

УДК 623.76

DOI 10.52575/2687-0932-2023-50-2-465-475

Методы обработки информации при построении высокопроизводительных аппаратных систем на основе распараллеливания потоков передаваемых данных

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

¹ Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,

Россия, 141070, г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4

² Научно-исследовательский институт космических систем имени А.А. Максимова - филиал акционерного общества «Государственный космический центр имени М.В. Хруничева»,
Россия, 141092, г. Королёв, ул. Тихонравова, д. 27, мкр. Юбилейный

³ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

E-mail: a.shyriaev@mail.ru, adaptermetod@mail.ru, oleinik_i@bsu.edu.ru

Аннотация. Проблема построения высокопроизводительных аппаратных систем и систем обработки поступающей информации приобретает особую актуальность при создании новой перспективной ракетно-космической, военной и специальной техники (ВСТ) с высоким уровнем искусственного интеллекта, функционирующей в условиях помех различного происхождения. Основу разработки новых технологий составляют математические конструктивные теории и методы нового более высокого уровня по сравнению с теми, что используются в настоящее время. Статья посвящена разработке новых методов, ориентированных на распараллеливание потоков передаваемых сообщений на основе нетрадиционного представления данных образами-остатками. Показано, что такая технология способствует повышению оперативности вычислений, обеспечению помехоустойчивости и контролю достоверности получаемых данных в системе остаточных классов (СОК). Отличительная особенность разработанных инновационных технологий заключается в возможности их реализации программными методами путем дополнительного перепрограммирования ПЛИС, микроконтроллеров и микропроцессоров, используемых в ВСТ нового поколения. В результате появляется возможность существенного повышения помехоустойчивости беспроводных информационных коммуникаций и каналов связи, а также производительности существующих систем представления, передачи и обработки информации.

Ключевые слова: передача информации в условиях помех, дополнительное кодирование замещающим троичным кодом, ограничения и возможности существующих информационных технологий, информационная безопасность и помехоустойчивость беспроводных информационных коммуникаций и инфотелекоммуникационных систем

Для цитирования: Ширяев А.А., Кукушкин С.С., Олейник И.И. 2023. Методы обработки информации при построении высокопроизводительных аппаратных систем на основе распараллеливания потоков передаваемых данных. Экономика. Информатика, 50 (2): 465–475. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-465-475

Information Processing in the Construction of High-Performance Hardware Systems Based on Parallelization of Transmitted Data Streams

¹ Alexey A. Shiryayev, ² Sergey S. Kukushkin, ³ Ivan I. Oleinik

¹ Joint Stock Company "Central Research Institute of Machine Building",
4 Pionerskaya St, Korolev, 141070, Russia

² Research Institute of Space Systems named after A.A. Maksimov - filial of the Joint-Stock Company "State Space Center named after M.V. Khrunichev",
27 Tikhonravova St, , md. Jubilee, Korolev, 141092, Russia

³ Belgorod State National Research University,
85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: a.shyriaev@mail.ru, adaptermetod@mail.ru, oleinik_i@bsu.edu.ru

Abstract. The problem of building high-performance hardware systems and systems for processing incoming information is becoming particularly relevant due to the need to create promising rocket and

space technology with a high level of artificial intelligence. The article is devoted to the development of new unconventional methods for building high-performance hardware systems using parallelization of transmitted data streams and their processing processes. It is shown that they should be problem-oriented, allowing to take into account the specific features of different areas of their application, the increasing level of threats to the information security of the successful functioning of the VST in various conditions, including interference of various origin. It is becoming more and more difficult to come up with them, so the basis for their synthesis should be mathematical methods of a new higher level compared to those that are known and used at the present time. The report examines the main provisions of one of the most promising proposals related to the construction of high-performance hardware systems using parallelization of data streams and their processing processes, the basis of which is the developed constructive mathematical theories. The possibilities of mathematical methods replacing them are demonstrated. In relation to high-speed telecommunication systems (TCS) they are focused on parallelizing the streams of transmitted messages and their processing processes based on an unconventional representation of data by residual images. This technology also forms the basis for improving the efficiency of calculations and monitoring the reliability of the data obtained in the system of residual classes (SOC). A distinctive feature of the developed innovative technologies lies in the possibility of their implementation by program methods based on additional reprogramming of FPGAs, micro-controllers and microprocessors that form the basis for building new-generation VST products. The result of this is the possibility of a significant increase in the performance of existing hardware, systems for the presentation, transmission and processing of the received measurement information.

Keywords: transmission of information under interference conditions, additional coding with a replacement ternary code, limitations and capabilities of existing information technologies, information security of infotelecommunication systems

For citation: Shiryayev A.A., Kukushkin S.S., Oleinik I.I. 2023. Information Processing in the Construction of High-Performance Hardware Systems Based on Parallelization of Transmitted Data Streams. Economics. Information technologies, 50(2): 465–475 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-465-475

Введение

Распараллеливание потоков передаваемых данных составляет основу для реализации многих новых технологий передачи информации. Эти технологии распараллеливания каналов передаваемых данных активно используются при передаче высокоскоростной информации по беспроводным информационным коммуникациям. Такая потребность проявляется во многих технических приложениях и, в частности, при передаче потокового видео. Один из таких вариантов распараллеливания и схема его реализации приведена на рисунке 1.

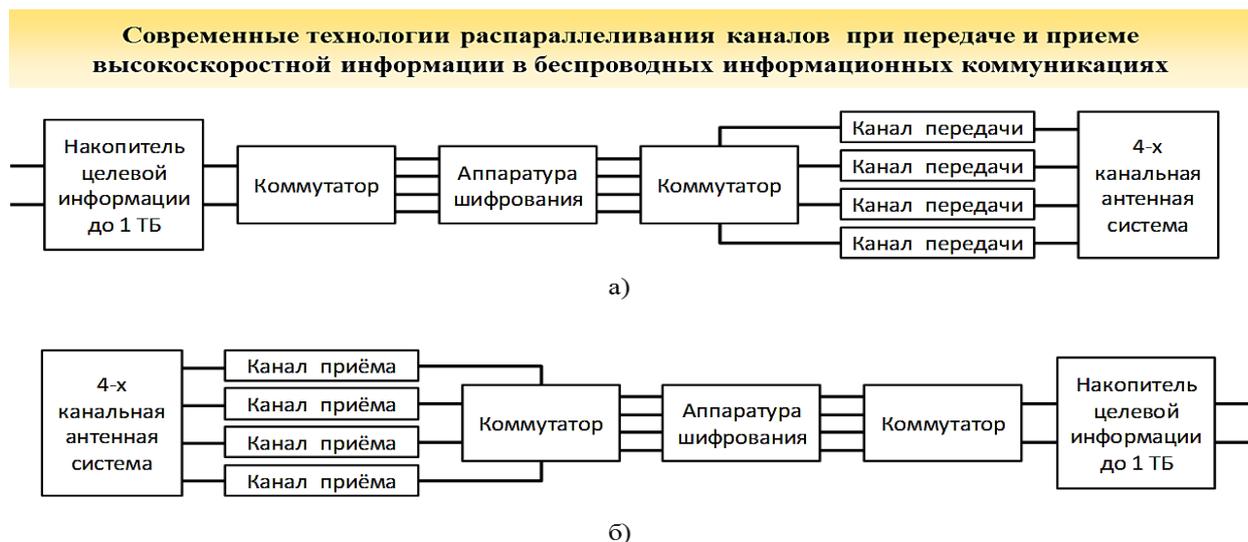


Рис. 1. Один из вариантов построения системы передачи высокоскоростной информации в беспроводных информационных коммуникациях

Fig. 1. One of the options for building a system for transmitting high-speed information in wireless information communications

Современные технологии предполагают разделение на борту КА ДЗЗ исходного цифрового потока информации, поступающего с высокой скоростью – более 1 Гбит/с на несколько частей. Исходный поток двоичных символов большого объема сначала разделяют на 2 полупотока (четных и нечетных бит), а затем каждый из них так же делят на 2 подпотока. В результате этого деления длительность битов каждого из каналов увеличивают в 4 раза, но они так же, как и при квадратурной модуляции К. Феера, не связаны аналитически между собой. Необходимость распараллеливания каналов связана с тем, что производительность современных ПЛИС в 2-3 раза меньше значения, определяемого требуемой скоростью передачи информации. Но если для распараллеливания использовать представление исходных данных и сообщений образцами-остатками, полученными при использовании 4-х модулей сравнения m_j , то сбои в одном из каналов могут быть восполнены за счет других каналов передачи и приема высокоскоростной информации в беспроводных информационных коммуникациях.

Однако созданию эффективных систем передачи данных по высокоскоростным беспроводным информационным коммуникациям и радиоканалам препятствуют многие нерешенные проблемы [Макклеллан 1983, Блейхут 1986, Лидл 1988]. Одна из них заключается в том, что в условиях существующих ограничений повышение скорости передачи становится возможным только за счет понижения качества получаемой информации, определяемого, прежде всего, показателями ее помехоустойчивости, достоверности, полноты и достаточности [Гладков 2008, Кукушкин 2009].

Формализованная постановка проблемы передачи информации по высокоскоростным беспроводным информационным коммуникациям и радиоканалам



Рис. 2. Формализованная постановка научной проблемы передачи информации
 Fig. 2. Formalized formulation of the scientific problem of information transfer

Из нее следует, что одним из приемов, позволяющим как-то снизить негативное влияние ограничений на достижение ожидаемых результатов, становится распараллеливание потоков передаваемых данных.

Один из известных приемов распараллеливания цифровых сигналов связан с преобразованием Гильберта [Былински 1980, Фомин 1980]. Его суть заключается в таком разделении

исходного цифрового сигнала, при котором формируется «квадранта» $Q(t)$, представляющая собой сигнал, сдвинутый относительно исходного $I(t)$ на угол (фазу) 90° . Затем их значения возводят в квадрат $I(t)^2$ и $Q(t)^2$ и суммируют: $Z(t)^2 = I(t)^2 + Q(t)^2$, в результате чего получают сигнал $Z(t)$, который называют *комплексной огибающей* исходного сигнала. Одна из возможных реализаций преобразования Гильберта известна под названием метода квадратурной модуляции К. Феера [Ященко 1998, Гладков 2008]. В новой области применения (модуляции сигнала) суть преобразования Гильберта заключается в том, что любой цифровой сигнал может быть представлен в виде комбинации действительной и мнимой частей, где первое слагаемое называется *синфазной составляющей* (или I-составляющей, от англ. *in-phase*) сигнала, а второе – *квадратурной составляющей* (или Q-составляющей, от англ. *quadrature*) сигнала. Пример такой технологии, связанный с представлением фазоманипулированного сигнала двумя составляющими: *синфазной* $I(t)$ и *квадратурной* $Q(t)$ приведен на рисунке 3.

Применительно к цифровым сигналам используется простейший способ формирования *синфазной* $I(t)$ и *квадратурной* $Q(t)$ составляющих. Он предполагает деление исходного потока бит сформированного группового потока данных на четные и нечетные их последовательности. Пример такого деления приведен на рисунке 3, на котором представлен исходный поток данных, состоящий из биполярных импульсов, принимающих значения «+1» или «-1», которые при двоичном кодировании отождествляются с символами «1» и «0».

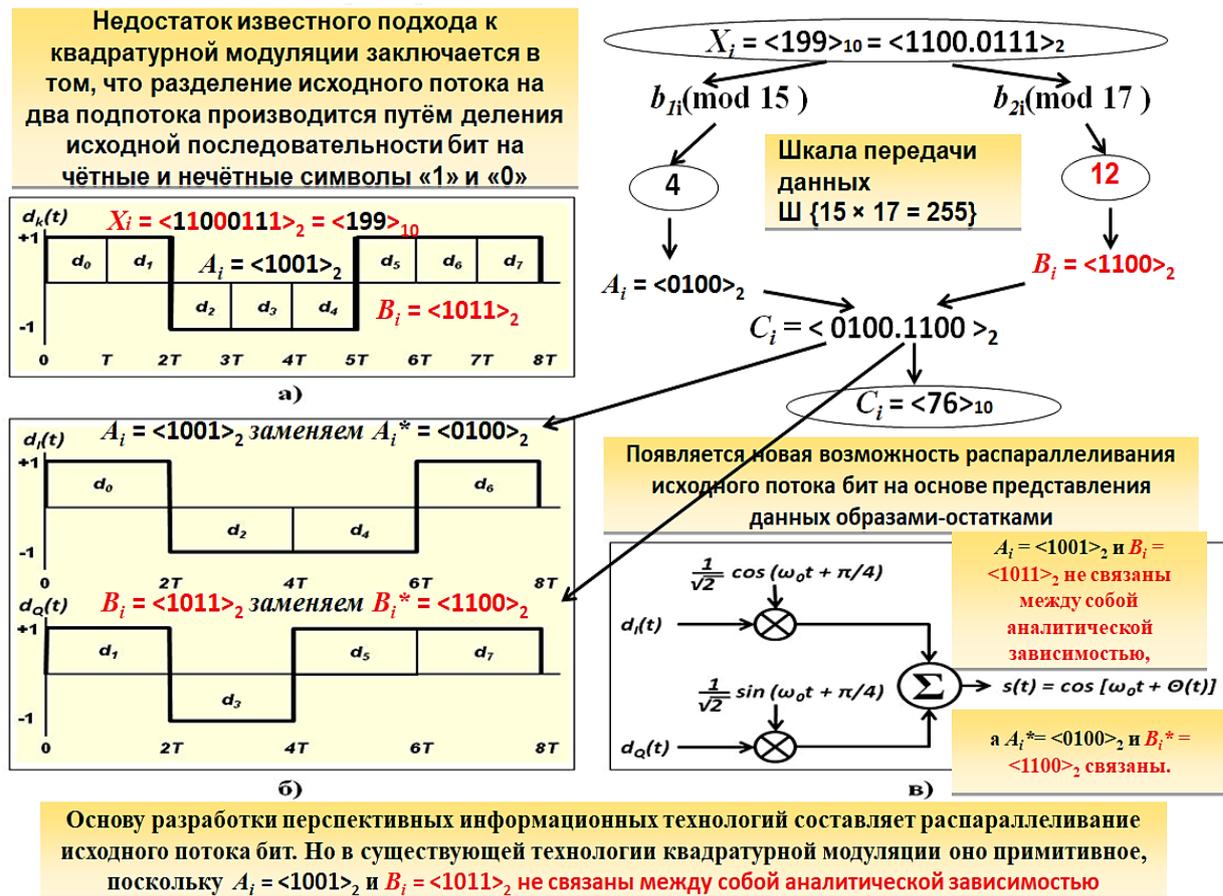


Рис. 3. Иллюстрация предлагаемой замены существующего метода распараллеливания потока символов двоичного кода при квадратурной модуляции передаваемого сигнала на предлагаемый, основу которого составляет нетрадиционное представление данных и сообщений их образами-остатками

Fig. 3. Illustration of the proposed replacement of the existing method of parallelizing the stream of binary code symbols with quadrature modulation of the transmitted signal with the proposed one, which is based on an unconventional representation of data and messages by their residual images

В известном методе [Кукушкин 2009, Кузнецов 2015] этот поток импульсов разделяют на составляющие: синфазный поток $I(t)$ и квадратурный поток $Q(t)$, как показано на рис. 3 путем его деления на четные и нечетные биты. За счет этого продолжительность передачи символов «1» и «0» в распараллеленных потоках увеличивается в 2 раза, в результате чего повышаются и показатели достоверности их приема в условиях помех.

Из иллюстрации, приведенной на рисунке 4, следует, что амплитуду высокочастотной синфазной составляющей сформированного сигнала (синий цвет) изменяют по закону $\cos(\varphi(t))$, квадратурной – на основе $\sin(\varphi(t))$ (красный цвет), а затем их суммируют $I(t)$ и квадратурный поток $Q(t)$, в результате чего получают гармонический высокочастотный сигнал, с другой круговой частотой $\cos(2\pi ft + \varphi(t))$ (зеленый цвет), который и становится переносчиком передаваемой информации. При его приеме определяют значения его фаз φ_i в моменты времени, отождествляемые с цифрами $i = 0, 1, 2, \dots$. Полученные кодовые расшифровки объединяют и таким образом восстанавливают исходную последовательность бит, которая была первоначально сформирована на передающей стороне. Также для повышения помехозащищенности восстановления переданных данных на передающей стороне синфазная составляющая при смене бит принимает значения 0° и 180° , квадратурная – 90° и 270° .

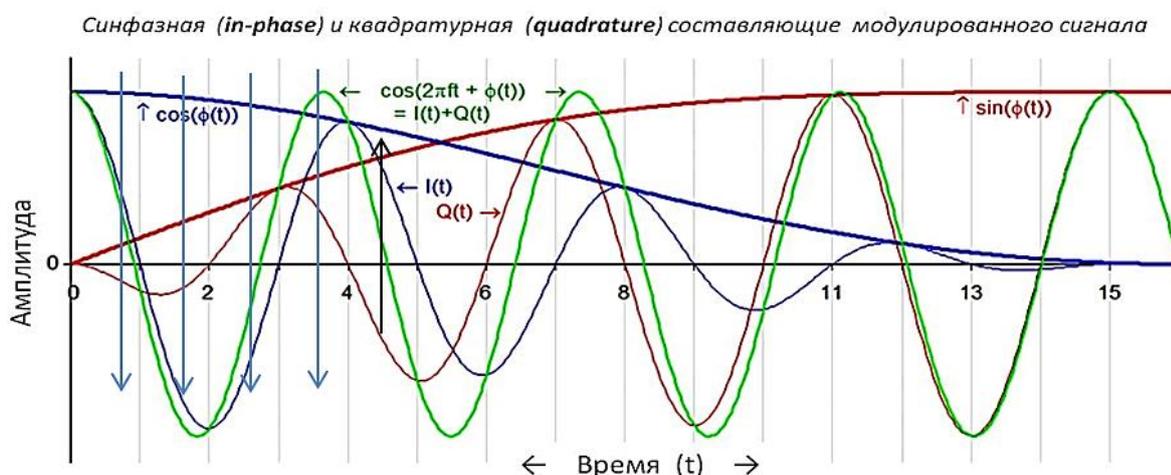


Рис. 4. Иллюстрация основополагающих принципов квадратурной модуляции подпотоков и их последующего объединения в результате суммирования перед передачей в беспроводной канал связи (в результате распаралеливания скорости поступления потоков на передающее устройство равны половине скорости передачи исходного потока)
 Fig. 4. Illustration of the fundamental principles of quadrature modulation of substreams and their subsequent combining as a result of summation before transmission to a wireless communication channel (as a result of parallelization, the streams arrive at the transmitter at half the transmission rate of the original stream)

Потом каждому из них ставят в соответствие исходные значения двух фаз синфазной и квадратурной составляющих, на основе которых и восстанавливают соответствующие им два символа двоичного кода: «1» или «0» двоичного кода (по одному для каждого из подпотоков с четными и нечетными битами). В результате этого при каждом таком определении получают одну из четырех кодовых комбинаций: $\langle 00 \rangle_2$, $\langle 01 \rangle_2$, $\langle 10 \rangle_2$ и $\langle 11 \rangle_2$. Данный метод представляет собой результат приспособления преобразования Гильберта к технологии передачи и сбора информации, позволяющей за счет распараллеливания процессов формирования модулирующих сигналов повысить эффективность использования несущей частоты радиосигнала. Поэтому он становится основным при проектировании высокоскоростных радиоканалов. Но, его недостаток заключается в том, что сформированные, отмеченным способом, подпотоки не связаны между собой аналитическими зависимостями. Поэтому сбой, хотя бы одного двоичного символа в подпотоках, может привести к размножению ошибок при приеме переданной информации [Гладков 2008, Кукушкин 2009].

Другое дело, когда распараллеливание бит будет произведено на основе определения остатков $b_{1i}(k\Delta T)$ и $b_{2i}(k\Delta T)$, которые получают в результате деления исходных данных $X_i(k\Delta T)$ на модули сравнения m_j , например, $m_1 = 2^n - 1$ и $m_2 = 2^n + 1$.

На иллюстрации, приведенной на рисунке 3, рассмотрен случай представления данных байтами (8-разрядными двочными словами ($N = 2n = 8$)), при котором каждое значение образов-остатков $b_{1i}(k\Delta T)$ и $b_{2i}(k\Delta T)$ будет представлено 4-мя разрядами двоичного кода ($n = 4$). Таким образом, будет произведено распараллеливание байтовых потоков с числом бит в каждом информационном слове $N = 8$ на два полубайтовых подпотока, каждый из которых будет представлен значениями образов-остатков $b_{1i}(k\Delta T)(\text{mod } m_1)$ и $b_{2i}(k\Delta T)(\text{mod } m_2)$. Для существующей квадратурной модуляции сигналов такая подмена окажется незамеченной, но подпотоки информации в виде синфазного потока $I(t)$ и квадратурного потока $Q(t)$, окажутся связаны между собой, поскольку исходные данные для их получения $X_i(k\Delta T)$ и модули сравнения $m_1 = 2^n - 1$ и $m_2 = 2^n + 1$ одни и те же. Но это же представление, использованное ранее, при дополнительном безызбыточном помехоустойчивом кодировании цифровых сигналов датчиков, формируемых на их выходе после аналого-цифрового преобразования (АЦП) (рисунок 3) позволяет не только обеспечивать помехоустойчивость, контролировать достоверность данных получаемой измерительной информации (ИИ) в информационно-телекоммуникационных системах (ИТКС) ВВСТ, но и корректировать обнаруженные в них ошибки [Кузнецов 2015, Кукушкин 2018]. Таким образом, возможность решения задач распараллеливания потоков передаваемых данных может быть решена на основе математических методов конструктивной теории конечных полей [Торгашев 1973, Яценко 1998, Кукушкин 2003].

Пояснению сути предлагаемого технического решения посвящена иллюстрация метода экономного (безызбыточного) кодирования данных измерений с использованием образов-остатков (рисунок 5) [Кузнецов 2015, Булычев 2016, Кукушкин 2018].

Метод дополнительного экономного помехоустойчивого кодирования данных измерений с использованием образов-остатков

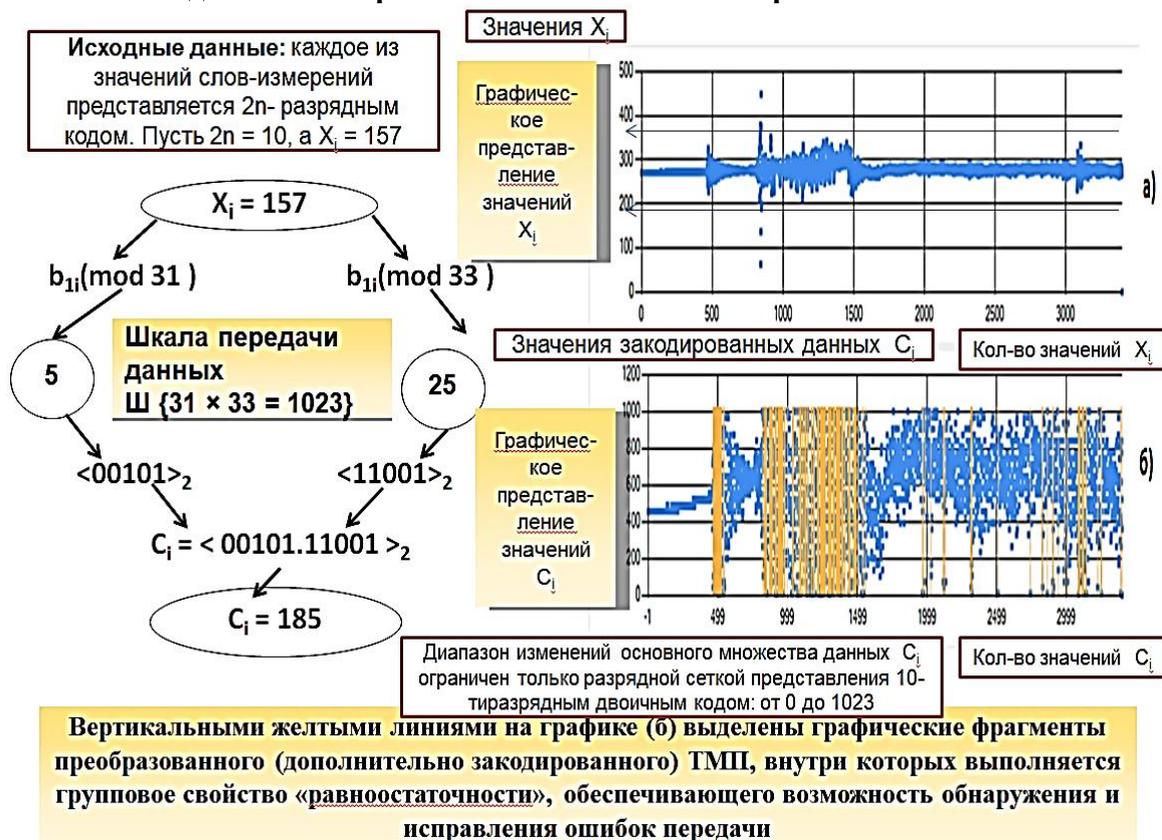


Рис. 5. Иллюстрация основных научно-методических положений разработанного метода экономного (безызбыточного) кодирования данных измерений, получаемых при летных испытаниях перспективных образцов ВВСТ, с использованием образов-остатков
 Fig. 5. Illustration of the main scientific and methodological provisions of the developed method for economical (non-redundant) coding of measurement data obtained during flight tests of advanced AMSE samples using residual images

При его использовании каждое из полученных результатов телеизмерений (ТИ) X_i , представленных на выходе датчика N -разрядным двоичным кодом ($N = 2n$), последовательно делят на значение выбранных модулей сравнения m_j , $j = 1, 2$, например, $m_1 = 2^n - 1$ и $m_2 = 2^n + 1$. Выбранные значения модулей являются оптимальными, так как их произведение $m_1 \times m_2 = (2^n - 1)(2^n + 1) = 2^{2n} - 1$ и совпадает со шкалой (Ш) представления данных телеизмерений (ТИ), представленных N -разрядным двоичным кодом. На иллюстрации (рисунок 5) представлен случай, когда значения результатов ТИ представлены 10-разрядным двоичным кодом ($N = 2n = 10$). Следовательно, $n = 5$ и выбранные оптимальные модули сравнения равны: $m_1 = 2^5 - 1 = 31$ и $m_2 = 2^5 + 1 = 33$. При этом шкала однозначного представления данных ТИ определяется как: $Ш = (0 - (2^{10} - 1)) = (0 - 1023)$. Об этом свидетельствует и графическое представление дополнительно закодированного $C_i(k\Delta T)$ телеметрируемого параметра (ТМП), исходные значения которого обозначены, как $X_i(k\Delta T)$. При этом результат кодирования $C_i(k\Delta T)$ составлен из их двух образ-остатков $b_{1i}(k\Delta T)$ и $b_{2i}(k\Delta T)$, 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: ($N = 2n = 10$).

При этом в результате дополнительного безыбыточного кодирования результатов 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 повышена в $k = 1023/180 = 5,6$ раз;

- увеличено в $m_2 = 2^n + 1$ раз минимальное кодовое расстояние (d_{\min}) между соседними значениями закодированных значений ТМП, заключенными между разрывами, выделенными вертикальными «желтыми» линиями (рисунок 5) (на выделенных временных интервалах каждое из полученных закодированных значений ТИ $C_i(k\Delta T)$ даст один и тот же остаток ξ_i ($\xi_i = \text{Const}$), если оно не было искажено).

Последнее свойство представляет собой инвариант, имеющий такую же синхронную форму представления, как и у параметров $X_i(k\Delta T)$ и $C_i(k\Delta T)$, благодаря чему местоположение ошибки точно устанавливается и, в последующем, исправляется. Выделенный таким образом, инвариант, называемый групповым свойством равноостаточности, предлагается использовать для контроля достоверности полученных результатов ТИ и сообщений, полученных по беспроводным информационным каналам и коммуникациям [Кузнецов 2015, Булычев 2016].

В результате этого при передаче высокоскоростной информации появляется новая возможность повышения качества получаемой измерительной информации (ИИ). Она связана с тем, что эту получаемую ИИ можно корректировать с целью повышения ее показателей полноты контроля, достаточности для анализа и достоверности для повышения адекватности принимаемых управляющих решений. При этом адаптивность к изменяющейся обстановке, составляющая основу интеллектуализации разрабатываемого информационно-измерительного обеспечения (ИИО) перспективных образцов ВВСТ обеспечивается за счет использования двух режимов декодирования данных ИИ на приемной стороне: «жесткого» и «мягкого». При использовании алгоритмов «жесткого» декодирования данных нет возможности обнаружения и исправления ошибок передачи результатов ТИ: он является общим и универсальным. Поэтому работа интеллектуального алгоритма «мягкого» декодирования осуществляется под управлением универсального «жесткого» алгоритма. Он определяет наличие корреляционной зависимости соседних значений результатов ТИ и если она отсутствует, то работа алгоритма «мягкого» декодирования приостанавливается. В результате на выходе такой системы будут данные, полученные только при «жестком» декодировании. При появлении корреляционной взаимосвязи соседних значений ТИ работа алгоритма «мягкого» декодирования возобновляется и производится коррекция ошибок на основе групповых свойств равноостаточности, которые появляются при нетрадиционном представлении данных образами-остатками (САП-1(о)) или при замещающем его САП (САП-1(п)), основу которого составляет разделение исходных слов-измерений на полуслова с последующей перестановкой их местами [Кукушкин 2009, Кукушкин 2018, Ширяев 2023]. Эту особенность отражает иллюстрация, приведенная на рис. 6, на которой представлена схема взаимодействия отмеченных двух алгоритмов восстановления данных ТИ с

повышенным уровнем достоверности. При этом соответствующие обратные алгоритмы восстановления ИИ имеют впереди букву «О»: ОСАП-1(ж) и ОСАП-1(м) в случаях использования алгоритма «жесткого» и «мягкого» декодирования соответственно. Использование алгоритма представления данных образцами-остатками отображается добавлением буквы «о»: ОСАП-1(ож) и ОСАП-1(ом), а перестановки полуслов буквы «п» – ОСАП-1(пж) и ОСАП-1(пм). При этом алгоритмы ОСАП-1(ом) и ОСАП-1(пм) не имеют принципиальных отличий. Различия будут проявляться только в значениях минимального кодового расстояния. В первом случае оно равно: $d_{\min} = 2^n + 1$, а во-втором - $d_{\min} = 2^n$.

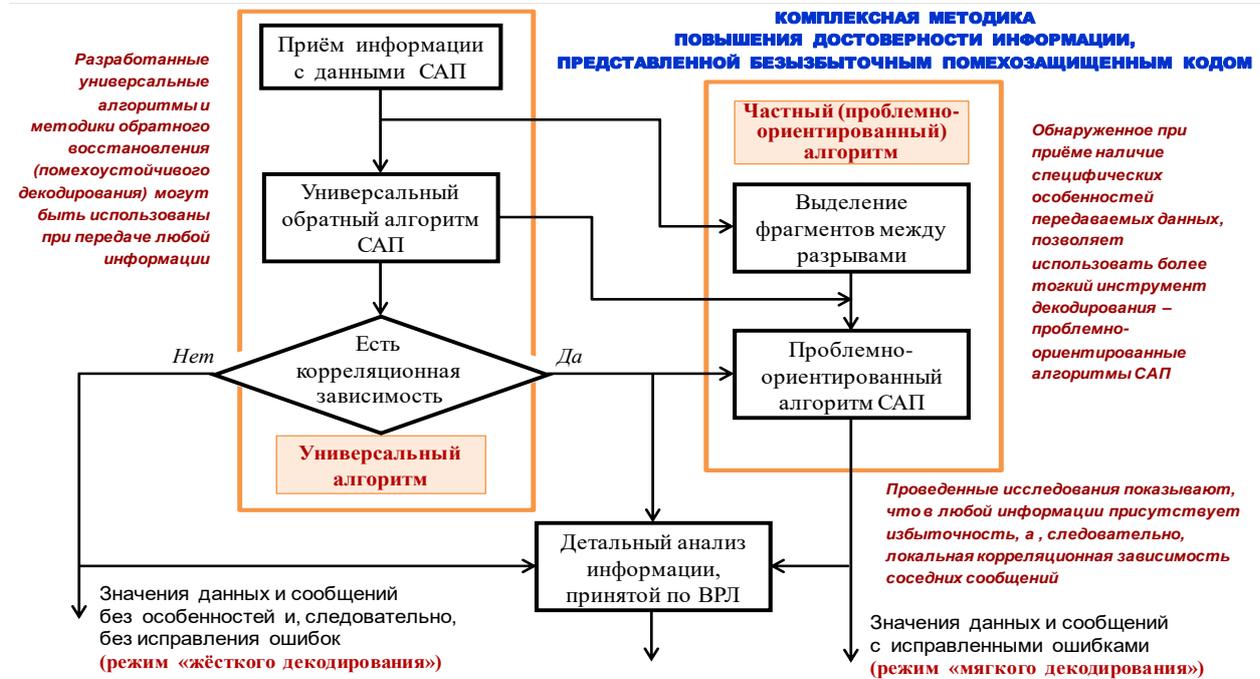


Рис. 6. Иллюстрация разработанного метода совместного использования двух алгоритмов обратного преобразования (ОСАП(ж)) и (ОСАП(м))
 Fig. 6. Illustration of the developed method for joint use of two inverse transformation algorithms (OSAP(g)) and (OSAP(m))

Рассмотренные технологии повышения помехоустойчивости ИТКС могут быть дополнены. Одно из таких предложений связано с предлагаемым переходом на этапе модуляции от двоичной системы представления данных к наиболее экономичной троичной на основе дублирующих символов $S_i(T_i)$, $i = 0, 1, 2$. В обобщенном виде такой переход представлен на рисунке 7. В результате такого кодирования в среднем, в 1,6 раза уменьшается плотность потока моментов, требующих изменения состояния несущей частоты, например, фазы при фазовой модуляции. Следовательно, дополнительно в 1,6 раза может быть увеличена скорость передачи информации при неизменных других показателях эффективности ИТКС. Суть дополнительного сжатого логического помехоустойчивого кодирования троичным кодом заключается в том, что вновь введенным дублирующим друг друга троичным символам $S_i(T_i)$, где $i = 0, 1, 2$ – позиции кода, поставлены в соответствие следующие кодовые комбинации бит, составленные из двух и трёх символов «1» и «0»: $S_0(T_0) \leftrightarrow \langle 11, 00 \rangle_2$, $S_1(T_1) \leftrightarrow \langle 10, 001 \rangle_2$ и $S_2(T_2) \leftrightarrow \langle 101 \rangle_2$ [Кузнецов 2015, Ширяев 2023]. При формировании троичного кода использовано следующее правило обеспечения взаимосвязи между дублирующими символами $S_i(T_i)$, $i = 0, 1, 2$ троичного кода. Последний бит, двоичного потока данных, полученный при предыдущей расшифровке символа $S_i(T_i)$, является первым при расшифровке следующего за ним троичного символа.

В результате этого формируют два уровня разбиений K_1 и K_2 , используемых при перекодировании двоичного кода в предлагаемый троичный код. Эта особенность кодирования проиллюстрирована на рисунке 7.

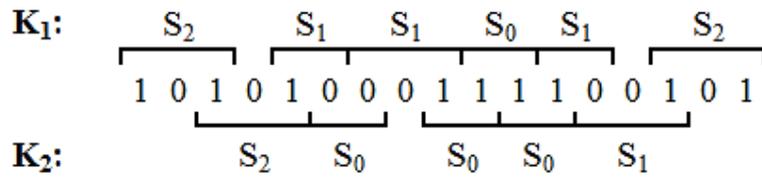


Рис. 7. Иллюстрация основополагающих принципов замены исходного двоичного кода рекуррентным логическим трехосновным кодированием
 Fig. 7. Illustration of the fundamental principles of replacing the original binary code with a recurrent logical three-base coding

Дополнительные резервы, которые предлагается использовать при разработке высокоэффективных методов обеспечения помехоустойчивости беспроводных информационных коммуникаций на основе математических методов синтеза новых сигнально-кодовых конструкций

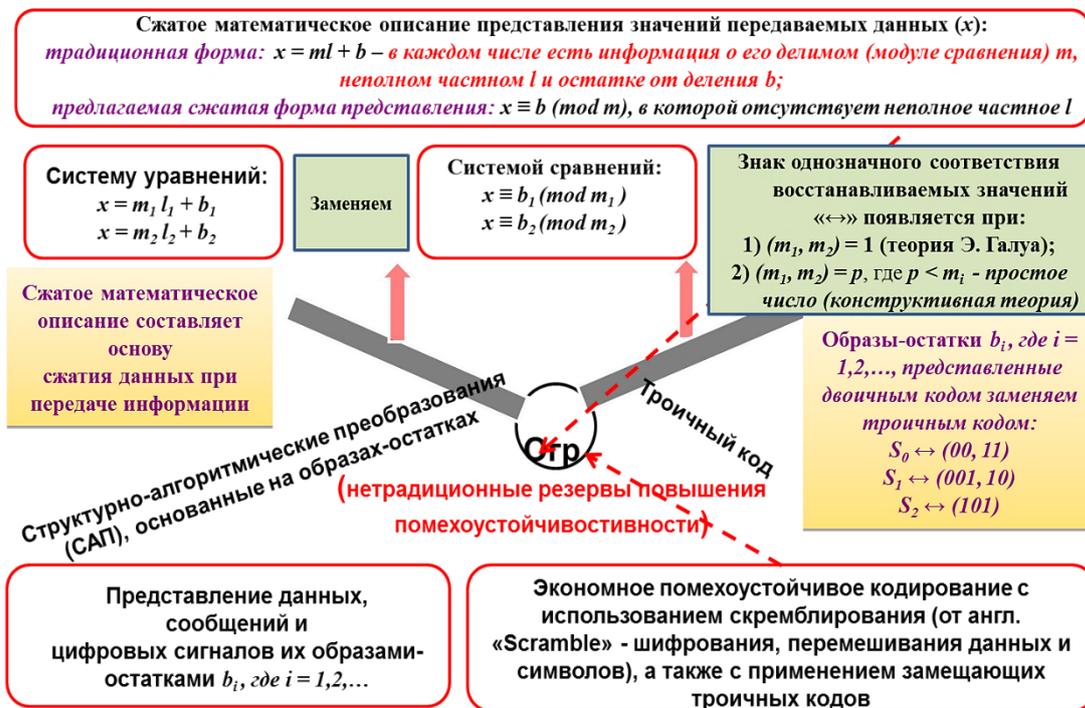


Рис. 8. Разработанные предложения, связанные использованием новых структурно-алгоритмических преобразований, основанных на образах-остатках с одновременным последующим переходом от традиционного двоичного кода к сжатому логическому помехоустойчивому троичному кодированию
 Fig. 8. Developed proposals related to the use of new structural-algorithmic transformations based on residual images with a simultaneous subsequent transition from the traditional binary code to compressed logical error-correcting ternary coding

После этого полученные троичные символы при двух уровнях кодирования объединяют в единый поток символов, которые используют для модуляции сигнала. Выбор такого информационного сечения определяется тем, что при модуляции нет жестких ограничений на количество позиций символов передаваемого кода. Об этом, в частности, свидетельствуют новые технологии квадратурной модуляции, когда используется множество разрешенных позиций при модуляционном кодировании передаваемой информации.

Объединенные на выходе кодера двух сформированных соседних информационных импульса будут отличаться тем, что они могут принимать одно из трёх разрешённых уровней амплитуды, соответствующие амплитудно-импульсной модуляции (АИМ₃). Кроме того, временной интервал между ними также может принимать только три значения: T_0, T_1

$= 1,5T_0$ и $T_2 = 2T_0$, где T_0 – длительность символов «1» и «0» в исходном двоичном потоке передаваемых данных. В результате этого АИМ₃ будет продублирована вторым видом широтно-импульсной модуляции (ШИМ₃). При этом, помимо дублирования передаваемой информации при её импульсной модуляции, обеспечивают при приёме контроль наличия ошибок [Булычев 2016, Кукушкин 2018, Ширяев 2023].

Выводы

Рассмотренные математические основы построения высокопроизводительных аппаратных систем позволяют синтезировать различные структурно-алгоритмические преобразования (САП-1) передаваемой и получаемой информации. Получаемые при этом результаты представления передаваемой информации в канале связи новыми сигнально-кодowymi конструкциями обладают целым рядом преимуществ.

Во-первых, при нетрадиционном представлении данных образами-остатками появляется возможность обеспечивать помехоустойчивость и контролировать достоверность данных получаемой измерительной информации и ее повышения за счет дополнительных методов обработки ИИ. Кроме того, на последующем этапе САП-2 перехода от двоичного кода к замещающему сжатому представлению информации на основе троичного кодирования впервые получили возможность обнаружения и исправления некоторых ошибок передачи на самом раннем символьном уровне (между двумя соседними символами $S_2(T_2)$ может находиться только чётное число других символов $S_1(T_1)$) [Кузнецов 2015, Ширяев 2023].

Во-вторых, переход к замещающему троичному кодированию составляет основу выделения из принимаемых кодовых конструкций дополнительного хронизирующего колебания, которое необходимо для повышения точности системы синхронизации передаваемых и получаемых потоков информации, а также для уменьшения фазовых дрожаний в беспроводных информационных линиях связи и коммуникаций при регенерации сигналов в пунктах регенерации.

В-третьих, троичная логика формирования сигналов в каналах связи обладает большими функциональными возможностями (функционально она является более полной по сравнению с двоичным кодированием информации). Если в двоичной системе счисления существует только одна операция логическая «НЕ», которая меняет символ «0» на символ «1» и, наоборот, то в троичной системе кодирования должны быть три элемента «НЕ». Один из них отвечает за инверсию символа «1» в символ «-1» (в нашем примере «1» и «2»), второй переход символа «1» в символ «0». [Кузнецов 2015, Кукушкин 2018, Ширяев 2023].

Таким образом, внедрение новых методов САП передаваемой информации позволяет значительно повысить помехоустойчивость беспроводных информационных коммуникаций и эффективность ИТКС программными методами без существенных доработок существующих аппаратных средств.

Разработанные математические методы позволили синтезировать множество различных технических решений, на которые получены за последние 5 лет более 10 патентов на изобретения.

Список литературы

- Блейхут Р. 1986. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. М.: Мир, 576 с.
- Булычев Ю.Г., Васильев В.В., Кукушкин С.С. и др. 2016. Информационно-измерительное обеспечение натуральных испытаний сложных технических комплексов. М.: Машиностроение-Полет, 440 с.
- Былински П., Ингрэм Д. 1980. Цифровые системы передачи. Перевод с англ., под ред. А.А. Венцеля, М.: «Связь», 360 с.
- Гладков И.А., Кукушкин С.С., Чаплинский В.С. 2008. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем. М.: МО РФ, 327с.
- Кузнецов В.И., Кукушкин С.С. Способ передачи телеметрической информации, адаптированный к различным ситуациям при испытаниях ракетно-космической техники, и система для его осуществления (Патент № 2571584, опублик. 20.12.2015г., бюл. №33).
- Кукушкин С.С. 2009. Математические методы преобразования и обработки измерительной информации при испытаниях и штатной эксплуатации ракетно-космической техники. М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 276 с.
- Кукушкин С.С. 2003. Теория конечных полей и информатика, т. 1: «Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках». М: Минобороны РФ, 376 с.

- Кукушкин С.С. Способ первичной обработки информации с обнаружением и исправлением ошибок передачи (Патент № 2658795, опубл. 22.06.2018, бюл. №18).
- Лидл Р., Нидеррайтер Г. 1988. Конечные поля. В 2-х томах. Пер с англ. М.: Мир, 882с.
- Макклеллан Дж., Рейдер Ч. 1983. Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов/ Пер. с англ. М. Радио и связь. 376 с.
- Торгашев В.А. 1973. Система остаточных классов и надежность ЦВМ. М.: Сов. Радио, 120 с.
- Фомин С.В. Системы счисления. 1980. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 48 с.
- Ширяев А.А., Кукушкин С.С., Борискин С.С., Оберемко А.Г., Кукушкин Л.С. Способ сжатого помехоустойчивого кодирования данных для передачи и хранения информации (Патент № 2789785 С1 09.02.2023, бюл. № 7).
- Ященко В.В. 1998. Введение в криптографию. М., МЦНМО, 271 с.

References

- Blahut R. 1986. Theory and practice of error control codes. M.: Mir, 576p. (in Russian)
- Bulychev Yu.G., Vasiliev V.V., Kukushkin S.S. et al. 2016. Information-measuring support of full-scale tests of complex technical complexes, M.: Mashinostroenie-Flight, 440 p. (in Russian)
- Bylinsky P., Ingram D. 1980. Digital transmission systems /Translated from English, edited by A.A. Wenzel, Moscow: «Svyaz», 360 p. (in Russian)
- Fomin S.V. 1980. Number systems. M.: Science. Main edition of physical and mathematical literature, 48 p.
- Gladkov I.A., Kukushkin S.S., Chaplinsky V.S. 2008. Methods and information technologies for monitoring the state of dynamic systems. M.: MO RF, 327 p. (in Russian)
- Kukushkin S.S. 2009. Mathematical methods of transformation and processing of measuring information during testing and regular operation of rocket and space technology. M.: VA RVSNI im. Peter the Great, 276 p. (in Russian)
- Kukushkin S.S. 2003. Theory of finite fields and computer science, vol. 1: «Methods and algorithms, classical and non-traditional, based on the use of the constructive remainder theorem». Moscow: Ministry of Defense of the Russian Federation, 376 p. (in Russian)
- Kukushkin S.S. Method of primary information processing with detection and correction of transmission errors (Patent No. 2658795, publ. 22.06.2018, bul. No. 18). (in Russian)
- Kuznetsov V.I., Kukushkin S.S. A method of transmitting telemetric information adapted to various situations during tests of rocket and space technology, and a system for its implementation (Patent No. 2571584, publ. 20.12.2015, byul. No.33). (in Russian)
- Lidl R., Niederreiter G. 1988. Finite fields. In 2 volumes. Per from English. M.: Mir, 882 p. (in Russian)
- McClellan J., Rader Ch. 1983. Application of number theory in digital signal processing / Per. from English – M. Radio and communication. 376 p. (in Russian)
- Shiryaev A.A., Kukushkin S.S., Boriskin S.S., Oberemko A.G., Kukushkin L.S. The method of compressed error-correcting data coding for the transmission and storage of information (Patent No. 2789785 C1 09.02.2023, Bull. No. 7). (in Russian)
- Torgashev V.A. 1973. Residual class system and computer reliability. M.: Sov. Radio, 120 p. (in Russian)
- Yashchenko V.V. 1998. Introduction to cryptography. Under total ed. M.: MTsNMO, 271 p. (in Russian)

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ширяев Алексей Александрович, главный специалист по вопросам эксплуатации НКИ космодрома «Восточный». г. Королёв, Россия

Кукушкин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заслуженный изобретатель РФСР. г. Королёв, Россия

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. Shiryaev, Chief Specialist on the operation of the NCI of the «Vostochny» Cosmodrome, Korolev, Russia

Sergey S. Kukushkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Honored Inventor of the RSFSR, Korolev, Russia

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