

УДК 623.76

DOI 10.52575/2687-0932-2023-50-4-955-966

Инновационные проблемно-ориентированные методы мониторинга и помехоустойчивой передачи полученной информации в беспроводных телекоммуникационных системах

¹ Ширяев А.А., ² Махов Ф.С., ³ Олейник И.И., ³ Прохоренко Е.И.

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

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

² Московский государственный университет,

Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы д.1, стр. 51

³ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

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

E-mail: a.shyriaev@mail.ru, 1fmakhov@gmail.com, oleinik_i@bsu.edu.ru

Аннотация. Статья ориентирована на разработку новых методов, используемых в информационных технологиях передачи результатов телеизмерений в условиях различного рода помех. Потребность в них наиболее остро проявляется при разработке автоматизированных систем мониторинга технического состояния сложных комплексов. Отличительная их особенность заключается в том, что они являются проблемно-ориентированными, учитывающими специфические особенности передаваемой информации. К их числу относятся различные виды избыточности: измерительной, текстовой, навигационной и телевизионной. Вопросы их применения рассмотрены на примере передачи, сбора и обработки данных телеизмерений. При использовании существующих методов, которые характеризуются высоким уровнем универсальности их применения, не представляется возможным выполнение многих требований. Основная их часть связана с необходимостью повышения скоростей передачи информации при жёстких ограничениях на пропускную способность беспроводных каналов связи. На разрешение подобных противоречий и направлены разработанные методы.

Ключевые слова: телеизмерения, передача данных, испытания, дополнительное кодирование информации с использованием образов-остатков, беспроводные каналы связи, информационно-телекоммуникационные системы

Для цитирования: Ширяев А.А., Махов Ф.С., Олейник И.И., Прохоренко Е.И. 2023. Инновационные проблемно-ориентированные методы мониторинга и помехоустойчивой передачи полученной информации в беспроводных телекоммуникационных системах. Экономика. Информатика, 50(4): 955–966. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-4-955-966



Innovative Problem-Oriented Methods of Monitoring and Noise-Resistant Transmission of Received Information in Wireless Telecommunication Systems

¹ Alexey A. Shiryayev, ² Fedor S. Makhov, ³ Ivan I. Oleinik, Ekaterina I. Prokhorenko

¹ Joint Stock Company "Central Research Institute of Machine Building",

4 Pionerskaya str., Korolev, 141070, Russia

² Moscow State University,

1 p. 51 Leninskie Gory Str., Moscow, 119991, Russia,

³ Belgorod State National Research University,

85 Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russia

E-mail: a.shiryayev@mail.ru, 1fmakhov@gmail.com, oleinik_i@bsu.edu.ru

Abstract. The article is devoted to the development of new methods used in information technologies for monitoring the results of telemetry in conditions of various types of interference, the need for which is most acute in the development of automated systems for monitoring the technical condition of complex complexes and systems for military and dual use. It is shown that with traditional methods, which are distinguished by a high degree of universality of their application, many of the requirements that apply to the modern level of information support for measurements cannot be met. To resolve the contradictions, a new non-traditional approach is proposed that uses diagnostic methods for obtaining estimates of measurement results, the basis of which is the non-traditional representation of measurement data by their residual images during data transmission and reception in wireless information communications.

Keywords: tele-measurements, data transmission, tests, presentation, measurement results, residuals, wireless, information and telecommunication systems

For citation: Shiryayev A.A., Makhov F.S., Oleinik I.I., Prokhorenko E.I., 2023. Innovative Problem-Oriented Methods of Monitoring and Noise-Resistant Transmission of Received Information in Wireless Telecommunication Systems. Economics. Information technologies, 50 (4): 955–966 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-4-955-966

Введение

В настоящее время для разрешения множества противоречий, появляющихся при передаче, приёме и обработке данных телеизмерений, приходится ориентироваться на поиск новых резервов, которые может предоставить кодирование информации. Однако традиционные его формы предполагают введение избыточности передаваемых данных [Блейхут, 1986], в результате чего объёмы передаваемой информации дополнительно увеличиваются. В условиях ограничений на пропускную способность беспроводных каналов связи, которая неконтролируемо уменьшается под влиянием помех, искусственно введенная избыточность приводит к ещё большему усложнению проблем передачи данных. Предлагаемый выход из такой затруднительной ситуации заключается в дополнительном безызыточном помехоустойчивом кодировании [Булычев, Васильев, 2016]. Подобные методы появились. Основу их построения составляет переход от традиционного позиционного представления данных, образующих внешнюю структуру ($S_{\text{внеш}}$) передаваемой информации, к её внутреннему аналогу ($S_{\text{внеш}}$), который получают при дополнительном кодировании сообщений с использованием образов-остатков [Гладков, Чаплинский, 2008].

Следующий этап применения разработанного метода связан с приёмом и обработкой данных телеизмерений, представленных образами-остатками и другими замещающими их эквивалентными структурно-алгоритмическими преобразованиями (САП) [Кукушкин, 2003].

В статье особое внимание уделено таким операциям разработанного метода, как контроль достоверности результатов и очищение получаемой информации от помех и искажений [Кукушкин, 2018]. Исследованы вопросы использования естественной избыточности по-

лучаемой информации для повышения точности и достоверности результатов телеизмерений на основе формируемых при приёме и обработке алгебраических инвариантов [Мироновский, Слаев, 2010]. Принципиальное отличие разработанного метода заключается в том, что при нетрадиционном представлении данных образцами-остатками инварианты представлены с использованием алгебры конечных полей [Кукушкин, 2003].

Представление данных их образцами-остатками

При приёме телеметрической информации (ТМИ) данные телеизмерений, обозначаемые как X_j^* , при аддитивной модели искажений отличаются от истинного значения x_j на величину привнесенных ошибок ε_j : $X_j^* = X_j + \varepsilon_j$. Применение алгебраических вариантов при мониторинге рассматривают с целью упрощения для случая трех измерений ($i=1,2,3$). Такой метод является показательным и подробно рассмотрен в литературе [Мироновский, 2010].

Контроль достоверности полученных результатов измерений осуществляют при трех измерениях на основе алгебраических инвариантов:

$$\Delta X_{12j} = X_{1j} - X_{2j} = 0, \Delta X_{13j} = X_{1j} - X_{3j} = 0, \Delta X_{23j} = X_{2j} - X_{3j} = 0 \quad (1)$$

Наличие ошибок при этом определяют, когда какие-то значения инвариантов (1) оказываются не равными 0. При этом, чем больше источников информации (i), дублирующих друг друга ($i > 3$), тем выше показатель достоверности контроля объекта мониторинга.

В практической телеметрии существуют следующие два вида введения избыточности: 1) за счёт увеличения количества датчиков, которые и являются источниками информации; 2) на основе распределённого приёма передаваемых потоков телеизмерений.

Но при введении дополнительных датчиков растёт объем передаваемой ТМИ, следовательно, необходимо увеличивать скорость передачи сообщений, чему препятствует ограниченная полоса пропускания радиоканала. А действие помехи, искажающей передаваемые данные ТМИ, сопровождается её уменьшением. И этот процесс становится случайным, как и характерные особенности самой непредсказуемой помехи. По этой причине возможность реализации диагностического мониторинга самой получаемой измерительной информации становится проблематичной.

В этой ситуации использование второго вида избыточности данных ТМИ, появляющегося при разнесенном приёме ТМИ несколькими приёмно-регистрирующими станциями (ПРС), превращается в основной вариант реализации метода избыточных переменных (МИП) [Мироновский, 2010].

Предлагаемые новые диагностические методы, отличающиеся от известных тем, что вместо исходных результатов измерений X_j передают, принимают и подвергают обработке их образцы-остатки b_i . Их получают в результате операций деления значений X_j на выбранные модули сравнения m_i . В результате этого получают образцы-остатки b_{ji} . Математическая запись такой операции:

$$X_j \equiv b_{ji} \pmod{m_i}. \quad (2)$$

Как реализуют технологию такого дополнительного кодирования ТМИ показано в виде иллюстраций на рисунке 1. На вышеуказанном рисунке приведены графики представления одного и того же ТМП в его исходном виде $X(j\Delta t)$ (слева), где j – счетное множество, определяющее порядок следования отсчетов ТМП при его цифровой представлении, а Δt – интервал дискретизации, определяемый теоремой В.А. Котельникова, а также после его структурно-алгоритмического преобразования (САП) (справа). В дальнейшем для упрощения записи признак времени T в виде множества $\{j\Delta t\}$ будет представлен только индексами j .

При этом каждому из исходных слов-измерений X_j будут поставлены в однозначное соответствие преобразованные значения C_j , представляющие собой результат дополнительного безызбыточного помехоустойчивого кодирования данных ТМИ. Научно-методические осно-

вы такого преобразования, в результате которого обеспечивается возможность коррекции ошибок передачи ТМИ, заключаются в использовании следующей графической модели представления данных ТМИ [Кукушкин С.С., 2016]. При графическом представлении исходных значений X_j телеметрируемого параметра (ТМП) (рисунок 1(А)), они не выходят за некоторые устанавливаемые заранее пределы Δu_j , заданной значениями $X_{jmin} = 250$ и $X_{jmax} = 830$: $\Delta u_j = (830 - 250) = 580$ (ось ординат графика). При этом ось абсцисс определяется временем ($j\Delta t$) или просто индексом j , используемым для упрощения записи. Этот диапазон возможных изменений X_j называют *метрической шкалой измерений*. Но при этом существует и другая шкала представления данных ТМИ (Ш), которую определяет заданная разрядность (N) представления слов-измерений двоичным кодом: $\Pi = (0 - (2^N - 1))$. Это предельная шкала, называемая *шкалой представления ТМИ*.

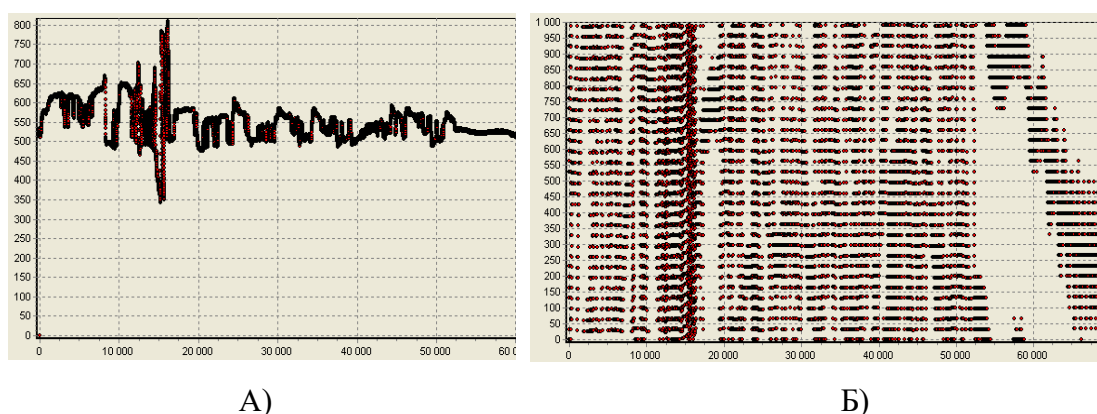


Рис. 1. Графическое представление контролируемого телеметрируемого параметра X_j и результатов его дополнительного кодирования с использованием образов-остатков $X_j \rightarrow C_j$, когда новое сообщение C_j составлено из образов-остатков $b_{1j} \pmod{m_1}$ и $b_{2j} \pmod{m_2}$, имеющих вдвое меньшую разрядность представления $n = N/2$,
 Fig. 1. Graphical representation of the controlled telemetered parameter X_j and the results of its additional coding using residual images $X_j \rightarrow C_j$, when the new message C_j is composed of residual images $b_{1j} \pmod{m_1}$ and $b_{2j} \pmod{m_2}$ having twice the bit depth of the representation $n = N/2$.

Наличие двух шкал измерений является одним из значительных недостатков существующей практики ТМИ, когда заранее нельзя предсказать в каких пределах будут находиться результаты измерений X_j . Например, при запуске в космос Ю.А. Гагарина предполагалось, что перегрузка может достигать 14g. Исходя из этого и определяли метрическую шкалу измерений Δu_j , которая была выражена в относительных единицах. Для обратного перевода данных ТМИ в физические значения используют тарифовочные характеристики, которые определяют при метрологической предполётной аттестации датчиков. После полёта первого в мире космонавта предельное значение для метрической шкалы контролируемого параметра «Продольная перегрузка» уточнили, так как реальные данные показали, что она не превышала 8g. Но это вовсе не означает, что она не может быть больше 14g. Такое явление наблюдают при появлении нештатных и аварийных ситуаций. Тогда шкалы представления данных Ш, ограниченной разрядностью N двоичных слов-измерений, может не хватить для отображения и передачи реальных значений ТМП. Этот эффект получил название «защкаливание данных» [Гладков, Чаплинский, 2008]. В этом случае данные ТМИ оказываются утраченными, несмотря на то, что и бортовая, и приёмная аппаратура были исправными. Поэтому применяемый в практике ТМИ метод уточнения метрической шкалы по результатам полученных экспериментальных данных работает не всегда. Он может быть использован только при предположении, что исключаются нештатные и аварийные ситуации. Но тогда он и не применим для мониторинга, так как его главная задача заключается в их выявлении. Поэтому приходится жертвовать показателем

точности ТИ путём закругления получаемых данных. Коэффициент «закругления» определяется как отношение $k = \Pi/\Delta u_{xj}$.

Для реального ТМП, графическое отображение которого приведено на рисунке 1(А), он равен $k = 1024/580 = 1,76$. При использовании предлагаемого метода (см. рисунок 1(Б)) этого нет, так как $\Delta u_{xj} = \Pi$.

При традиционном подходе для разрешения противоречия, связанного с эффектом «зашкаливания» ТМП, приходится использовать *метод многошкальных измерений*. Для его реализации необходимо использовать несколько датчиков ТМИ. В этом случае, помимо «точной» шкалы измерений, вводят ещё «грубую» и «промежуточную» шкалы. Однако при этом увеличивается объём передаваемых данных и появляется необходимость принятия дополнительных мер для разрешения уже другого противоречия беспроводной связи: между скоростью передачи ТМИ и пропускной способностью радиоканала передачи. Получается замкнутый круг противоречий: разрешая одно из них, мы приходим к ожесточению других. Необходимо его разорвать. На решение этой задачи направлен предлагаемый метод нетрадиционного представления данных ТМИ образами-остатками (рисунок 1(Б)), а также другими замещающими структурно-алгоритмическими преобразованиями (САП).

Из анализа графического представления результатов дополнительного кодирования данных ТМИ, приведенного на рисунке 1(Б), можно сделать следующие выводы.

1. Метрическая шкала измерений Δu_{xj} совмещена со *шкалой представления данных* $\Pi = (0 - 1023)$ (рисунок 1(Б)). Из приведенного графического представления значений ТМП следует что $1023 = 2^{10} - 1$, следовательно, было применено 10-тиразрядное двоичное кодирование слов-измерений X_j . Тогда оптимальные модули сравнения следует выбирать из условия разложения числа 1023 на два сомножителя $m_1 = 2^5 - 1 = 31$ и $m_2 = 2^5 + 1 = 33$. При этом эффект зашкаливания значений ТМП исключается, а возможность получения ТМИ, например, перегрузки, при предельных его значениях определяется только тем, выдержит ли их сам датчик, сохранит ли он свою работоспособность. Но датчики проектируют с большим запасом прочности, поэтому, как показывает практика использования разработанного метода, данные ТМИ были получены в различных, в том числе и самых сложных условиях проведения испытаний. При этом многие датчики, например, волоконно-оптические, показывают высокие показатели надежности и при длительной работе в агрессивных средах. Диапазон измерений датчиков специально ограничивают из соображений универсальности использования их тарифовочных характеристик, задавая те её области, когда данные ТМИ и физические их значения связаны зависимостью наиболее близкой к линейной.

2. Минимальное кодовое расстояние d_{min} между соседними значениями передаваемых сообщений нового вида C_j , выраженное в *метрике Евклида*, будет увеличено в $m_2 = 2^n + 1$ раз. Для примера, представленного в виде иллюстрации на рисунке 1, $d_{min} = 2^5 + 1 = 33$ раза. Однако это условие выполняется только между соседними разрывами, определяемыми на основе неравенства:

$$\delta C_j = |C_j - C_{j+1}| \geq 0,8\Pi = 820. \quad (3)$$

Поэтому для коррекции данных ТМП, искаженных помехой, вначале определяют разрывы на основе выполнения неравенства (3), а затем приступают к обнаружению ошибок на основе *свойства равноостаточности*. Это понятие известно в теории чисел [Фомин, 1980], но впервые применено в теории передачи информации и в метрологии. Его суть заключается в том, что любое из принятых преобразованных значений C_j после его деления на минимальное кодовое расстояние d_{min} даст один и тот же остаток ξ_j .

3. Так как каждое телеизмерение C_j представлено образами-остатками $C_j = \langle b_{1j}, b_{2j} \rangle_2$, где обозначение $\langle \rangle_2$ означает, что образы-остатки, как и дополнительно закодированные слова-измерения C_j , представлены двоичным кодом, то, учитывая их независимость, в том числе и относительно операций алгебраических инвариантов, получим увеличение их количества при неизменном объёме передаваемой ТМИ. Например, для случая трёх дублирую-



щих телеизмерений ($i = 3$) их будет вдвое больше по сравнению с классическим подходом [Мироновский, 2010]:

$$\begin{aligned} \Delta b_{12} = b_{11} - b_{12} = 0, \Delta b_{13} = b_{11} - b_{13} = 0, \Delta b_{23} = b_{12} - b_{13} = 0, \\ \Delta b_{21} = b_{21} - b_{22} = 0, \Delta b_{23} = b_{21} - b_{23} = 0, \Delta b_{33} = b_{21} - b_{23} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Этот эффект связан с тем, что образов-остатков, как источников зондирования помех в беспроводном канале связи, стало вдвое больше по сравнению с исходными словами-измерений X_j . При этом над ними можно выполнять и все ранее предусмотренные операции при обработке. Такая технология известна под названием обработка информации в системе остаточных классов (СОК) [Акушский, 1968]. В результате этого существенно расширяются возможности ранее использовавшихся методов оценивания достоверности информации и её обработки [Кукушкин, 2003].

4. Дополнительное кодирование телеизмерений C_j образами-остатками $C_j = \langle b_{1j}, b_{2j} \rangle_2$ представляет собой систему остаточных классов (СОК), а её преимущества, относящиеся к обработке информации, хорошо известны [Червяков, 2008], то отсутствует и необходимость декодирования C_j с целью обратного перевода значений C_j в исходные значения данных ТИ X_j . Эффективность системы обработки информации при мониторинге существенно повышается и обеспечивается дополнительная степень защиты информации от НСД.

Появляются также и другие новые возможности. Например, достоверность и целостность последовательности полученных телеизмерений может быть оценена с использованием теории конечных разностей [Андерсон, 1979]. Но принципиальное отличие предлагаемого метода заключается в том, что операцию абсолютной разности первого и второго порядков применяют не по отношению к исходным данным ТИ X_j . Объектами применения становятся значения образов-остатков b_{1j}, b_{2j} :

$$|\Delta^1 b_{1j}| = |\Delta^1 b_{2j}| = |\Delta^1 X_j| \text{ и } |\Delta^2 b_{1j}| = |\Delta^2 b_{2j}| = |\Delta^2 X_j|, \quad (5)$$

где $|\Delta^1 X_j| = |X_j - X_{j+1}|$ – абсолютные разности между исходными соседними значениями результатов ТИ первого порядка, а $|\Delta^1 b_{1j}| = |\Delta^1 b_{2j}|$ – это такие же разности, но вычисленные по отношению к соседним значениям образов-остатков b_{1j} и b_{1j} .

При этом в соответствии с теорией конечных разностей $|\Delta^2 b_{1j}| = |\Delta^2 b_{2j}| = |\Delta^2 X_j|$ представляют разности второго порядка

$$|\Delta^2 X_j| = |\Delta^1 X_j - \Delta^1 X_{j+1}|, |\Delta^2 b_{1j}| = |\Delta^1 b_{1j} - \Delta^1 b_{1(j+1)}| \text{ и } |\Delta^2 b_{2j}| = |\Delta^1 b_{2j} - \Delta^1 b_{2(j+1)}|. \quad (6)$$

С точки зрения традиционной теории представления, передачи и обработки данных ТМИ равенство (5) не очевидно. Оно становится справедливым в новой сжатой системе представления данных при использовании образов-остатков, но при условии равенства неполных частных: $l_1 = l_2$. Вероятность появления такого равенства при наличии корреляционной взаимосвязи значений ТИ X_j и X_{j+1} велика. Факт наличия такой зависимости X_j и X_{j+1} связан с применением теоремы о дискретизации В.А. Котельникова к аналоговым телеметрируемым сигналам [Булычев, 2016]. Большая естественная избыточность данных измерений, появляющаяся при аналого-цифровом преобразовании (АЦП) исходных контролируемых процессов и составляющая более 90%, является объективной реальностью, с которой необходимо считаться. Более того, основная задача статьи заключается в том, чтобы показать то, как она может быть полезно использована в различных практических приложениях. А они, как было отмечено, относятся к метрологии, сбору информации, получаемой от большого множества датчиков помехоустойчивой передачи данных ТМИ по беспроводным каналам связи и их обработки с целью обеспечения качественной информационной поддержки принимаемых решений (ИППР).

Дополнительная возможность контроля достоверности данных ТМИ, принятых в условиях на основе рассмотренных алгоритмов анализа временных рядов, представлена в таблице 1.

Для большей убедительности в таблице 1 приведены также и результаты дополнительного сравнения значений X_j по третьему модулю $m_3 = 2^n$, где $N = 2n$ – число разрядов двоичного кода, которым представлены значения X_j и которое принято в той или иной телеметрической системе (ТМС). При этом особенность кодирования данных ТИ двоичным кодом такова, что остаток b_{3j} , получаемый при сравнении X_j , представленной моделью: $X_j = \langle a_{cmj}, a_{mlj} \rangle > 2$, где a_{cmj} и a_{mlj} – старшее и младшее n -разрядные полуслова исходного результата ТИ равны значению младшего полуслова: $b_{3j} = a_{mlj}$. А это означает, что при восстановлении данных X_j в исходном виде, помимо первых двух образов-остатков b_{1j} и b_{2j} , незримо присутствует и третий остаток b_{3j} , поскольку он равен значению младшего полуслова: $b_{3j} = a_{mlj}$. Для подтверждения новой возможности контроля достоверности принятых данных измерений воспользуемся результатами, позаимствованными из существующей практики ТИ.

Существующие приёмы передачи помехозащищённого восстановления данных при приёме и борьбе с искажениями информации при её обработке преимущественно ориентированы на использование статистических методов. В этом случае ничего нельзя сказать о достоверности единичных слов и сообщений. Однако при представлении данных двумя b_1, b_2 и более образами-остатками, например, b_1, b_2, b_3 (таблица 1), такая возможность обеспечивается и по отношению к единичным данным измерений, которые становятся сообщениями при передаче информации. В таблице 1 такие данные выделены жирным обозначением. Их использование позволяет восстановить и соответствующие значения воображаемых абсолютных разностей первого и второго порядков, которые оказываются справедливыми и по отношению к исходным значениям ТИ X_j .

Такая процедура контроля достоверности полученной информации является дублирующей по отношению к декодированию данных C_j с использованием *свойств равноостаточности*. О её эффективности, проявляющейся в обеспечении контроля достоверности информации в системах мониторинга, свидетельствуют полученные результаты. Показатель подтверждения достоверности, принятой в условиях помех и восстановленной информации, определяется вероятностями от 0,8 до 0,95: $P_d = 0,8 - 0,95$ [Кукушкин, 2003].

Эта особенность может быть использована и при модернизации беспроводных каналов связи в части использования дополнительного помехоустойчивого кодирования.

Таблица 1
Table 1

Работа математической модели контроля помехоустойчивости
 единичного сообщения при нетрадиционном представлении данных образами-остатками
 (выделены значения совпавших значений) $|\Delta^2 b_{1j}| = |\Delta^2 b_{2j}| = |\Delta^2 b_{3j}| = |\Delta^2 X_j|$
 The work of a mathematical model for monitoring the noise immunity of a single message
 with an unconventional representation of data by residual images
 (the values of the matched values are highlighted) $|\Delta^2 b_{1j}| = |\Delta^2 b_{2j}| = |\Delta^2 b_{3j}| = |\Delta^2 X_j|$

Результаты преобразования											
Сравнение b_1 (mod 15)				Сравнение b_2 (mod 16)				Сравнение b_3 (mod 17)			
$\langle b_1 \rangle_2$	$\langle b_1 \rangle_{10}$	$ \Delta^1 b_1 $	$ \Delta^2 b_1 $	$\langle b_2 \rangle_2$	$\langle b_2 \rangle_{10}$	$ \Delta^1 b_2 $	$ \Delta^2 b_2 $	$\langle b_3 \rangle_2$	$\langle b_3 \rangle_{10}$	$ \Delta^1 b_3 $	$ \Delta^2 b_3 $
1011	11			0100	4			11101	14		
0001	1	10		1000	8	4		00000	0	14	
1101	13	12	2	0110	6	2	2	<u>10000</u>	16	16	2
0111	7	6	6	1110	14	8	6	01100	6	10	6
1110	14	7	1	0111	7	7	1	00000	0	6	4
0110	6	8	1	1101	13	6	1	01010	5	5	1
0000	0	6	2	1000	8	5	1	00011	1	4	1
0110	6	6	0	1101	13	5	0	01010	5	4	0



Окончание табл. 1
 End table 1

Сравнение b_1 (mod 15)				Сравнение b_2 (mod 16)				Сравнение b_3 (mod 17)			
$\langle b_1 \rangle_2$	$\langle b_1 \rangle_{10}$	$ \Delta^1 b_1 $	$ \Delta^2 b_1 $	$\langle b_2 \rangle_2$	$\langle b_2 \rangle_{10}$	$ \Delta^1 b_2 $	$ \Delta^2 b_2 $	$\langle b_3 \rangle_2$	$\langle b_3 \rangle_{10}$	$ \Delta^1 b_3 $	$ \Delta^2 b_3 $
0011	3	3	3	1010	10	3	2	00101	2	3	1
0101	5	2	1	1100	12	2	1	01001	4	2	1
1101	13	8	6	0100	4	8	6	11000	12	8	6
0010	2	11	3	1000	8	4	4	<u>10000</u>	16	4	4
1001	9	7	4	0000	0	8	4	10001	8	8	4
1101	13	4	3	0100	4	4	4	11000	12	4	4
0101	5	8	4	1100	12	8	4	01001	4	8	4
0000	0	5	3	0110	6	6	2	11101	14	10	2
1101	13	13	8	0101	5	1	5	11101	14	0	10
1000	8	5	8	1111	15	10	9	01110	7	7	7
1010	10	2	3	0010	2	13	3	10111	11	4	3
0111	7	3	1	1110	14	12	1	01100	6	5	1

Поскольку такие методы относятся к разряду безызбыточных, не требующих введения дополнительных проверочных символов двоичного кода, то их применение не требует изменения структур передаваемой информации: разрядности слов, кадров и циклов. Благодаря этому они наиболее подходят для модернизации существующих систем и комплексов, поскольку являются щадящими, в том числе и по отношению к тем технологиям передачи информации, которые устарели и требуют замены.

Такое преобразование становится экономичным, поскольку оказывается органично объединенным с новым решением проблемы сжатия данных (рис. 2).

Из представления результата дополнительного кодирования на рисунке 2 следует, что он может быть представлен в виде следующих двух вариантов:

$$C_j^{(1)} = \langle \langle b_{1j} \rangle_2, \langle b_{2j} \rangle_2 \rangle_2,$$

$$C_j^{(2)} = \langle \langle b_{2j} \rangle_2, \langle b_{1j} \rangle_2 \rangle_2. \quad (7)$$

Их отличительная особенность, заключающаяся в сокращении избыточности передаваемых символов двоичного кода, которая в результате САП, оказалась трансформированной в повышение информационной нагрузки каждого из них.

Это неявно выраженное проявление сжатия данных на синтаксическом уровне становится очевидным, если исходные сообщения X_j представить в следующей системе уравнений (СУ):

$$X_j = m_1 l_{1j} + b_{1j}$$

$$X_j = m_2 l_{2j} + b_{2j}, \quad (8)$$

где m_1 и m_2 – делители (в теории конечных полей – модули сравнения); l_{1j} и l_{2j} – неполные частные, а b_{1j} и b_{2j} – значения остатков.

Сжатой форма аналитического описания данных (7) является от того, что в исходном представлении данных ТМИ (8) в составе неявно передаваемой информации присутствуют значения делителей m_1 и m_2 и неполных частных l_{1j} и l_{2j} , а в канал связи они не передаются. При этом значения модулей сравнения m_1 и m_2 являются частью ключевых данных, которыми стороны обмениваются между собой до начала работы. Следовательно, это еще и вклад в решение проблемы сокращения избыточности (сжатия) передаваемой информации.

Модель помехоустойчивого кодирования

Модель дополнительного помехоустойчивого кодирования с использованием образов-остатков b_{1j} и b_{2j} представлена на рисунке 2. Неполные частные l_{1j} и l_{2j} восстанавливают на

основе принятых образов-остатков b_{1i} , b_{2i} с использованием адаптивного алгоритма конструктивной теоремы об остатках (КтТО). Перечисленные операции составляют основу реализации новых технологий передачи информации.

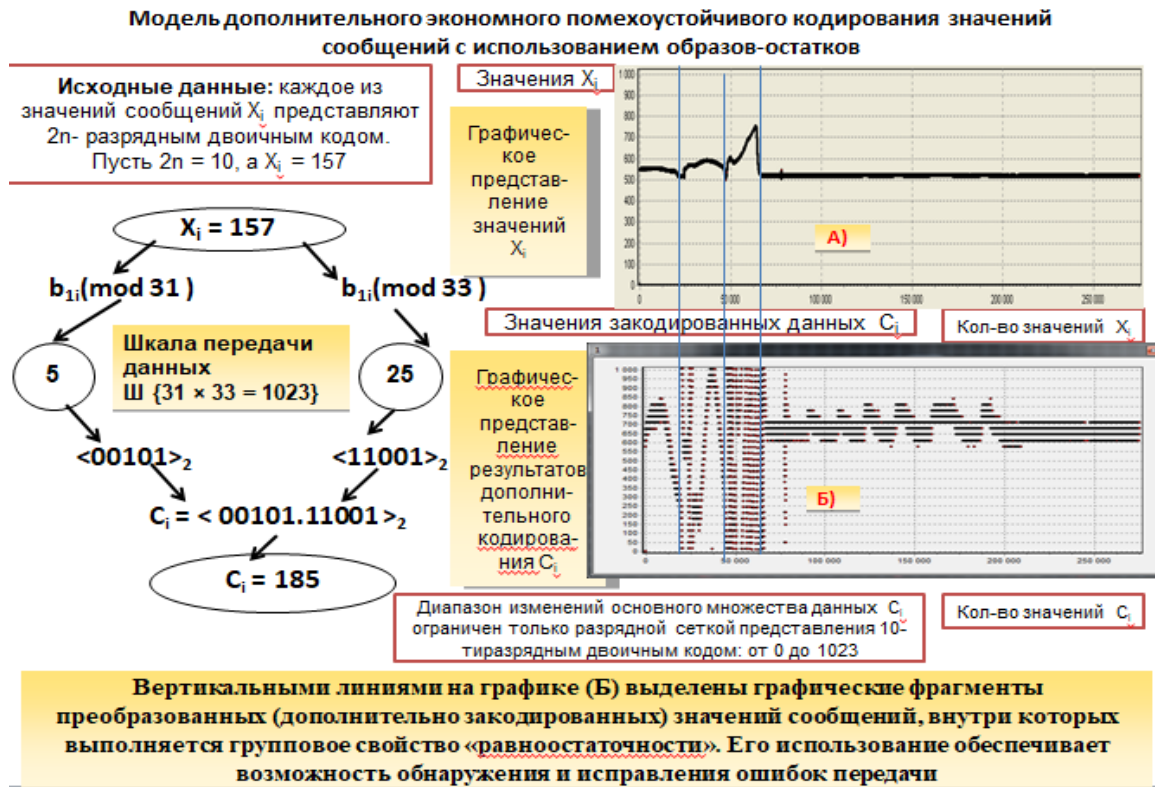


Рис. 2. Модель дополнительного помехоустойчивого кодирования с использованием образов-остатков
 Fig. 2. A model of additional noise-resistant coding using residual images

Отличительная особенность предлагаемой инновационной технологии представления данных ТИ заключается также в возможности одновременного использования не одного, а двух алгоритмов декодирования принятых данных ТИ: «жесткого» и «мягкого».

Принципиальное их отличие от аналогичных терминов, используемых в современной теории помехоустойчивого кодирования, заключается в том, что они ориентированы на работу по восстановлению искажённых символов двоичного кода, используемого для передачи информации. Они применяются по отношению к кодовым конструкциям, основу построения которых составляют биты. Это могут быть данные измерений и передаваемые значения сообщений. «Жёсткий» алгоритм является универсальным и может быть использован всегда, независимо от модели передаваемой информации. Под его управлением работает «мягкий» алгоритм декодирования, который используют тогда, когда не менее четырёх следующих подряд сообщений оказываются корреляционно-зависимыми. Это означает, что для их индексов (j) не выполняется условие неравенства (3). Следовательно, существует понятие *группового свойства равноостаточности*. А это означает, что ошибки передачи данных сообщений могут быть обнаружены и исправлены. Основу «жесткого» варианта восстановления переданных значений ТМИ составляет алгоритм конструктивной теоремы об остатках (КтТО) (4) [Кукушкин, 2003]. Он значительно проще классического алгоритма китайской теоремы об остатках (КитО), о чем свидетельствуют примеры расчетов, приведенные на рисунке 4.

Кроме того, новые возможности проявляются в следующем. Алгоритм КтТО становится адаптивным: его сложность определяется только значением разности $n = |m_1 - m_2|$, знаком и условиями делимости $\Delta = b_1 - b_2$ на n . В этом случае нет необходимости определять мультипликативно-обратные величины m_1' и m_2' , которыми оперируют при использовании классического алгоритма КитО [Кукушкин, 2003]: $m_1 m_1' \equiv 1 \pmod{m_2}$ и $m_2 m_2' \equiv 1 \pmod{m_1}$. Из-

за этого алгоритм КИТО является мультипликативным и зависит от выбора модулей сравнения m_1 и m_2 (рисунок 3).

Восстановленные при этом значения находят как значения остатков от деления на составной модуль сравнения (М) равный произведению исходных: $M = m_1 m_2$.

Новизна предлагаемого технического решения проблемы восстановления данных при передаче и обработке информации также связана с возможностью реализации алгоритма восстановления, составляющего основу «мягкого» декодирования данных, обеспечивающего коррекцию ошибок передачи данных ТМИ, сообщений и иных кодовых конструкций, которые были перекодированы в C_i на основе «группового свойства равноостаточности – f_i ».

Кроме того, значительно повышаются показатели эффективности обработки, такие, как оперативность, точность и достоверность. При этом используются известные преимущества системы остаточных классов (СОК), которые дополнены новые возможностями исправления ошибок и фильтрации данных. Например, появляется возможность не исключать из получаемой статистической выборки измерений аномальные ошибки, а исправлять их.

Заключение

Проведенные исследования показали, что для разрешения существующего множества проблем, которые появляются при мониторинге технического состояния сложных технических комплексов и обеспечения безопасности их применения, функционирования, эксплуатации необходим поиск новых резервов и не реализованных возможностей.

Кроме того, необходимо объединение в единую непротиворечивую логическую и научно-методическую систему различных научных дисциплин, которые до настоящего время развивались обособленно. Основу построения современных систем мониторинга составляют: телеизмерения, сбор, передача и оперативная обработка получаемой информации.

Преимущества прикладного применения алгоритма восстановления, основанного на конструктивной теореме об остатках (КтТО)

Определяем исходные данные: $n = |m_1 - m_2|$ и $\Delta = b_1 - b_2$

Если $n = 2$, то необходимо использовать только три звена формулы:

$$x = \left. \begin{array}{l} 1) m_1 \Delta / n + b_1, \quad \Delta = b_1 - b_2 \geq 0 (m_1 < m_2) \\ 2) m_1 (m_2 + \Delta / n) + b_1, \quad \Delta < 0 \\ 3) m_1 (m_2 + \Delta) / n + b_1, \quad \Delta < 0, \Delta > 0, n : \Delta, n / m_2 + \Delta \end{array} \right\} n / \Delta \quad (4)$$

Рассмотрит примеры.

1. Известный два остатка $b_1 = 12$ и $b_2 = 2$ от деления числа x на модули (числа) сравнения $m_1 = 15$ и $m_2 = 16$
 Определяем исходные данные: $n = |m_1 - m_2| = |15 - 16| = 1$ и $\Delta = b_1 - b_2 = 12 - 2 = 10 > 0$. Условие делимости дельта Δ на n (записывается как $n | \Delta$) выполняется, поскольку на 1 делятся все числа. Следовательно, для восстановления x необходимо воспользоваться первым звеном формулы (4):

$$x = m_1 \Delta / n + b_1 = m_2 \Delta / n + b_2 = 15 \times 10 + 12 = 16 \times 10 + 2 = 162.$$

Алгоритм китайской теоремы об остатках для тех же исходных данных имеет вид: $x = 16b_1 + 225b_2 \pmod{15 \times 16 = 240} = 16 \times 12 + 225 \times 2 = 192 + 450 = 642 \equiv 162 \pmod{240}$. Недостатки: сложность вычислений и увеличение (усиление) помех, искажающих остатки при передаче данных на их основе по каналам связи из-за необходимости их умножения на большие коэффициенты: 16 и 225.

2. Известный два остатка $b_1 = 11$ и $b_2 = 14$ от деления числа x на модули (числа) сравнения $m_1 = 15$ и $m_2 = 17$.
 Определяем исходные данные: $n = |m_1 - m_2| = |15 - 17| = 2$ и $\Delta = b_1 - b_2 = 11 - 14 = -3 < 0$. Условие делимости дельта Δ на n не выполняется, поскольку -3 не делится на 2 без остатка, но $(m_1 + \Delta)$ на 2 делится. Следовательно необходимо воспользоваться третьим звеном формулы (4):

$$x = m_1 (m_2 + \Delta) / n + b_1 = m_2 (m_1 + \Delta) / n + b_2 = 15 \times (17 - 3) / 2 + 11 = 17 \times (15 - 3) / 2 + 14 = 116.$$

Алгоритм китайской теоремы об остатках для тех же исходных данных имеет вид: $x = 136b_1 + 120b_2 \pmod{15 \times 17 = 225} = 136 \times 11 + 120 \times 14 = 1496 + 1680 = 3176 \equiv 116 \pmod{225}$

Рис. 3. Алгоритм конструктивной теоремы об остатках КтТО, составляющий основу «жесткого» декодирования передаваемой информации на приёмной стороне, и иллюстрация его преимуществ по сравнению с классическим алгоритмом китайской теоремы об остатках (КиТО)

Fig. 3. The algorithm of the constructive theorem on the remnants of the CtTO, which forms the basis of the "hard" decoding of the transmitted information on the receiving side, and an illustration of its advantages compared to the classical algorithm of the Chinese theorem on the remnants

Её развитие существенно ограничивается существующим порочным кругом взаимозависимых проблем, которые не получили приемлемого разрешения, удовлетворяющего растущим практическим потребностям. В статье показана одна из реальных возможностей комплексного решения задач мониторинга, которая изначально была связана с экономным помехоустойчивым кодированием передаваемой информации, а в действительности послужила связующим звеном для объединения в систему основные составные части мониторинга: измерение, сбор и обработка получаемой информации.

Предлагаемые технические решения оказались наиболее предпочтительными и для решения многих задач, в том числе относящихся к технической (практической) разработке новых методов, используемых в информационных технологиях передачи данных, обеспечения их защиты от помех и оценивания достоверности полученных экспериментальных данных телеизмерений в условиях различных искажений и негативных воздействий.

Список литературы

- Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. 1968. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Сов. Радио, 140 с.
- Андерсон Р. 1979. Анализ временных рядов. М.: Мир, 578 с.
- Блейхут Р. 1986. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. М.: Мир, 576с.
- Булычев Ю.Г., Васильев В.В., Кукушкин С.С. и др. 2016. Информационно-измерительное обеспечение натуральных испытаний сложных технических комплексов. М.: Машиностроение-Полет, 440с.
- Гладков И.А., Кукушкин С.С., Чаплинский В.С. 2008. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем. М.: МО РФ, 327с.
- Кукушкин С.С. 2018. Способ первичной обработки информации с обнаружением и исправлением ошибок передачи. Патент № 2658795, опубл. 22.06.2018, бюл. №18.
- Кукушкин С.С. 2003. Теория конечных полей и информатика: В 2т. - т.2: Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках. М.: изд-во МО РФ, 284 с.
- Макклеллан Дж., Рейдер Ч. 1983. Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов. Пер. с англ. М. Радио и связь. 376с.
- Мироновский Л.А., Слаев В.А. 2010. Алгоритмы оценивания результатов трех измерений. СПб.: «Профессионал», 192с.
- Фомин С.В. 1980. Системы счисления. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 48с.
- Червяков Н.И., Сахнюк П.А., Шапошников А.В., Ряднов С.А. 2008. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем. под редакцией Н.И. Червякова. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 288 с.

References

- Akushsky I.Ya., Yuditsky D.I. 1968. Machine arithmetic in residual classes. M.: Sov. Radio, 140 p.
- Anderson R. 1979. Analysis of time series. M.: Mir, 578 p.
- Blahut R. Theory and practice of error control codes. M.: Mir, 1986. 576 p.
- 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.
- Chervyakov N.I., Sakhnyuk P.A., Shaposhnikov A.V., Ryadov S.A. 2008. Modular parallel computing structures of neuroprocessor systems. edited by N.I. Chervyakov. Moscow: FIZMATLIT, 288 p.
- Fomin S.V. 1980. Number systems. M.: Nauka. The main editorial office of the 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, 327p.
- Kukushkin S.S. 2003. Finite field theory and informatics: In 2 volumes. v.2: Methods and algorithms, classical and non-traditional, based on the use of the constructive remainder theorem. M.: publishing house of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 284 p.



- Kukushkin S.S. 2018. The method of primary processing of information with the detection and correction of transmission errors. Patent No. 2658795, publ. 06.22.2018, bul. No. 18.
- McClellan J., Rader Ch. 1983. Application of number theory in digital signal processing. Per. from English - M. Radio and communication. 376 p.
- Mironovskiy L.A., Slaev V.A. 2010. Algorithms for estimating the results of three measurements. - St. Petersburg: «Professional», 192 p.

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 12.09.2023

Received September 12, 2023

Поступила после рецензирования 02.11.2023

Revised November 02, 2023

Принята к публикации 01.12.2023

Accepted December 01, 2023

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ширяев Алексей Александрович, главный специалист по вопросам эксплуатации НКИ космодрома «Восточный», АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королёв, Россия

Alexey A. Shiryaev, Chief Specialist on the Operation of the NCI of the "Vostochny" Cosmodrome, Joint Stock Company "Central Research Institute of Machine Building", Korolev, Russia

Махов Федор Сергеевич, студент 4 курса факультета МГУ, Высшая школа управления Инновациями, г. Москва, Россия

Fyodor S. Makhov, 4th year Student of the Faculty of Moscow State University: Higher School of Innovation Management, Moscow, Russia

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

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

Прохоренко Екатерина Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

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