

УДК 629.7.05, 621.398

© Кукушкин С.С., Скиба Н.П.  
Kukushkin S., Skiba N.**ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ СЖАТЫХ СТРУКТУРНО-КОДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ****FUNDAMENTAL SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPROACHES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF DATA TRANSMISSION SYSTEMS BASED ON THE COMPRESSED STRUCTURAL CODE CONSTRUCTIONS**

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме повышения эффективности передачи информации в условиях, когда ее объемы превышают существующие возможности каналов связи. Единственная возможность для ее решения заключена в использовании новых технологий преобразования и передачи сообщений. Технологий много и все они являются проблемно-ориентированными, обеспечивающими переход к адаптивным системам измерений и передачи информации. Однако многие из них являются противоречивыми, из-за чего появляется необходимость в дополнительных исследованиях, связанных с системным подходом к совместному их использованию. В статье рассматриваются условия, которые приводят к дополнительному усилению возможностей, которые появляются при использовании новых технологий, связанных с нетрадиционным представлением данных их образами-остатками.

Представленные в статье результаты исследований получены при выполнении плановых НИОКР, исполнителем которой является ОАО «ВИКОР».

**Annotation.** Article is devoted to improving the efficiency of information transfer at a time when its volume exceeds the existing capacity of communication channels. The only possibility for the solution lies in using the new conversion technologies and communications. Technologies are many and they are problem-oriented, providing a transition to adaptive measurements and information transfer. However, many of them are contradictory, which is why there is a need for additional studies related to the systematic approach to sharing them. The article deals with the conditions that lead to further increase the opportunities that come with the simultaneous use of new technologies related to non-traditional data representation of their images.

Presented in this paper the results of studies obtained with the implementation of planned R & D executed by the JSC "Vikor".

**Ключевые слова.** Помеха, телеметрия, представление, данные образ-остаток, логическое помехоустойчивое кодирование, полоса пропускания канала связи.

**Key words.** Hindrance, telemetry, presentation, image data-residue logical noiseless coding, channel bandwidth connection.

**Введение**

В условиях жестких финансово-экономических ограничений на развитие и модернизацию измерительных комплексов космодронов значительная роль в повышении точностных характеристик измерений принадлежит новым измерительным и информационным технологиям.

Особое место среди них занимают технологии, связанные с реконструкцией используемой позиционной системы счисления.

Новые технологии представления и передачи данных базируются на представлении исходного сообщения (числа)  $X$  образами-остатками  $b_p$ , получающимися в результате операции деления  $X$  на модули сравнения  $m_i$

$$X \equiv b_i \pmod{m_i}. \quad (1)$$

Особенность нетрадиционного представления данных образами-остатками  $b_i$  заключается в том, что последних может быть много  $b_p, i = 1, 2, \dots, k$ . Их число определяется количеством использованных модулей сравнения

Кукушкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФБУ «4 ЦНИИ Минобороны России», тел.+7(498)628-05-16;

Скиба Наталья Петровна – младший научный сотрудник, ВА РВСН имени Петра Великого.

Kukushkin Sergey – doctor of the technical sciences, professor, the main scientific employee, FBU "4 CRI Russian Defense Ministry", tel.+7(498)628-05-16;

Skiba Natalja – junior scientific employee, Peter the Great Military Academy.

$m_i, i = 1, 2, \dots, k$ . В этом случае говорят о представлении  $X$  системой остаточных классов (СОК) [1, 4]

$$\begin{aligned} X &\equiv b_1 \pmod{m_1}; \\ X &\equiv b_2 \pmod{m_2}; \\ X &\equiv b_k \pmod{m_k}. \end{aligned} \quad (2)$$

Применительно к процессам, к числу которых относятся и телеметрируемые параметры (ТМП), формулы (1) и (2) записываются в следующем виде:

$$x(t) \equiv b_i(t) \pmod{m_i}; i = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

При этом для однозначного восстановления данных должны быть выполнено следующее условие:  $m_1 \times m_2 \times \dots \times m_k \geq \Pi$ , где  $\Pi$  – шкала представления значений сообщений.

### 1. Основные аналитические соотношения, относящиеся к представлению данных образами-остатками

В существующих системах передачи информации сообщения представлены информационными словами, имеющими разрядность от 8 до 10 бит. Шкала однозначного отображения всего набора данных, задаваемых двоичными  $n$  – разрядными кодами определяется от 0 до  $2^n - 1$ . Следовательно, для байтовых слов она определяется значениями 0–255, при  $2^n = 10$  шкала представления равна:  $\Pi_{10} = 0 - 1023$ .

Если брать байтовую структуру слов, то в соответствии с конструктивной теорией конечных полей (КТКП), необходимо найти такие два числа, которые бы число 255 ( $\Pi_8 = 0 - 255$ ) делили без остатка с минимальной разницей между собой. Для  $\Pi_8 = 0 - 255$  – это модули  $m_1 = 2^4 - 1 = 15$  и  $m_2 = 2^4 + 1 = 17$  ( $15 \times 17 = 255$ ). Не сложно заметить, что в структуре данного разложения присутствует следующее известное алгебраическое тождество:

$$2^n - 1 = (2^{n/2} - 1)(2^{n/2} + 1). \quad (4)$$

Алгебраическое представление числа  $(2^{n/2} - 1)$  – можно, в свою очередь, разложить на следующие сомножители:

$$2^{n/2} - 1 = (2^{n/4} - 1)(2^{n/4} + 1).$$

При больших значениях  $2^n$ , определяющих разрядность кодовых комбинаций  $C_i$ , этот процесс может быть продолжен до получения минимального модуля сравнения, равного 3  $m_i = 3$ .

Далее из следующих друг за другом слов-измерений  $W_1, W_2, \dots, W_s$ , могут быть составлены информационные предложения, фразы или пакеты данных. При этом зачастую нужную информацию несет не само отдельное информационное слово  $W_p$ , а их совокупность (предложения, фразы или пакеты данных).

*Пример.* В качестве примера приведем структуру одной из информационных фраз, которая используется

при передаче информации спутниковой радионавигационной системы (СРНС) ГЛОНАСС:

1) **45 4C 30 30 39 27 1F 2E | 10 40 09 28 14 20 0D 0A** – представление фразы шестнадцатиричным кодом;

2) **0100.0101|0100.1100|0011.0000|0011.0000|0011.1001|0010.0111|0001.1111|0010.1110|0001.0000|0100.0000|0000.1001|0010.1000|0001.0100|0010.0000|0000.1101|0000.1010|** – представление той же фразы, но традиционным позиционным двоичным кодом.

Всего сообщений в фразе – 16 байт, из них 2 байта – заголовок (стоят в начале), 2 байта – маркировка окончания (размещены в конце) и информационных – 12 байт.

### 2. Преобразование данных и информационных фраз с использованием образов-остатков

Для демонстрации новых технологий с использованием нетрадиционного представления данных образами-остатками примем, что число байтовых слов, объединенных в предложение, равно 4,  $s=4$ :

$$\begin{aligned} W_1 &= \langle 1011 \ 1111 \rangle_2 = \langle 191 \rangle_{10}; \\ W_2 &= \langle 1011 \ 1111 \rangle_2 = \langle 134 \rangle_{10}; \\ W_3 &= \langle 1010 \ 0000 \rangle_2 = \langle 160 \rangle_{10}; \\ W_4 &= \langle 1101 \ 1111 \rangle_2 = \langle 223 \rangle_{10}. \end{aligned}$$

Предположим, что они объединены и составляют 1/3 часть информационной фразы:

$$I = \langle W_1, W_2, W_3, W_4 \rangle_2. \quad (5)$$

При первом преобразовании, связанном с нахождением образов-остатков по модулям числам  $m_1 = 15$  и  $m_2 = 17$ , получим

$$I_{\text{нр1}}^{(\text{СОК})} = \langle b_{11}, b_{12}; b_{21}, b_{22}; b_{31}, b_{32}; b_{41}, b_{42} \rangle_2 \quad (6)$$

Далее объединяем полученные образы-остатки в систему с использованием формальных многочленов

$$f_1(x) = b_{11}x^3 + b_{21}x^2 + b_{31}x + b_{41} \pmod{15}; \quad (7)$$

$$f_2(x) = b_{12}x^3 + b_{22}x^2 + b_{32}x + b_{42} \pmod{17}. \quad (8)$$

Затем выбираем модули-полиномы, например,  $m_1(x) = x^2 + x$ ,  $m_2(x) = x^2 + x + 1$  и поочередно делим на них многочлены (7) и (8) (их коэффициенты заданы в таблице). Результат первичного кодирования с использованием модулярной арифметики (сравнения по модулям-числам  $m_1 = 15$  и  $m_2 = 17$ ) представлен в таблице значениями:  $X_{ci} = \{180, 239, 167, 210\}$  вместо исходных значений последовательности  $X_i = \{191, 134, 160, 223\}$ .

Его суть заключена в том, что последовательность измеренных значений (для примера следующие друг за другом четыре значения ТМП  $x(t)$ ): 107, 109, 113, 116 преобразованы в образы-остатки  $b_1 \pmod{15}$  и  $b_2 \pmod{17}$ , каждый из которых требует для представления 4 двоичных разрядов. Далее из них составлены новые байтовые слова-измерения:  $X_n = \langle b_p, b_t + 2 \rangle_2$ , образующие новую по-

Первый этап сравнения сообщений по модулям-числам

Форма представления $X(t)$	Информационные слова - $\langle X_i \rangle_2, \langle X_i \rangle_{10}, \langle X_{C_i} \rangle_2 = \langle a_1 - \text{старшее полуслово}, a_2 - \text{младшее полуслово} \rangle_2, \langle X_{C_i} \rangle_2 = \langle b_1 - \text{первое полуслово-остаток}, b_2 - \text{второе полуслово-остаток} \rangle_2$							
Двоичная (байтовая) $\langle X_i \rangle_2$	1011 1111		1000 0110		1010 0000		1101 1111	
Десятичная $\langle X_i \rangle_{10}$	$X_i=191$		$X_{i+1}=134$		$X_{i+2}=160$		$X_{i+3}=223$	
Полусловами	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_2$
Двоичная $\langle X_i \rangle_2$	1011	<b>1111</b>	1000	<b>0110</b>	1010	<b>0000</b>	1101	<b>1111</b>
Образы-остатки $X_C(t)$	$m_1=15$ $b_{1i}=11$	$m_2=17$ $b_{2i}=4$	$m_1=15$ $b_{1i+1}=14$	$m_2=17$ $b_{2i+1}=15$	$m_1=15$ $b_{1i+2}=10$	$m_2=17$ $b_{2i+2}=7$	$m_1=15$ $b_{1i+3}=13$	$m_2=17$ $b_{2i+3}=2$
Полусловами	$b_{1i}$	$b_{2i}$	$b_{1i+1}$	$b_{2i+1}$	$b_{1i+2}$	$b_{2i+2}$	$b_{1i+3}$	$b_{2i+3}$
Двоичная $\langle X_C \rangle_2 = \langle b_1, b_2 \rangle_2$	1011	0100	1110	1111	1010	0111	1101	0010
Десятичная $\langle X_C \rangle_{10} = \langle b_1, b_2 \rangle_{10}$	$X_{C_i} = 180$		$X_{C_{i+1}} = 239$		$X_{C_{i+2}} = 167$		$X_{C_{i+3}} = 210$	

следовательность данных при традиционном их восстановлении, как обычного байтового слова-измерения: 37, 71, 139, 190.

При этом имеется возможность определения локальных свойств непрерывности (корреляционной взаимосвязи) переданных значений. Она устанавливается на основе определения разностей между предшествующими и последующими значениями в традиционной и новой форме.

Для первой последовательности абсолютные разности равны:

$$\Delta_i = |107-109|=2; \Delta_{i+1} = |109-113|=4; \Delta_{i+2} = |113-116|=3.$$

Для второй (преобразованной) последовательности

$$\Delta_{n(i)} = |37-71|=34; \Delta_{n(i+1)} = |71-139|=68;$$

$$\Delta_{n(i+2)} = |139-190|=51.$$

Определяя отношение  $k$ , получаем

$$k = \frac{\Delta_{n(i+m)}}{\Delta_{i+m}} = 17. \tag{5}$$

Таким образом, число  $k$ , близкое к 17, можно выбрать в качестве критерия непрерывности дискретных значений передаваемых результатов измерений и сообщений. Кроме того, отмеченная особенность может составить основу нового подхода к декодированию данных, позволяющему обнаруживать и исправлять ошибки передачи информации, обладающей свойствами избыточно-

сти. Существуют различные методы и технологии сжатия передаваемых данных и сообщений [2, 5]. Предлагаемый подход сжатого представления данных, сообщений и сигналов образами-остатками отличается, прежде всего, тем, что позволяет преобразовать оставшуюся (не устраненную) избыточность в способность обнаружения и исправления ошибок передачи информации. Эта способность составила основу для разработки принципиально нового направления борьбы с помехами, связанного с использованием проблемно-ориентированного безыбыточного (сжатого) помехоустойчивого кодирования.

Такая возможность появилась, помимо прочего, благодаря использованию нового прикладного математического аппарата, получившего название «конструктивной теории конечных полей» [1, 6].

Его использование позволило существенно расширить множество инвариантов, которые при оценке целостности и достоверности принятой информации применяются в качестве эталонных данных и сигналов.

Использование расширенного множества инвариантов в виде: модулей сравнения, которые не передаются по каналам связи, а становятся известными получателю в виде ключевых данных, новые групповые свойства преобразованных данных и сообщений, обеспечивает возможность разнообразного контроля досто-

верности приема полуслов-остатков, информационных фраз и предложений, а также пакетов данных в условиях «безызыточного» помехоустойчивого кодирования. Здесь понятие «безызыточного» помехоустойчивого кодирования используется в том смысле, что разрядность исходных и преобразованных слов-измерений остается неизменной. Однако фактическая избыточность информации при этом присутствует. Она связана с переходом от простой позиционного принципа представления слов-измерений к новой смешанной системе счисления, позиционность в которой сохраняется только внутри малых информационных элементов, к числу которых относятся образы-остатки. При этом сами образы-остатки могут меняться местами и это никак не сказывается на результатах обратного преобразования (восстановления) ТМИ. В этом заключается основной принцип непозиционной системы счисления [3].

### 3. Технический эффект от использования нетрадиционного представления данных и сообщений

В явном виде эффект синтаксического сжатия данных, сообщений и сигналов при кодировании сжатым (безызыточным) помехоустойчивым кодом не наблюдается, поскольку исходное  $2n$ -разрядное информационное слово заменяется двумя полусловами-остатками, каждое из которых требует  $n$  разрядов для представления. Эффект от синтаксического сжатия в этом случае проявляется в появлении следующих принципиально новых возможностей:

1) использования двух независимых алгоритмов восстановления – на основе «жесткого» декодера, основу работы которого составляют адаптивный алгоритм конструктивной теоремы об остатках (КТО) и с использованием «мягкого» декодера, использующего инварианты в виде групповых свойств равноостаточности;

2) возможности контроля достоверности единичного принятого сообщения [6, 7].

При избыточном помехоустойчивом кодировании байтовых слов используются модули  $m_1=15$ ,  $m_2=16$ ,  $m_3=17$ . При этом существенно упрощается процедура нахождения остатков: исходные значения можно и не делить на модули сравнения. Они могут быть найдены следующим образом:

1) простым исключением  $n$  старших разрядов исходного сообщения  $m_2$ ;

2) сложением неинвентированных  $n$  старших и  $n$  младших разрядов  $m_1$ ;

3) сложением инвентированных  $n$  старших и не-

инвентированных  $n$  младших разрядов  $m_3$ .

Ранее контроль достоверности приёма и восстановления данных и сообщений на фоне шумов осуществлялся только по статистическим критериям на основе, например, оценивания дисперсии разброса значений калибровочных (априорно известных) служебных параметров. Достоверность приёма единичных сообщений при традиционном подходе можно было установить только при избыточном помехоустойчивом кодировании на основе специально вводимых символов контроля чётности бит слова и корректирующих дополнительных разрядов. При использовании алгоритмов КТО этого не требуется. В предлагаемом методе контроль достоверности приёма единичных сообщений осуществляется на основе сравнения разностей между различными остатками, соответствующими предшествующему и последующему значениям передаваемых сообщений. Если разности совпадают, то предполагается, что сообщение принято без ошибок. В противном случае делается вывод о наличии ошибки.

Кроме того, недостаток известных методов контроля достоверности заключается в том, что оценивание погрешностей восстановления результатов радиотехнических измерений, принятых на фоне шумов и помех, производится по ограниченной статистической выборке, а полученные оценки распространяются на весь объём принятых и зарегистрированных данных [2]. Вследствие этого, например, нельзя сделать интересующее получателя и анализатора информации заключение о достоверности приёма и восстановления переданного сообщения или сигнала.

Совместное использование известных и предлагаемых методов контроля достоверности обеспечивает возможность одновременной реализации интегрального и дифференциального подхода к оцениванию достоверности приёма измерительной информации. Проявляется это в том, что, с одной стороны, оценивание производится по всему массиву передаваемых данных (интегральный эффект), а с другой – при использовании предлагаемых нетрадиционных методов обеспечивается возможность подтверждения достоверности приёма единичного сообщения (дифференцированная технология контроля качества получаемых данных и сообщений).

Известные методы повышения достоверности информации базировались на использовании следующих технических решений:

1) повышения мощности передающих устройств;

2) использования высокоэффективных антенных систем (ВАС) и разнесённого приёма сообщений.

Предлагаемый нетрадиционный подход позволяет учесть специфические особенности передаваемой информации для повышения показателей достоверности ее

приема, что особенно важно в условиях радиоэлектронной борьбы.

#### *Литература*

1. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика: т.1 «Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках», - М.: МО РФ, 2003 – 284с.
2. «Современная телеметрия в теории и на практике / Учебный курс», Спб.: Наука и Техника, 2007. – 672с.
3. Фомин С.В. Системы счисления. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 48с.
4. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. В 2-х томах. Пер с англ. - М.: Мир, 1988. - 882с.
5. Былински П., Ингрэм Д. Цифровые системы передачи //Перевод с англ. под ред. АА. Венцеля/, М.: «Связь», 1980. – 360с.
6. Кукушкин С.С., Гладков ИА., Чаплинский В.С. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем. – М.: Минобороны России, 2008. – 328с.
7. Кукушкин С.С. Новые информационные технологии измерений - М.: «Вопросы радиоэлектроники», серия ОТ, выпуск 1, 2005. – с. 44-48.

Материал поступил в редакцию 19. 06. 2014 г.