

УДК 621.398;629.05
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-4-967-975
EDN YEYEHN

Разработка инновационных методов и технологий повышения помехоустойчивости в космических телекоммуникационных системах управления и передачи данных

¹Ширяев А.А., ²Кукушкин С.С., ³Кукушкин Л.С., ⁴Олейник И.И.

¹МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)

пр-т Вернадского, д. 78, стр. 4, Москва, 119454, Россия

²НИИ КС имени А.А. Максимова – филиал АО ГКНПЦ им. М.В. Хруничева

ул. Тихонравова, д. 27, Московская обл., г. Королёв, 141091, Россия

³АО «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит»

ул. Интернациональная, д. 1г, г. Рязань, 390039, Россия

⁴Белгородский государственный национальный исследовательский университет

ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия

a.shyriaev@mail.ru, adaptermetod@mail.ru, leofrontier@gmail.com, oleinik_i@bsuedu.ru

Аннотация. Статья посвящена решению проблемы повышения помехоустойчивости радиоканалов и космических инфокоммуникаций на основе использования инновационных методов представления, передачи, приёма и обработки данных. Информационно-измерительные и вычислительные технологии обеспечивают современные технические системы возможностью не только контроля технического состояния систем, но и определения траекторий полёта различных космических аппаратов. Это всё свидетельствует о зарождающейся новой потребности использования имеющегося и получаемого в результате проведения опытов в интересах развития и внедрения в практику применения космических систем связи и управления искусственного интеллекта (ИИ). Показаны на примерах различных нетрадиционных технических решений новые возможности, которые способствуют повышению эффективности использования ИИ, обогащённого достижениями человеческого разума и изобретательства. В качестве перспектив развития информационного обеспечения применения таких систем рассмотрены инновационные методы и подходы к развитию существующей теории кодирования передаваемой информации.

Ключевые слова: помехоустойчивость космических инфокоммуникаций и радиоканалов, методы представления данных, искажение информации при её передаче, обработка данных, система остаточных классов, теория кодирования передаваемой информации

Для цитирования: Ширяев А.А., Кукушкин С.С., Кукушкин Л.С., Олейник И.И. 2025. Разработка инновационных методов и технологий повышения помехоустойчивости в космических телекоммуникационных системах управления и передачи данных. *Экономика. Информатика*, 52(4): 967–975. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-4-967-975; EDN YEYEHN

© Ширяев А.А., Кукушкин С.С., Кукушкин Л.С., Олейник И.И., 2025

Development of Innovative Methods and Technologies for Improving Noise Immunity in Space-Based Telecommunication Control and Data Transmission Systems

¹Alexey A. Shiryaev, ²Sergey S. Kukushkin, ³Leonid S. Kukushkin, ⁴Ivan I. Oleynik

¹ MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)

Bld 4, 78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russia

² A.A. Maksimov Research Institute of Spacecraft, a branch of M.V. Khrunichev State Research and Production Space Center

27 Tikhonravov St., Korolev 141091, Moscow Region, Russia

³ Ryazan Production and Technical Enterprise Granit

1g Internatsionalnaya St., Ryazan 390039, Russia

⁴ Belgorod State National Research University

85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

a.shyriaev@mail.ru, adaptermetod@mail.ru, leofrontier@gmail.com, oleinik_i@bsuedu.ru

Abstract. The article is devoted to solving the problem of increasing the noise immunity of radio channels and space infocommunications based on the use of innovative methods of data representation, transmission, reception, and processing. Information, measurement, and computing technologies provide modern technical systems with the ability not only to control the technical condition of systems, but also to determine the flight trajectories of various spacecraft. This all indicates the emerging new need to use the existing data and obtained from experiments in order to develop and implement artificial intelligence (AI) in the practice of using space communication systems and control. The authors use various non-traditional technical solutions to demonstrate new possibilities that enhance the effectiveness of AI, which is enriched by the achievements of human intelligence and ingenuity. The article also explores innovative methods and approaches to developing the existing theory of information encoding.

Keywords: noise resistance of space infocommunications and radio channels, data representation methods, information distortion during transmission, data processing, the system of residual classes, the theory of transmitting information

For citation: Shiryaev A.A., Kukushkin S.S., Kukushkin L.S., Oleynik I.I. 2025. Development of Innovative Methods and Technologies for Improving Noise Immunity in Space-Based Telecommunication Control and Data Transmission Systems. *Economics. Information technologies*, 52(4): 967–975 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-4-967-975; EDN YEYEHN

Введение

Существующая проблема повышения помехоустойчивости космических инфокоммуникаций определяется следующими основными её составляющими:

1) достигнутыми результатами, обеспечивающими достижение безусловных преимуществ по сравнению с другими известными аналогами в области их проектирования, создания и применения;

2) новыми возможностями совершенствования инфокоммуникаций в части противодействия средствам радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и обеспечения требуемых показателей помехоустойчивости и помехозащищенности;

3) различными информационными составляющими, относящимися к мониторингу той реальной ситуации, в которой перспективные инфокоммуникации должны устойчиво функционировать в условиях широкого применения средств подавления и комплексов РЭБ.

В статье рассмотрены предлагаемые инновационные технические решения, относящиеся к последним двум составляющим проблемы повышения помехоустойчивости космических инфокоммуникаций: надёжного доведения и своевременного использования информационных составляющих обеспечения планирования и успешного выполнения всех

поставленных задач в условиях информационно-технического противодействия этому со стороны вероятного противника.

Также актуальность выполненных исследований определяется современными требованиями использования искусственного интеллекта при передаче информации и управлении по каналам связи и инфокоммуникациям.

Особая научная и практическая значимость этой тематики заключается в том, что разрешение многочисленных противоречий, составляющих основу повышения помехоустойчивости и помехозащищенности инфокоммуникаций, необходимо найти в условиях многочисленных ограничений, растущего фона помех и интенсивности других негативных воздействий [Ширяев, 2023].

Для этого разработаны проблемно-ориентированные структурно-алгоритмические преобразования (САП) передаваемых значений данных и сообщений, обеспечивающие достижение комплексного технического эффекта, сочетающего в себе возможность одновременного разрешения не одного, а нескольких противоречий.

В этом случае создают новую научно-методическую платформу для повышения помехоустойчивости и помехозащищенности инфокоммуникаций на основе гибридного искусственного интеллекта (ГИИ).

При этом активно используемый в настоящее время искусственный интеллект (ИИ) дополняют естественным, которым обладает человек.

Поэтому необходимо переходить к следующему шагу развития ИИ, ориентированному на его обогащение многими приёмами, которые существуют в багаже естественного интеллекта. В их числе различного рода «хитрости», к которым прибегает человек при разрешении противоречий, в том числе кажущихся неразрешимыми в соответствии с существующими теориями. В этом также заключаются побудительные мотивы и совершенствования самих теорий, многие из которых переживают период «застоя».

Основная часть

В качестве примера проявления «застоя» всё чаще приводят и теорию помехоустойчивого кодирования передаваемой информации [Блейхут, 1986]. Всё это может показаться парадоксальным на фоне того грандиозного успеха, которого человечество добилось в плане развития инфо-телекоммуникационных систем (ИТКС). Сделаны фундаментальные открытия К. Шеннона, В.А. Котельникова, Н. Винера и многих других выдающихся учёных. При этом К. Шеннон показал, что для кардинального решения проблемы надёжной передачи данных необходимо кодирование сообщений.

Его теоремы показывают, что при этом информация по каналам связи, в которых действует шум, может передаваться со сколь угодно высокой степенью достоверности при условии, что скорость передачи не превышает некоторой величины, зависящей от статистических свойств шума и сигналов. Её называют пропускной способностью канала связи. Но для этого необходимо было использовать коды большой длины (n), что входит в противоречие с возможностью их реализации в практических приложениях. При больших значениях n список кодовых слов, который необходимо иметь на передающей и приёмной сторонах, становится необозримо большим [Фомин, 1980].

Появилась теория линейных кодов, использующих теорию Э. Галуа, адаптированную к синтезу алгебраических помехоустойчивых кодов. В их числе блочные и свёрточные коды [Никитин, 2001].

Однако быстрый рост скоростей передачи информации и появляющиеся вследствие этого требования к повышению оперативности декодирования привели к тому, что в настоящее время основная функция помехоустойчивых кодов, связанная с исправлением ошибок передачи, не используется.

При этом признаки начавшегося кризисного периода в развитии помехоустойчивых кодов проявляются в следующем:

1) задача использования избыточных контрольных (проверочных) символов стала сводиться к её частному примитивному варианту – определению несовпадения контрольных сумм, полученных при передаче и после приёма передаваемых кодовых последовательностей (при появлении таких признаков по обратному каналу связи передаётся требование повторения передачи информации, принадлежащей этому интервалу времени, в результате чего временные показатели ИТКС могут превышать допустимые их значения);

2) известные методы помехоустойчивого кодирования имеют границу работоспособности, которая определяется вероятностью искажения бит $P_b > 10^{-2}$ (две ошибки, приходящиеся на 100 переданных бит), а в существующих наилучших условиях передачи информации по космическим каналам связи показатель P_b уже приблизился к $P_b = 10^{-3}$, при этом в каналах связи управления он уже в условиях РЭБ принимает значения $P_b = 10^{-1}$.

Поэтому нужны коды нового поколения и информационные технологии их применения, обеспечивающие возможность расширенного приспособления ИТКС к изменяющимся условиям передачи данных.

Показано, что для этого необходимо разработать значительное множество различных подходов, приёмов, методов и информационных технологий, использование которых позволило бы вывести системы передачи данных (СПД) на новый уровень их развития [Кукушкин, Гладков, Чаплинский, 2008]. Такая возможность появляется при использовании разработанных методов нетрадиционного дополнительного кодирования передаваемой информации, обеспечивающего переход к более экономичным системам представления данных и сообщений.

При этом особое внимание уделено вопросам учета всех специфических особенностей как передаваемой информации, так и появляющихся новых, более жёстких условий, которые связаны с ограниченной пропускной способностью каналов связи и повышением требований к достоверности и полноте получаемой информации.

Основная проблема передачи информации заключается в условиях ограничений на пропускную способность каналов связи и повышения интенсивности помехового фона, действия которого неконтролируемо приводят к ещё более значительным препятствиям при решении задач повышения полноты, точности, достоверности и оперативности при получении информации.

Существующую научно-методическую основу решения проблем передачи информации составляет классическая теория помехоустойчивого кодирования [Борисов, Зинчук, 2009].

То, что она не вполне отвечает потребностям практики, известно давно. Эти мысли высказывались выдающимся отечественным учёным Л.М. Финком [Финк, 1963], которому принадлежит идея непрерывных свёрточных кодов, и его ученику С.А. Осмоловскому [Левин, Плоткин, 1982].

Также следует отметить, что классическое помехоустойчивое кодирование не обладает возможностью приспособления к специфическим особенностям передаваемой информации и изменяющимся условиям передачи. А это основное условие, которое связано с «искусственным интеллектом» систем передачи данных (СПД).

Предлагаемые технические решения связаны с внедрением в существующую теорию и практику элементов искусственного интеллекта, источником синтеза которых становится разработанный прикладной математический аппарат конструктивной теории конечных полей.

Технические решения нетрадиционного представления передаваемых данных в системе остаточных классов и их основные отличительные особенности

В настоящее время по каналам связи передаются цифровые данные с требованиями, предъявляемыми к повышению полноты, целостности и достоверности передаваемой информации. Возможность удовлетворения этим требованиям на основе известных методов и технологий практически исчерпана.

При этом, как и ранее, основным средством борьбы с помехами остаётся применение помехоустойчивого кодирования.

В настоящее время разработано множество различных проблемно-ориентированных направлений совершенствования помехоустойчивого кодирования. Одно из них связано с нетрадиционным представлением данных и сообщений образами-остатками. Особенностью такого дополнительного кодирования и появляющихся при этом новых свойств является то, что значения X_i передаваемых данных телеметрий (ТИ), представленных ($N = 2n$) – разрядными двоичными словами, где $N = 10$, а $n = 5$, и результаты дополнительного их кодирования $C_i = \langle b_{1i} \pmod{m_1}, b_{3i} \pmod{m_3} \rangle_2$ (здесь обозначение $\langle . \rangle_2$ является свидетельством использования двоичного кодирования), которые получены путём формального объединения образов-остатков: $b_{1i} \pmod{m_1}$ и $b_{3i} \pmod{m_3}$ в новое кодовое слово с той же разрядностью представления $N = 2n$. Здесь также необходимо отметить присутствие в неявном виде результатов сравнения по модулю m_2 .

Ими в соответствии со свойствами двоичного кода является значение младшего n – разрядного полуслова (a_{mii}) исходного сообщения $X_i = \langle a_{cmi}, a_{mii} \rangle_2$: $a_{mii} = b_{2i} \pmod{m_2}$, где $m_2 = 2^n = 32$. При этом модули m_1 и m_3 определены равными: $m_1 = 2^n - 1 = 31$ и $m_3 = 2^n + 1 = 33$. Оптимальными они являются потому, что произведение модулей сравнения: $m_1 \times m_3 = (2^n - 1)(2^n + 1) = 2^{2n} - 1$ перекрывает диапазон ($0 - (2^n - 1)$) однозначного представления данных ($N = 2n$) – разрядными двоичными словами X_i .

При таких свойствах двоичного кода обеспечивается, на приёмной стороне, однозначное обратное восстановление значений X_i , что и требуется для реализации безызбыточного помехоустойчивого кодирования.

В случае применения предлагаемого метода дополнительного кодирования на основе системы остаточных классов (СОК), вместо традиционной формулы представления значения числа X_i , представляющего собой результат кодирования сообщений:

$$X_i = m_j l_i + b_{ji},$$

используется её сжатая запись в виде сравнения:

$$X_i \equiv b_{ji} \pmod{m_j},$$

где b_{ji} – образ-остаток, полученный в результате операции сравнения X_i по модулю m_j , он представляет собой значение остатка, полученного при делении числа X_i на число m_j , при этом символ « \equiv » означает «тождественное равенство».

В сжатой математической записи нет неполного частного l_i , присутствующего в начальной формуле. Эта особенность может быть использована и при кодировании информации: присутствующая в неявном виде при использовании существующих методов передачи информация о неполном частном l_i исключается при использовании для этой цели результата дополнительного кодирования на основе системы образов-остатков b_{ji} .

Далее в соответствии с математической теорией конечных полей [Булычев, Васильев, Кукушкин, 2016.] можно перейти, руководствуясь простейшей логикой синтеза новых инновационных информационных технологий и технических решений, к системе сравнений по нескольким модулям сравнения, например, $m_1 = 2^n - 1$, $m_2 = 2^n$, $m_3 = 2^n + 1$. Тогда вместо системы уравнений, использующей формализованное описание, получаем систему сравнений:

$$X_i \equiv b_{1i} \pmod{m_1},$$

$$X_i \equiv b_{2i} \pmod{m_2},$$

$$X_i \equiv b_{3i} \pmod{m_3}.$$

Если использовать для передачи только два образа-остатка b_{1i} и b_{3i} , то результат дополнительного кодирования $C_i = \langle b_{1i}, b_{3i} \rangle_2$ имеет ту же разрядность двоичного представления $N = 2n$, что и исходное сообщение X_i .

Результат кодирования $C_i(k\Delta T)$ составлен из их двух образов-остатков $b_{1i}(k\Delta T)$ и $b_{2i}(k\Delta T)$, где ΔT – интервал дискретизации аналогового процесса, а $k = 0, 1, 2, \dots$ – счётное множество формально объединенных в новое двоичное кодовое слово $C_i(k\Delta T) = b_{1i}(k\Delta T) \vee b_{2i}(k\Delta T)$ той же разрядности: ($N = 2n = 10$).

Особенно эффективно данный метод проявляется при обработке результатов телеметрических параметров (ТМП), когда в результате дополнительного безызбыточного кодирования результатов телеметрических измерений (ТИ) появляются новые свойства:

– метрологическая шкала ТИ (представления данных $C_i(k\Delta T)$ ($Ш = 0-1023$)) совпадает со шкалой, которая определяется разрядностью (N) кодовых слов, в то время как ее исходное значение, определяемое множеством данных $X_i(k\Delta T)$, находится в пределах $|200-380| = 180$, в результате этого разрешающая способность графического отображения ТМП повышена в $k = 1023/180 = 5,6$ раз;

– увеличено в $m_3 = 2^n + 1$ раз минимальное кодовое расстояние (d_{min}) в метрике Евклида между соседними значениями закодированных значений ТМП, заключенными между разрывами.

Увеличение минимального кодового расстояния (d_{min}) в соответствии с теорией свидетельствует о появившейся способности обнаруживать и исправлять ошибки передачи информации. Но в рассмотренном случае увеличение d_{min} произойдет не везде, а только только внутри выделенных временных интервалов, заключенных между соседними линиями. Факт появления разрыва определяют на приемной стороне на основе выполнения условий следующего неравенства:

$$\Delta C_i = |C_i - C_{i+1}| \geq 0,8 \times 2^N.$$

Внутри временных интервалов, заключенных между соседними разрывами, выполняется уникальное свойство групповой равноостаточности. Оно заключается в том, что любое правильно принятое дополнительно закодированное значение сообщения C_i , принадлежащее выделенному временному интервалу, будучи поделенным на минимальное кодовое расстояние d_{min} , даст один остаток ζ_i ($\zeta_i = \text{Const}$), если оно не было искажено при передаче.

В общем случае при наличии помех, а также искажений, которые вызваны этими помехами, остатки от деления значений $C_i^* = C_i + \varepsilon_i$, где ε_i – ошибка, на d_{min} становятся случайными величинами. Тогда свойство равноостаточности, соответствующее $\zeta_i = \text{Const}$ для детерминированного случая (случае отсутствия помех, определяется как мода распределения ζ_i^* : $Mo[\zeta_i^*]$). В результате этого из потока принимаемых дополнительно закодированных значений C_i^* выделяют своеобразный эталон (инвариант) в виде $Mo[\zeta_i^*]$, имеющий такую же синхронную форму представления, как и значения параметров $X_i(k\Delta T)$ и $C_i(k\Delta T)$. Благодаря чему местоположение ошибки точно устанавливается, а она сама в последующем исправляется.

Выделенный таким образом инвариант становится основным элементом внедрения в систему передачи данных (СПД) искусственного интеллекта. Основой для его появления становится естественный интеллект человека, подкрепленный математическими методами нетрадиционного представления данных и сообщений в системе остаточных классов.

Изображение эффекта, получаемого при применении разработанных методов и технологий дополнительного безызбыточного кодирования информации в системе остаточных классов, представлено на рисунке.

Левая часть иллюстраций, приведенных на рисунке, показывает новые возможности обнаружения и исправления ошибок при приеме данных телеметрий, искаженных помехой. Контролируемый параметр (вверхний график) в условиях искажения мощной помехой оказывается ненаблюдаемым, но использование при декодировании свойств групповой равноостаточности позволило обнаружить и исправить 86 % ошибок (нижний график) передачи [Ширяев, 2024].

Кроме того, использование другого свойства, появляющегося при дополнительном кодировании информации в СОК, позволяет контролировать достоверность данных телеметрий, полученных после восстановления на основе определения абсолютных разностей первого и второго порядков, которые определяют по отношению к значениям образов-остатков: вначале $b_{1i} (\text{mod } m_1)$ и $b_{3i} (\text{mod } m_3)$, а затем и после подключения к процессу обработки данных $b_{2i} (\text{mod } m_2)$.

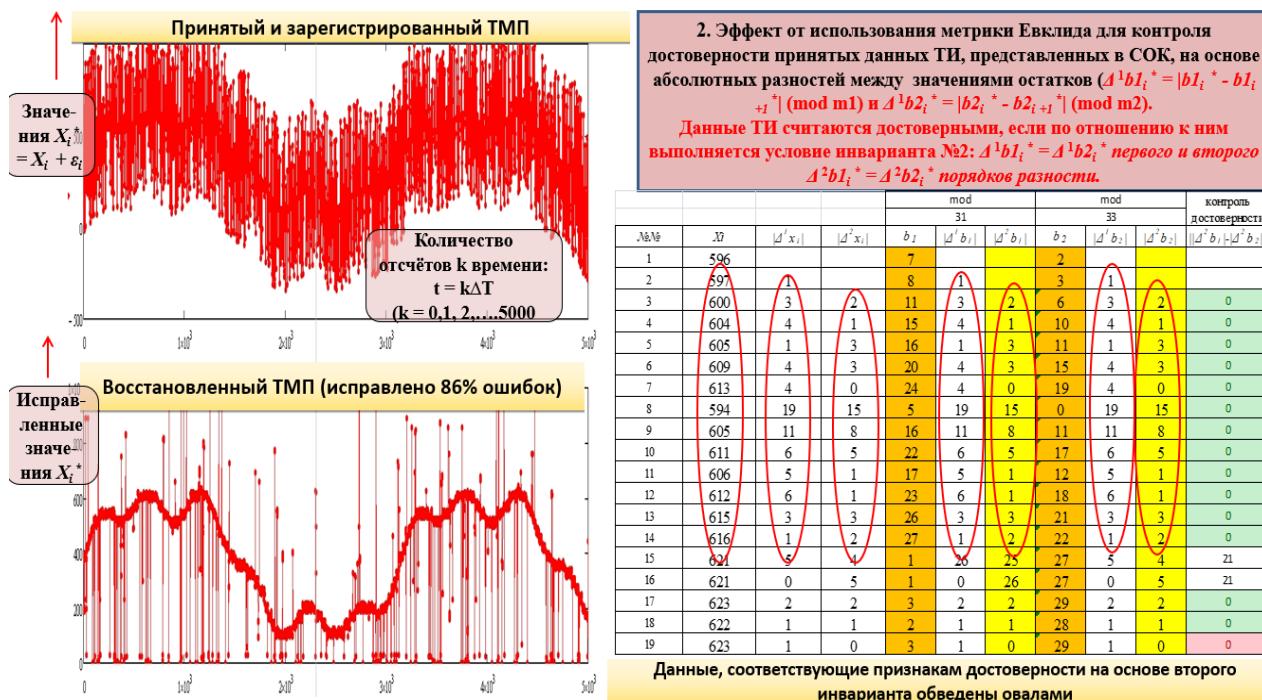


Иллюстрация новых возможностей применения разработанных методов дополнительного безызбыточного кодирования информации
 Illustration of new possibilities for applying the developed methods of additional non-redundant information

Заключение

В статье предлагается использование свойств самой передаваемой информации для повышения помехоустойчивости передаваемой информации и эффективности борьбы с помехами, что является обновлением теории чисел и теории Э. Галуа [Сакалема, 2015].

В статье показано, что известное в теории чисел свойство равноостаточности, проявляющееся в том, что различные по величине числа, будучи поделенными на одни и тот же модуль сравнения, дают один и тот же остаток, было использовано в практических приложениях, связанных с повышением помехоустойчивости инфокоммуникаций и помехозащищённости передаваемой информации.

При этом отсутствуют противоречия, когда вместо целенаправленно вводимых символов двоичного кода используют естественную избыточность самой передаваемой цифровой информации.

Полученные результаты могут использоваться для совершенствования искусственного интеллекта. Для чего развиваются идеи нетрадиционных технических решений, существенно развивающих теоретические и научно-методические положения, составляющие основу обеспечения и повышения помехоустойчивости различных инфокоммуникаций и радиоканалов.

Список литературы

- Блейхут Р. 1986. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. М.: Мир: 576.
 Борисов В.И., Зинчук В.М. 2009. Помехозащищенность систем радиосвязи М., Наука: 358.
 Булычев Ю.Г., Васильев В.В., Кукушкин С.С. 2016. Информационно-измерительное обеспечение натурных испытаний сложных технических комплексов. М.: Машиностроение, Полет: 440.
 Кукушкин С.С., Гладков И.А., Чаплинский В.С. 2008. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем. М.: МО РФ: 327.
 Левин Л.С., Плоткин М.А. 1982. Цифровые системы передачи информации. М.: Радио и связь: 216.
 Никитин Г.И. 2001. Сверточные коды: Учеб. Пособие СПбГУАП. СПб.: 80.
 Осмоловский С.А. 2004. Помехоустойчивое кодирование: кризис и пути выхода из него. *Вестник РУДН. Серия Прикладная и компьютерная математика*. 3(1): 161–169.

- Сакалема Д.Ж. 2015. Подвижная радиосвязь под ред. О.И. Шелухина. М.: Горячая линия. Телеком: 512.
- Финк Л.М. 1963. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. Радио: 576.
- Фомин С.В. 1980. Системы счисления. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы: 48.
- Ширяев А.А. 2023. Анализ методов повышения эффективности систем передачи данных в беспроводных информационных коммуникациях. Сборник статей Межвузовского международного конгресса «Высшая школа: научные исследования», Москва: 138.
- Ширяев А.А. 2024. Разработка методов обеспечения помехоустойчивости космических инфокоммуникаций на основе кодирования в системе остаточных классов. Материалы диссертации, изд-во НИУ БелГУ: 103.

References

- Bleichut R. 1986. Theory and Practice of Error-Correcting Codes. M.: Mir: 576.
- Borisov V.I., Zinchuk V.M. 2009. Interference Immunity of Radio Communication Systems. Moscow, Nauka: 358.
- Bulychev Yu.G., Vasilyev V.V., Kukushkin S.S. 2016. Information and Measurement Support for Field Tests of Complex Technical Systems. Moscow: Mashinostroenie, Polet: 440.
- Kukushkin S.S., Gladkov I.A., Chaplinsky V.S. 2008. Methods and Information Technologies for Monitoring the State of Dynamic Systems. Moscow: Ministry of Defense of the Russian Federation: 327.
- Levin L.S., Plotkin M.A. 1982. Digital Information Transmission Systems. Moscow: Radio and Communications: 216.
- Nikitin G.I. 2001. Convolutional Codes: Textbook. St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. St. Petersburg: 80.
- Osmolovsky S.A. 2004. Noise-resistant coding: crisis and ways out of it. *Bulletin of RUDN. Series Applied and Computer Mathematics*. 3(1): 161–169.
- Sakalema D.J. 2015. Mobile Radio Communication, edited by O.I. Shelukhin. Moscow: Goryachaya Liniya. Telecom: 512.
- Fink L.M. 1963. Theory of Discrete Message Transmission. M.: Sov. Radio: 576.
- Fomin S.V. 1980. Number Systems. M.: Nauka. Main Editorial Board of Physical and Mathematical Literature: 48.
- Shiryaev A.A. 2023. Analysis of Methods for Improving the Efficiency of Data Transmission Systems in Wireless Information Communications. Collection of Articles of the Interuniversity International Congress "Higher School: Scientific Research", Moscow: 138.
- Shiryaev A.A. 2024. Development of methods for ensuring the noise immunity of space infocommunications based on coding in the residual class system. Dissertation materials, Belgorod State University: 103.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 02.10.2025
Поступила после рецензирования 28.11.2025
Принята к публикации 02.12.2025

Received October 02, 2025
Revised November 28, 2025
Accepted December 02, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ширяев Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических систем Института радиоэлектроники и информатики, Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), г. Москва, Россия

Кукушкин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, главный научный эксперт НИИ КС имени А.А. Максимова, г. Королёв, Московская обл., Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. Shiryaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Systems at the Institute of Radioelectronics and Computer Science, Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia

Sergey S. Kukushkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Chief Scientific Expert at A.A. Maksimov Research Institute of Space Systems, Korolev, Moscow region, Russia

Кукушкин Леонид Сергеевич, научный сотрудник АО «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», г. Рязань, Россия

Олейник Иван Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Leonid S. Kukushkin, Researcher at the Ryazan Production and Technical Enterprise Granit, Ryazan, Russia

Ivan I. Oleynik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia