, 1968. 165 с.
13. Бутиков Е.И., Быков А.А., Кондратьев А.С. Физика для поступающих в вузы. 2-е изд. М.: Наука, 1982. 608 с.
14. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Т.5. Электричество и магнетизм / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. СПб.: Питер, 2016. 304 с.
15. Фриш С.Э. Курс общей физики. В 3-х томах. Т.2. Электрические и электромагнитные явления / С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. М.: Лань, 2009. 528 с.
16. Шепелев А.В. Электричество и магнетизм. Краткий курс. М.: СИНТЕГ, 2015. 207 с.
17. Савельев И.В. Курс общей физики: Учебное пособие. В 3-х т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. 7-е изд., стер. СПб.: Лань, 2007. 496 с.
18. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учебное пособие для втузов. 4-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2002. 718 с.
19. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. Изд. 9-е, перераб. и доп. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 560 с.
20. Иродов И.Е.: Электромагнетизм. Основные законы. 5-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 319 с.: ил.
21. https:// znanio.ru/ media/ fizika10klassrusprezentatsiya-2583309
22. https:// www. shutterstock.com/ ru/search/magnetic-motion
23. Кессельман В.С. Удивительная история физики. М.: ЭНАС-КНИГА, 2015. 376 с.
24. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. Для инженеров и студентов вузов. 4-е изд., переработ. М.: Наука, 1968. 471 с.

AUTHORS

Alatortsev Alexey I. Doctor of Technical Sciences. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Ali Bushra. Graduate student. NUST MISIS. Moscow, Leninsky Prospekt, 4.

Alliluyeva Natalia V. Support specialist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

Atakischev Oleg I. Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor. Deputy General Director for Special Projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

Bessonov Maxim A. Candidate of Technical Sciences. MTUCI. Moscow, st. Aviamotornaya, 8a.

Bikmaev Ramil R. Head of the department of special software for navigation and geodetic systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Bogdanova Lyudmila A. Candidate of Medical Sciences, Chief Specialist of the Laboratory of Energy of Biological Systems, ITEB RAS. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Bugakov Alexey I. Senior specialist of the group of testing and debugging complexes. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

Bugakov Igor A. Honoured devisor of Russia. Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, professor. Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Elistratov Vasily V. Doctor of Technical Sciences, Head of the Department for the Development of Artificial Intelligence Technologies of the Ministry of Defense of the Russian Federation.

Elokhin Sergey V. Head of the support department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

Furov Andrey N. Candidate of Technical Sciences. Deputy head of department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Goranov Miroslav Z. Junior researcher of the 2nd department of the 1st research center (special control). FGKU «12 central research institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow reg., Sergiev Posad-7, Vesennaya str., 26.

Gribunin Vadim G. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Science. Chief Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 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. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Kleimenov Artem A. Master. NUST MISIS. Moscow, Leninsky Prospekt, 4.

Klyuchkin Alexander K. Adjunct of the Department of Onboard Information and Measurement Systems of Spacecraft. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. 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.

Kolpakov Denis M. Lead research engineer, JSC «TERRA TECH». Moscow, Kashirskoe shosse, 3, bldg. 2, built. 4.

Korobkov Alexey A. Honorary worker of science and high technology of the Russian Federation. Candidate of Technical Sciences, associate Professor, head of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Kosyakova Ninel I. Doctor of Medical Sciences, Allergist-Immunologist, Deputy. Chief Physician for Science, Head of the Allergology-Immunology Department of the Hospital of the Pushchino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Moscow reg., Pushchino, st. Institutskaya, 1.

Krylov Vladislav O. Assistant of the Department of «Information Protection» of Bauman Moscow State Technical University, Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5, p. 1.

Krynetskaya Galina S. Senior lecturer. NUST MISIS. Moscow, Leninsky Prospekt, 4.

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.

Lesnykh Viktor V. Teacher of the Department of Physics. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Maevsky Evgeny I. Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Energy of Biological Systems, ITEB RAS. Advisor to the President of the ANO "Institute of Engineering Physics" in biomedical direction. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Malyshev Andrey Y. Candidate of Technical Sciences. Leading researcher of the 1st research department FGKU «12 central research institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow reg., Sergiev Posad-7, Vesennaya str., 26.

AUTHORS

Mamontov Anton N. Candidate of Technical Sciences. Leading researcher of the 1st research center (special control). FGKU «12 central research institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow reg., Sergiev Posad-7, Vesennaya str., 26.

Mazin Anatoly V. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of «Information Security». Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Nakonechny Andrey B. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Nikolaev Alexander V. Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Nischakov Ivan S. Candidate of Technical Sciences. Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Orekhov Roman V. Chief of laboratory. 1st of department 1st of the center for scientific research (special control). FGKU «12 central research institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow reg., Sergiev Posad-7, Vesennaya str., 26.

Panin Alexander E. Postgraduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Pastukhov Vladimir D. Serviceman.

Popov Alexandr V. Adjunct of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Potapov Alexey V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Protection. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Kaluga, Bazhenov str., 2.

Rogovoi Andrey V. Candidate of Technical Sciences. Leading researcher of the 1-st department of the 1st research center (special control) FGKU «12 central research institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow reg., Sergiev Posad-7, Vesennaya str., 26.

Sayfutdinov Nikita A. Bachelor. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Kaluga, Bazhenov str., 2.

Sharpan Dmitry A. Graduate student. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of RAS. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya str., 3.

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 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.

Sozykin Igor A. Serviceman.

Spivak Vadim I. Postgraduate student of the Department of «Information Protection». Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5.

Suvorov Gennady P. Candidate of Technical Sciences.

Sychev Artem M. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5-1.

Sychev Mikhail P. Doctor of Technical Sciences. Professor. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5, p. 1.

Taganov Nikita S. Graduate. MTUCI. Moscow, st. Aviamotornaya, 8a.

Timchenko Daria K. Graduate student. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Tolstenko Lada S. Master. NUST MISIS. Moscow, Leninsky Prospekt, 4.

Tzar'kov Alexey N. Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

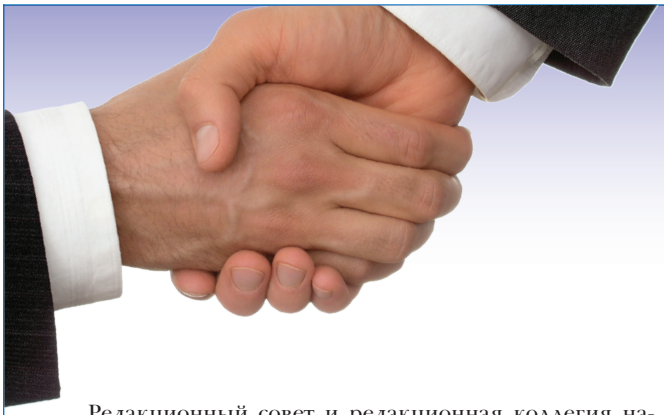
Vershinin Evgeny V. Candidate of Physical and Mathematical sciences. Deputy Director for Science. Head of «Information processing systems» Department. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

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 Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Zelenevsky Yury V. Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Forse. 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 издателю 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 (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

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.**
- **Медицина и фармацевтика.**
- **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.

AUTONOMOUS NON-PROFIT ORGANIZATION
"INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS"

CONTENTS

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION–MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

Alatortsev A.I., Furov A.N., Nischakov I.S.
Features of interception of meteorite fragments in the atmosphere 2

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Kazakov R.R., Klyuchkin A.K.
An approach to the formation of requirements for the accuracy characteristics of the measuring instruments of the selection system of the onboard special complex of the spacecraft 5

Nikolaev A.V.
A model for a technical and economic evaluation of the efficiency of a synchronous generator with pulsating current excitation for a diesel-electric unit with a variable speed of an autonomous power supply system for special military complexes 9

Kolombet V.A., Sharpan D.A., Lesnykh V.N.
The prospect of searching for relativistic effects in the universal period tripling system 13

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Zelenevsky V.V., Zelenevsky Y.V., Popov A.V., Nakonechny A.B., Panin A.E.
Statistical evaluation of imitation protection of transmitted messages by steganographic methods in radio communication systems 18

Kvashennikov V.V.
Soft iterative method decoding of linear noise-resistant codes 23

Taganov N.S., Bessonov M.A.
Ways to counteract hidden information transmission channels embedded in digital signature algorithms 29

Mazin A.V., Sychev M.P., Sychev A.M., Spivak V.I., Krylov V.O., Potapov A.V.
Formalized representation of the process of interception of high-frequency electromagnetic signals of parasitic (auto) generation in the technical means of the object of exploration generation in the technical means of the object of exploration 34

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

Mamontov A.N., Rogovoi A.V., Goranov M.Z., Malyshev A.Y., Orekhov R.V.
Selection of infrasound signals of atmospheric nuclear explosions on low-phase acoustic groups 41

Kolpakov D.M., Sayfutdinov N.A., Vershinin E.V.
Analysis of algorithms of group color correction of multispectral satellite images 45

Smurov S.V., Volkov G.G.
Features of quantum states of NV centers in the non-locality of entanglement and teleportation 49

Tolstenko L.S., Kleimenov A.A., Ali B., Krynetskaya G.S., Korobkov A.A.
Neural network analysis for traffic light detection in images 59

Suvorov G.P., Smirnov D.V., Korobkov A.A., Elokhin S.V., Alliluyeva N.V.
Practical implementation of a neural network in the project of a video monitoring and passenger traffic analytics system on vehicles 66

Smurov S.V.
Method of ordered selection of elements based on an array of control variables 74

Atakishev O.I., Gribunin V.G., Sozykin I.A., Pastukhov V.D.
Anomaly and outlier detection in machine learning datasets 81

Timchenko D.K., Vershinin E.V.
Machine learning approaches in lifestyle medicine field 88

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS

Bugakov I.A., Elistratov V.V., Tsar'kov A.N., Bugakov A.I.
On the signs and levels of artificial intelligence. Conceptual foundations. Part 2 91

Bikmaev R.R.
Determination of a non-linear image similarity function using a Siamese convolutional neural network 102

MODERN MEDICINE AND PHARMACEUTICS

Maevsky E.I., Bogdanova L.A., Kosyakova N.I.
Possible pathogenetic rationale for the treatment of post-COVID syndrome ..107

PROFESSIONAL EDUCATION

Lesnykh V.V.
On the question of experimental study of the resulting field in the interaction of permanent magnets 113

AUTHORS 119

THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS 121

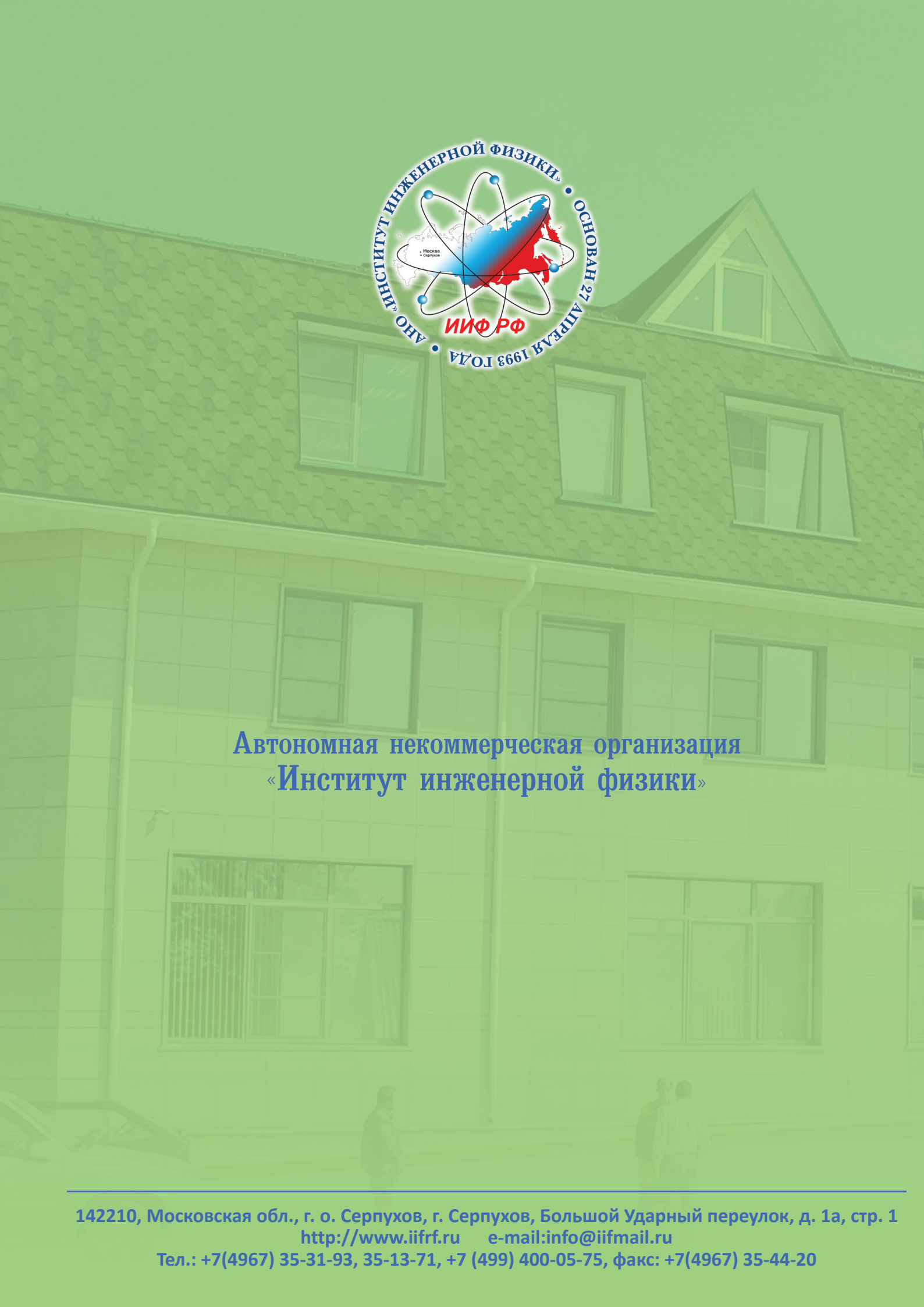
REQUIREMENTS TO AUTHORS 122

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

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 13.04.2023.
Дата выхода в свет 21.04.2023. Тираж 2000 экз. Цена свободная.
© Автономная некоммерческая организация
«Институт инженерной физики», 2023.



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
Тел.: +7(4967) 35-31-93, 35-13-71, +7 (499) 400-05-75, факс: +7(4967) 35-44-20