

УДК 629.7.05, 621.398

©Кукушкин С.С., Супрун А.С.
Kukushkin S., Suprun A.

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ
СТРУКТУРНО-КОДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ОСНОВАННЫХ
НА НЕТРАДИЦИОННОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗАМИ-ОСТАТКАМИ**

**TECHNIQUE OF FORMATION OF THE OPTIMUM NOISEPROOF
STRUCTURALLY-CODE DESIGNS BASED ON NONCONVENTIONAL
REPRESENTATION OF RESULTS OF TELEMESUREMENTS
IN THE IMAGES-RESTS**

***Аннотация.** Статья посвящена проблеме повышения защищенности ТМИ от несанкционированного доступа и помех структурно-алгоритмическими методами, использующими нетрадиционное представление передаваемых данных образами-остатками. Основу предлагаемого технического решения составляет новый метод коррекции передаваемых данных, представленных двумя и более образами-остатками, позволяющий устранить отдельные недостатки, которые появляются при простом объединении значений образов-остатков в новое преобразованное слово-измерение. Представлены методика и алгоритм формирования уточненных структурно-кодowych конструкций, объединенных в единое преобразованное слово-измерение.*

***Annotation.** The article is devoted to a problem of restoration of a level of the major frequency of a telemetering signal during a digital processing to increase an accuracy of automatic tuning of frequency (ATF). The basis of increase of ATF work accuracy is an adaptive procedure of calculation of the error, that allows to arrive at a decision of the validity of the accepted symbol of a binary code of the information. The technique and the algorithm of a calculation of a level of the main frequency, the exact values of which are used for a management of a barrier of symbols division are presented in the article. Definition of the specified level is carried out on a basis of the probabilistic processing of a signal at an exit of the frequency detector, unlike it is described in another known approaches.*

***Ключевые слова.** Телеметрия, нетрадиционное представление данных образами-остатками, восстановление и обработка цифровых сигналов, искаженных помехами.*

***Key words.** Telemetry, processing of signals, identification of symbols of a binary code, adaptive management of recognition limits.*

Существующие проблемы в области информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) испытаний ракетно-космической техники (РКТ) таковы, что без новых технологий, направленных на повышение эффективности передачи и приема телеметрической информации (ТМИ), нельзя найти приемлемое разрешение противоречий, составляющих их суть. Возможности традиционных методов не безграничны, и в настоящее время они уже фактически исчерпаны. В настоящее время активно внедряются в практику телеизмерений и переда-

чи информации новые методы преобразований сообщений, основу которых составляют образы-остатки (b_i), получаемые при делении исходных значений телеметрируемых параметров (ТМП) (x) на определенным образом выбранные модули сравнения (m_i).

Применение новых технологий, которые бы отвечали потребностям практики информационно-телеметрического обеспечения испытаний вооружения и военной техники (ВВТ), может быть условно разбито на следующие этапы:

Кукушкин Сергей Сергеевич – ведущий научный сотрудник 4 ЦНИИ Минобороны России, доктор технических наук, профессор, тел.+7(495)515-19-82;

Супрун Александр Сергеевич – научный сотрудник 4 ЦНИИ Минобороны России.

Kukushkin Sergey – the main scientific employee 4 Central Scientific Research Institute Ministry of Defence of Russia, doctor of the technical sciences, professor. Ph. +7(495)515-19-82;

Suprun Aleksandr – scientific employee 4 Central Scientific Research Institute Ministry of Defence of Russia.

1) на первом этапе осуществляется планирование измерительного эксперимента для конкретного типа ВВТ, включающее в себя:

а) задание метрических свойств телеметрируемых параметров (ТМП)

$\varphi\{x(t)\} \in \Psi$, где $\Psi = \{u_p, \delta_i^{кс}, f_p, x(t) - x_i(t) \leq k(t-t')\}$ – метрическое пространство, определяемое:

- априорно рассчитанными шкалами телеизмерений Π ; $0 \leq x_i(t) \leq \Pi$, $\Pi \in \Pi$;

- погрешностями кодирования i -го ТМП

$$(x_i(t) \rightarrow X_i(k\Delta T)) : \delta_i^{кс} \in \Delta^{кс},$$

где $X_i(k\Delta T)$ – значения ТМП в дискретные моменты времени $k\Delta T$, $k = 1, 2, 3, \dots \in N$; ΔT – интервал между опросами, определяемый в соответствии с теоремой В.А. Котельникова;

- частотами опроса ТМП $f_i \in F$;

- свойствами непрерывности ТМП

$$x(t) - x_i(t') \leq k(t-t');$$

б) классификацию ТМП по свойствам непрерывности на группы А, Б и В;

2) на втором этапе сокращается избыточность сообщений, предназначенных для передачи, и достигается значительный коэффициент сжатия данных ($K_{сж}$) при основном ограничении на вносимые при этом погрешности $\delta_i^{сж}$ преобразований значений ТМП

$$x_i(t) : x'_i(t) = x_i(t) + \delta_i^{сж}, \delta_i^{сж} < \rho_o,$$

где ρ_o – некоторое заданное значение:

$$C_{сж} : K_{сж} = I_o / I_{сж} \rightarrow \max \rightarrow K_{сж} \sim K_{изб}, \quad (1)$$

$$\rho | x'_i(t), x_i(t) | \leq \rho_o, \quad (2)$$

$$K_{изб} = I_o / I_{см}$$

где I_o – объем передаваемых телеизмерений;

$I_{см}$ – объем извлекаемой при приеме смысловой информации;

$x_i(t) \in X(t)$, где $X(t)$ – множество ТМП, задаваемое Программой телеизмерений ($\Pi_{тм}$): $X(t) \subset \Pi_{тм}$;

3) на третьем этапе планируются преобразования ТМП:

а) для группы А на основе представления каждого из значений ТМП, характеризующихся наиболее сильной корреляционной зависимостью между предшествующими и последующими результатами телеизмерений, одним остатком-образом, имеющим вдвое меньшую разрядность сформированного слова по сравнению с его первоначальным представлением;

б) для группы Б на основе представления каждого из значений ТМП двумя образами-остатками $b_i(t)$ и $b_j(t)$ для повышения достоверности передачи ТМИ по радиоканалу с ограниченной пропускной способностью $\Delta f \in \Delta f_{max}$;

$$x(t) \equiv b_i(t) \pmod{m_i}; \quad (3)$$

$$x(t) \equiv b_j(t) \pmod{m_j}, \quad (4)$$

где m_i и m_j – модули сравнения, $m_i \times m_j \geq \Pi$, где Π – шкала представления значений ТМП;

в) для группы В – на основе трех образов-остатков и их проверочных символов, предполагающих введение избыточности передаваемых данных для обнаружения и исправления ошибок передачи ТМИ:

$$x(t) \equiv b_i(t) \pmod{m_i}; \quad (5)$$

$$x(t) \equiv b_j(t) \pmod{m_j}; \quad (6)$$

$$x(t) \equiv b_l(t) \pmod{m_l}; \quad (7)$$

4) на четвертом этапе вместо сокращенной несодержательной части ТМИ за счет определенной части ТМП группы А вводится целенаправленная метрологическая избыточность путем математических преобразований оставшейся части ТМП с использованием дифференцирования, интегрирования, преобразований Фурье и теоретико-числовых преобразований на основе образов-остатков;

5) на пятом этапе сформированный групповой телеметрический видеосигнал подвергается модуляционному кодированию, позволяющему обеспечить наиболее экономичное использование пропускной способности радиоканала передачи данных на основе использования кодов «плотной упаковки сообщений», включающих в том числе троичную систему счисления представления ТМИ различными видами логического кодирования видеосигналов и последующего одновременного их преобразования в несколько видов модуляции, например, в ЧМ и ФМ, объединяемых в одном радиоканале.

Проведенный детальный анализ различных предположений по использованию представления данных телеизмерений образами-остатками показал наличие ряда преимуществ, которые появляются при передаче ТМИ по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью в условиях действия помех. Вместе с тем были выявлены и некоторые недостатки представления данных и их восстановления при одноканальном приеме ТМИ в условиях безыбыточного кодирования. В соответствии с классической теорией передачи информации помехоустойчивое кодирование не может быть безыбыточным. При представлении данных образами-остатками даже в том случае, когда не вводятся дополнительные разряды, избыточность также присутствует, но в неявном виде. Присутствие избыточности замаскировано тем, что используется смешанная система счисления и представления данных ТМИ. Она в 1,4 раза оказывается более экономичной по сравнению с традиционной позиционной системой представления данных ТМИ. При этом

экономичность понимается, как дополнительное повышение в 1,4 раза той информационной нагрузки, которую при передаче ТМИ несет каждый символ преобразованного кода. Поэтому оказывается, что избыточность содержится внутри преобразованного слова-измерения, а разрядность слов остается такой же, как и при использовании простого двоичного кода. Безыбыточное представление слов-измерений, которое появляется при объединении двух образов-остатков, например,

$$x(t) \equiv b_1(t) \pmod{2^n-1} \text{ и } x(t) \equiv b_3(t) \pmod{2^n+1}$$

приводит к следующему положительному эффекту:

- преобразованный ТМП не обязательно должен находиться в пределах шкалы телеизмерений $Ш=0-(2^n-1)$, границы которой задаются калибровочными уровнями 0 и 100%, он претерпевает разрывы, в результате чего более эффективно используется все поле отображения данных, задаваемое кодовыми комбинациями слов-измерений C_p ;

- между разрывами значений преобразованного ТМП элементарный квант изменения данных увеличивается при байтовых словах в 17 раз ($d_{\text{СОК}}^{(2)}(X) = 17$), что создает предпосылки для повышения помехоустойчивости приема переданной ТМИ (при традиционной передаче элементарный квант, определяющий минимальное расстояние между соседними значениями ТМП был равен 1: $d_{\text{мп}}(X) = 1$).

Вероятность ошибочного приема образа-остатка $b_i(t)$ при этом равна

$$P_{\text{ош}}(b) = \sqrt{P_{\text{ош}}}, \quad (8)$$

где $P_{\text{ош}}(W)$ – вероятность того, что слово-измерение будет принято с ошибкой, а $P_{\text{ош}}(b)$ – вероятность того, что полуслово $b_i(t)$, представляющее собой образ-остаток, также будет принято с ошибкой.

Тогда, если $P_{\text{ош}}(W) = 0,9$, то $P_{\text{ош}}(b) \approx 0,95$. Следовательно, помехоустойчивость приема образов-остатков при том же уровне помех существенно выше.

Однако имеют место и недостатки, которые необходимо устранить. Основной недостаток связан с необходимостью введения избыточного символа, необходимого для разрешения неоднозначности между отдельными значениями образов-остатков, полученных при сравнении по модулю 2^n+1 . В качестве примера наиболее часто используются байтовые слова, применение которых рекомендуется международными стандартами в области телеметрии и передачи данных. В этом случае модуль сравнения $m_3 = 17$. Если при этом используется и второй модуль сравнения $m_1 = 15$, то появляется неоднозначность при идентификации следующих значений: 0 и 16, а также связанных с ними следующих пар:

$$0 - 135 \text{ и } 16 - 136.$$

Возможность неоднозначного восстановления некоторых переданных значений в рамках нового подхода к проблеме помехоустойчивой передачи информации трактуется, как результат мягкого декодирования. При этом классическое требование однозначного соответствия всех восстановленных значений переданным обозначается таким определением, как жесткое декодирование.

Так как число 16 в двоичной системе занимает 5 бит плюс первое кодовое слово в 4 бита, в результате оно не помещается в общую длину кодового слова, равную 8 бит.

Это приводит к непостоянному значению элементарного кванта (расстояния $d(x)$) между кодовыми словами. В этом случае при подавляющем числе значений $d(x)$, кратных 17: $d(x) = k \times 17$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, встречаются такие отдельные значения $d(x)$, как $d_1(x) = 1$ и $d_2(x) = 16$. Они появляются в результате разрывов первого рода между соседними значениями преобразованного ТМП, например, $x_n(t) = \langle b_1(t), b_3(t) \rangle_2$, где $\langle \rangle_2$ – знак объединения образов-остатков $b_1(t), b_3(t)$ в новое слово-измерение той же разрядности, что и исходное $x(t)$, которое при приеме ТМИ необходимо восстановить в первоначальном виде.

В предлагаемом методе формирования кодовых слов существует четкое соответствие исходного параметра – декодируемому его образу при сохранении вышеперечисленных новых свойств, которые связаны с нетрадиционным представлением данных образами-остатками.

Его применение позволяет наиболее просто перейти от мягкого декодирования к жесткому. В итоге это позволяет с большей долей вероятности выделить параметр, искаженный помехой, в его первоначальном виде.

Если бы не было ограничения, накладываемого на длину передаваемого кодового слова, то отклонения параметра dX можно было бы установить со 100 %-ной гарантией. Но из-за двух неоднозначных толкований результата декодирования вводить дополнительный 5-й символ также нецелесообразно.

Если жесткие требования по разрядности информационных слов не установлены, то разрешение проблемы неоднозначности идентификации отдельных значений тривиальное. Для того, чтобы кодовая конструкция была оптимальной, 5-й разряд используется как «Контрольный символ четности», обеспечивающий четное число символов «1». Если же появляется необходимость в том, чтобы числа 0 и 16, а также образованные на их основе пары 0 – 135 и 16 – 136 были разделены, то вместо «Контрольного символа четности» передаются дополнительные признаки, позволяющие их различить. Это также двоичные символы «1» или «0».

Однако самый большой интерес представляет нахождение наиболее простого технического решения этой проблемы в случае, когда разрядность слов не может быть увеличена, например, при выполнении требований международных стандартов в области телеметрии и передачи информации.

Рассмотрим пример.

Для реализации режима жесткого декодирования значений ТМП при сохранении элементарного кванта, равного 17, для байтовых слов необходимо следующее соответствие между значениями ТМП X_i и кодовым словом C :

$$C_i = d(x) \times X_i = 17 \times X_i. \quad (9)$$

В результате мы получим следующую таблицу соответствий (табл. 1).

Таблица 1
Соответствие между значениями ТМП X и кодовым словом C

| | | | | | | | | | |
|-------|---|----|----|----|----|----|-----|---|------|
| X_i | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | - | 255 |
| C_i | 0 | 17 | 34 | 51 | 68 | 85 | 102 | - | 4335 |

В данном случае гарантировано устраняются помехи, которые не выходят за пределы порогов $\Delta x = \pm 8$, выставленных относительно позиций, которые должны занимать преобразованные соседние слова-измерения $X_{ni-l}, X_{ni}, X_{ni+l}$.

Однако при этом необходимо будет ввести еще дополнительных 5 бит. В результате слово из 8-разрядного превратится в 13-разрядное, что недопустимо. Но этого можно избежать, если выражение (9) будет записано, как результат представления по дополнительному модулю $m_i = 256$.

Методические положения оптимального разрешения противоречий

Существует метод оптимизационного разрешения отмеченных выше противоречий. Он связан со сравнением (9) по модулю m_i .

В случае восьмибитного кодового слова $C_i (n = 8)$ дополнительный модуль сравнения равен: $m_i = 2^n$. В этом случае оптимальное соответствие между C_i и X_i может быть представлено, как

$$C_i = 17 \times X_i \pmod{256}. \quad (10)$$

Для разделения между собой преобразованных значений ТМП X_n^* , искаженных помехами E : $X_n^* = X_n + E$, необходимо установить пороги $\Delta(X) = d(X)/2$, позволяющие разделить позиции X_{ni}^* . Для случая байтовых слов $\Delta(X) = d(X)/2 = 17/2 \approx 8$.

В табл. 2 представлены результаты соответствий значений ТМП X_i от 0 до 255 и соответствующих слов-измерений X_{ni} , составленных из образов-остатков, рассчитанных по формуле (10).

Из табл. 2 следует, что в результате преобразова-

Таблица 2
Соответствие значений ТМП X_i от 0 до 255 и соответствующих слов-измерений X_{ni}

| | | | | | | | | | | |
|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|---|-------|----------|
| X_i | X_{ni} | X_i | X_{ni} | X_i | X_{ni} | X_i | X_{ni} | . | X_i | X_{ni} |
| 0 | 0 | - | - | - | - | - | - | . | - | - |
| 1 | 17 | 16 | 16 | 31 | 15 | 46 | 14 | . | 241 | 1 |
| 2 | 34 | 17 | 33 | 32 | 32 | 47 | 31 | . | 242 | 18 |
| 3 | 51 | 18 | 50 | 33 | 49 | 48 | 48 | . | 243 | 35 |
| 4 | 68 | 19 | 67 | 34 | 66 | 49 | 65 | . | 244 | 52 |
| 5 | 85 | 20 | 84 | 35 | 83 | 50 | 82 | . | 245 | 69 |
| 6 | 102 | 21 | 101 | 36 | 100 | 51 | 99 | . | 246 | 86 |
| 7 | 119 | 22 | 118 | 37 | 117 | 52 | 116 | . | 247 | 103 |
| 8 | 136 | 23 | 135 | 38 | 134 | 53 | 133 | . | 248 | 120 |
| 9 | 153 | 24 | 152 | 39 | 151 | 54 | 150 | . | 249 | 137 |
| 10 | 170 | 25 | 169 | 40 | 168 | 55 | 167 | . | 250 | 154 |
| 11 | 187 | 26 | 186 | 41 | 185 | 56 | 184 | . | 251 | 171 |
| 12 | 204 | 27 | 203 | 42 | 202 | 57 | 201 | . | 252 | 188 |
| 13 | 221 | 28 | 220 | 43 | 219 | 58 | 218 | . | 253 | 205 |
| 14 | 238 | 29 | 237 | 44 | 236 | 59 | 235 | . | 254 | 222 |
| 15 | 255 | 30 | 254 | 45 | 253 | 60 | 252 | . | 255 | 239 |

{ Фаза }
{ Фаза }
{ Фаза }
{ Фаза }
{ Фаза }

ния установлено жесткое соответствие исходного параметра X_i и преобразованного его значения X_{ni} .

Соответствие (10) устанавливает связь между ними с использованием понятия *фазы* f (табл. 2), которая будет величиной постоянной для каждого столбца, отмеченного внизу фигурной скобкой.

На рис.1 представлена исходная измерительная информация в виде линейно изменяющихся значений ТМП и ее представление в традиционном виде.

Тот же ТМП, но преобразованный на основе объединения двух образцов остатков $x_n(t) = \langle b_1(t), b_3(t) \rangle$, представлен на рис. 2.

Основными задачами предварительной обработки измерительных данных, направленной на повышение её качества, являются:

- устранение случайных искажений, носящих систематический характер, в зарегистрированных результатах измерений;
- удаление аномальных результатов измерений;
- обнаружение и коррекция случайных ошибок.

Методическая схема алгоритма исправления ошибок передаваемого ТМП, составленного из образцов остатков, представлена на рис. 3.

Вначале определяются разрывы 1-го рода среди

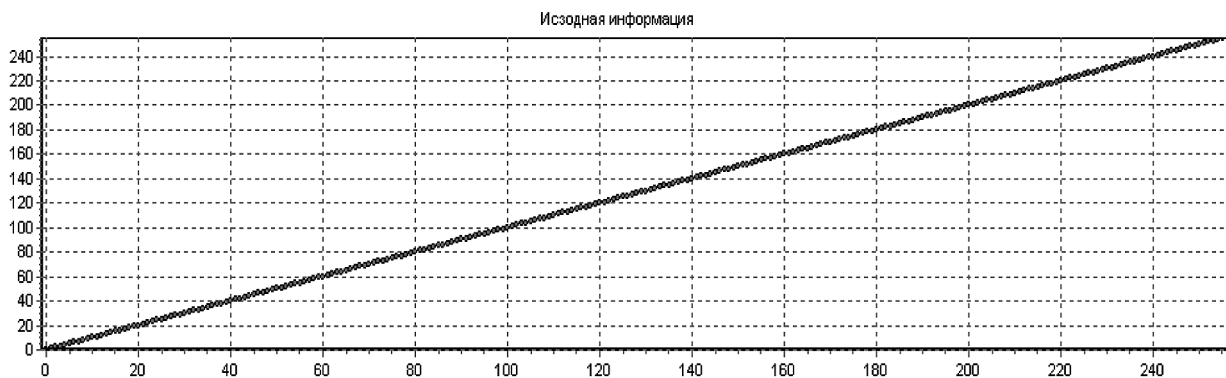


Рис. 1. Линейно изменяющийся ТМП, представленный в традиционном виде

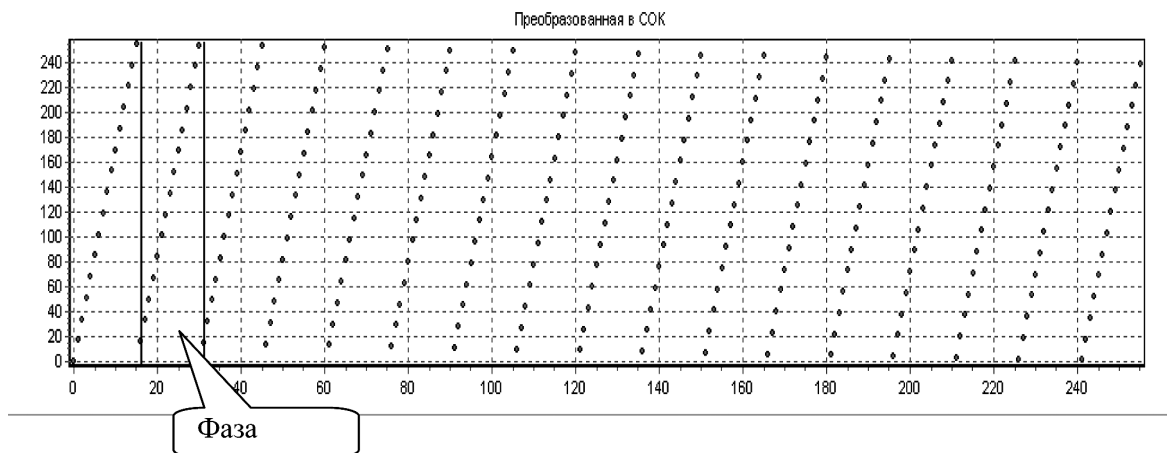


Рис. 2. Линейно изменяющийся ТМП, представленный словами, составленными из образцов-остатков

Алгоритмы восстановления данных из образцов-остатков

Восстановление (декодирование) информации осуществляется с использованием следующих операций:

1. Необходимо вычислить вспомогательные коэффициенты

$$M_i = C_i \text{ mod } 17;$$

$$d_i = C_i \text{ div } 17.$$

2. Вычисляется исходное значение параметра

$$X_i = (16 + 15 \times (16 - M + d)) \text{ mod } 256. \quad (11)$$

Исправление ошибок при восстановлении данных

последовательности передаваемых значений X_{ni} . Группа данных, составляющих каждый из фрагментов ТМП, заключенных между разрывами, обладает характерным для неё свойством – фазой f_{zpi} .

Чтобы определить, к какой группе принадлежат значения преобразованного ТМП X_{ni} , необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$f_{zpi} = C_i \text{ mod } 17. \quad (12)$$

На рис. 4 представлены фазы соответствующих групп данных, изображенных на рис. 3.

Рассмотрим возможный вариант возникнове-

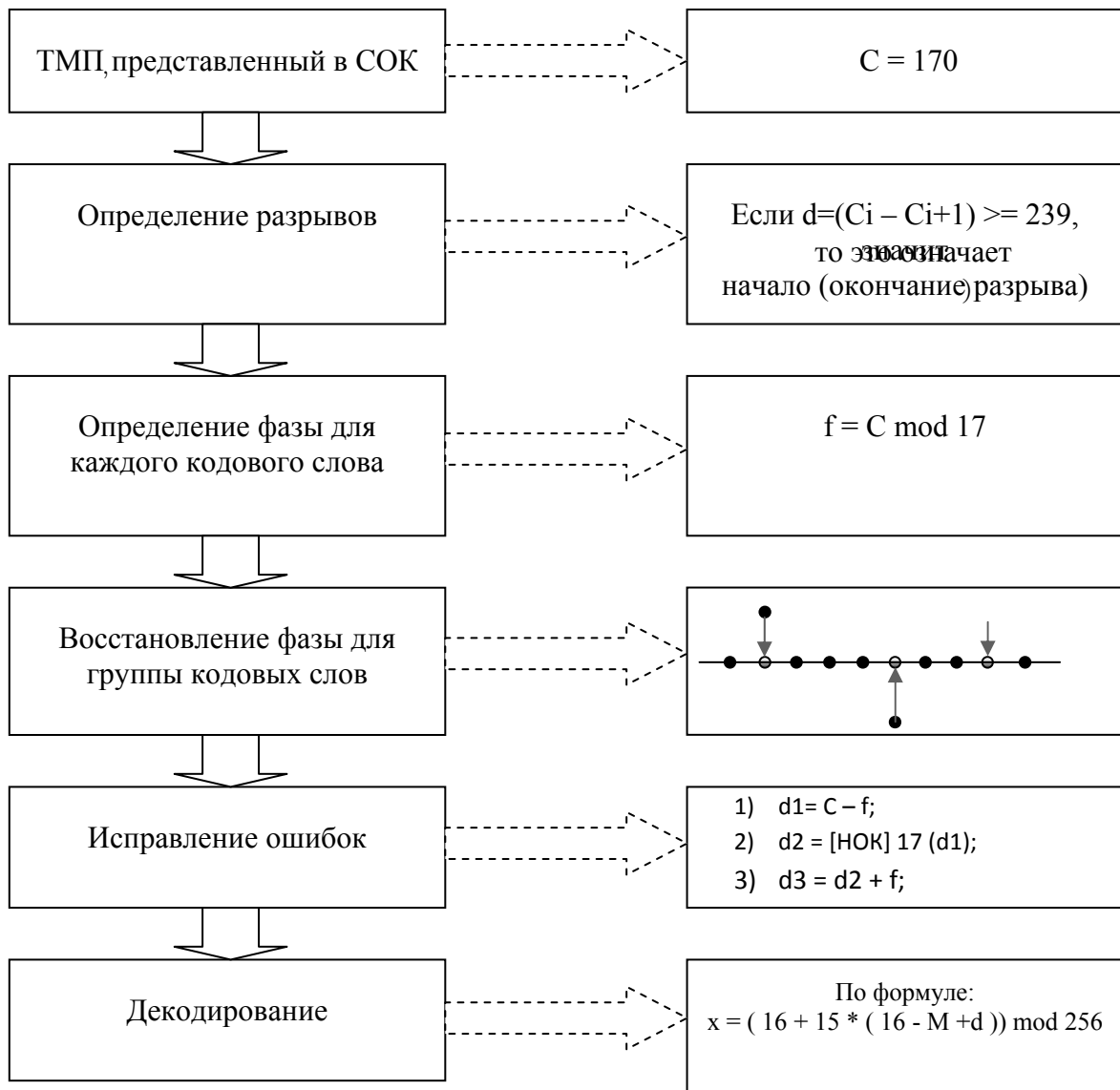


Рис. 3. Методика исправления ошибок передаваемого ТМП, составленного из образов-остатков

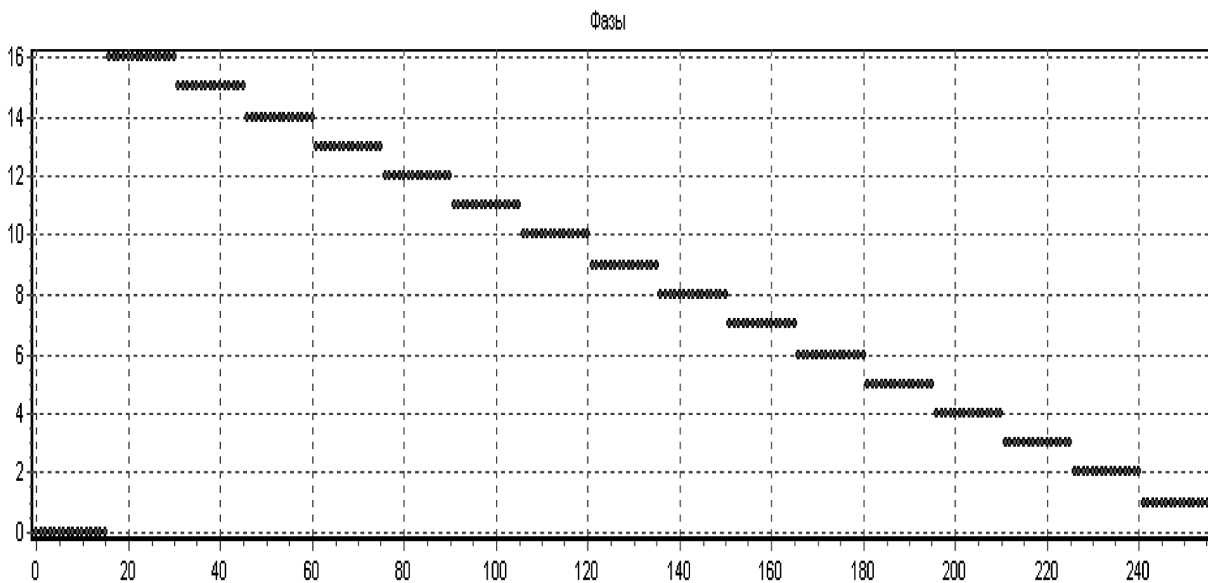


Рис. 4. Графическое представление фаз соответствующих фрагментов ТМП (групп данных), разделенных разрывами первого рода

ния помех при передаче параметра представленного образцами-остатками.

Преобразованный ТМП искажают случайной помехой E_i ; $C_i^* = C_i \pm E_p$, где E_i – величина помехи, не превосходящая по амплитуде 8 первоначальных элементарных квантов, равных 1.

В результате получим следующее графическое представление преобразованного ТМП, подвергнутого искажению помехами при передаче ТМИ (рис. 5).

торой составляет коррекция фаз (рис. 3), исходный ТМП оказывается восстановленным с множеством искаженных значений, которые появились в результате действия помех.

Воспользуемся предлагаемым алгоритмом исправления ошибок. С этой целью в выделенных фрагментах ТМП (группах данных), находящихся внутри разрывов, определяются значения фаз. Они также будут искажены помехами (рис. 7), но по определению в соответ-

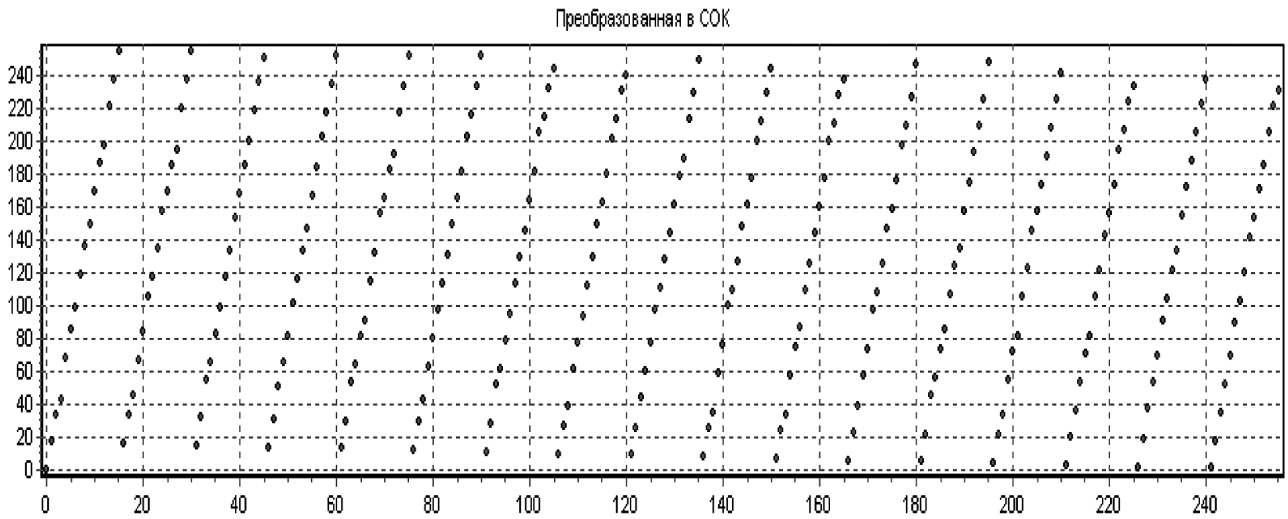


Рис. 5. Графическое представление преобразованного ТМП, подвергнутого искажению при передаче ТМИ

Из рис. 5 следует, что после воздействия помех на передаваемый ТМП расстояние между значениями X_m перестало быть постоянной величиной (условие равенства нового элементарного кванта $d(X) = 17$ выполняется не всегда).

Результаты декодирования значений X_m переданного ТМП при искажениях помехами приведены на рис. 6.

вствии со свойствами инвариантности преобразований ТМП, основу которых составляют образы-остатки, их значения должны совпадать.

Предварительная обработка ТМП, составленных из образов-остатков $(x_n(t) = \langle b_1(t), b_3(t) \rangle)$, заключается в следующем.

1. Вначале необходимо идентифицировать значе-

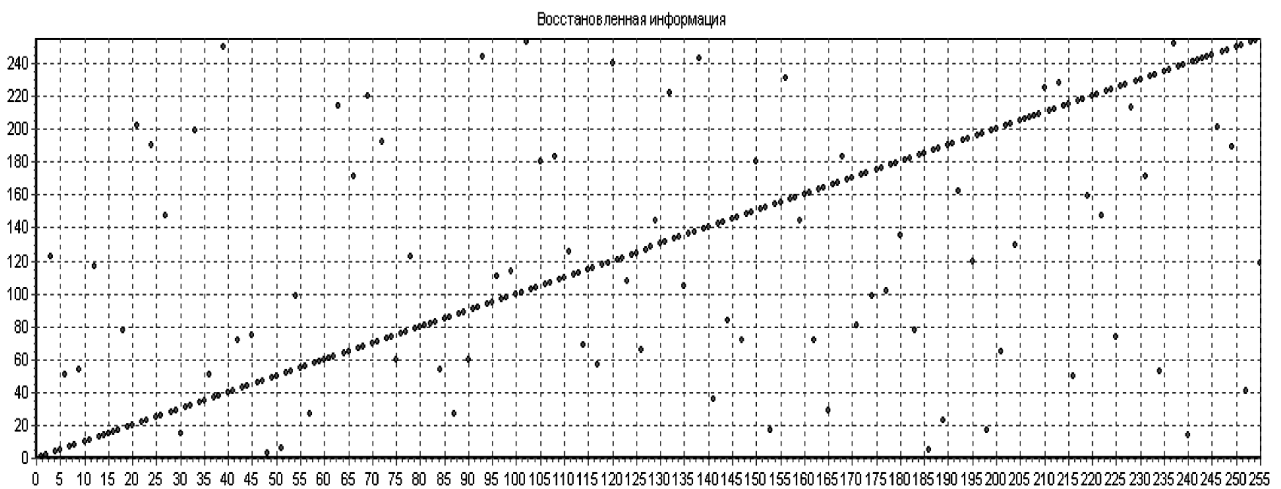


Рис. 6. Результаты декодирования значений X_m преобразованного ТМП при искажениях помехами

В результате после декодирования ТМИ без предварительной обработки полученных данных, основу ко-

дирования фаз f_{zpi} выделенных фрагментов (групп данных). Далее следует найти позиции фаз по наибольшему числу их

совпадений. Свойство инвариантности преобразованного ТМП, составляющее основу последующей коррекции значений фаз, заключается в том, что между разрывами фрагментов преобразованного ТМП $f_{\text{пр}} = \text{const}$.

2. Для исправления ошибок, вызванных различного рода помехами, необходимо восстановить фазы для каждого из выделенных фрагментов. Для этого все смещенные со своего места значения фаз, искаженные в результате действия помех, должны быть возвращены на позицию, которая определяется многократным их совпадением (рис. 8).

На рис. 8 линиями отмечены восстановленные фазы искаженного параметра.

3. После того, как будут установлены истинные значения фаз, необходимо воспользоваться следующим алгоритмом восстановления фрагмента преобразованного ТМП

$$\left. \begin{aligned} d_{i1} &= C_i - f_i; \\ d_{i2} &= \text{ближайшее кратное значению: } m(d_{i1}); \\ d_{i3} &= d_{i2} + f_i. \end{aligned} \right\} (13)$$

Число d_{i3} является достоверным кодовым значением и дальнейшее декодирование осуществляется по формуле (12).

Пример восстановления

Исходные значения

| C_i | f_i |
|-------|-------|
| 100 | 15 |
| 117 | 15 |
| 134 | 15 |
| 151 | 15 |
| 168 | 15 |
| 185 | 15 |
| 202 | 15 |

Искаженные значения
(выделены жирным шрифтом)

| C_i | f_i |
|------------|-------|
| 100 | 15 |
| 117 | 15 |
| 130 | 11 |
| 151 | 15 |
| 160 | 7 |
| 185 | 15 |
| 202 | 15 |

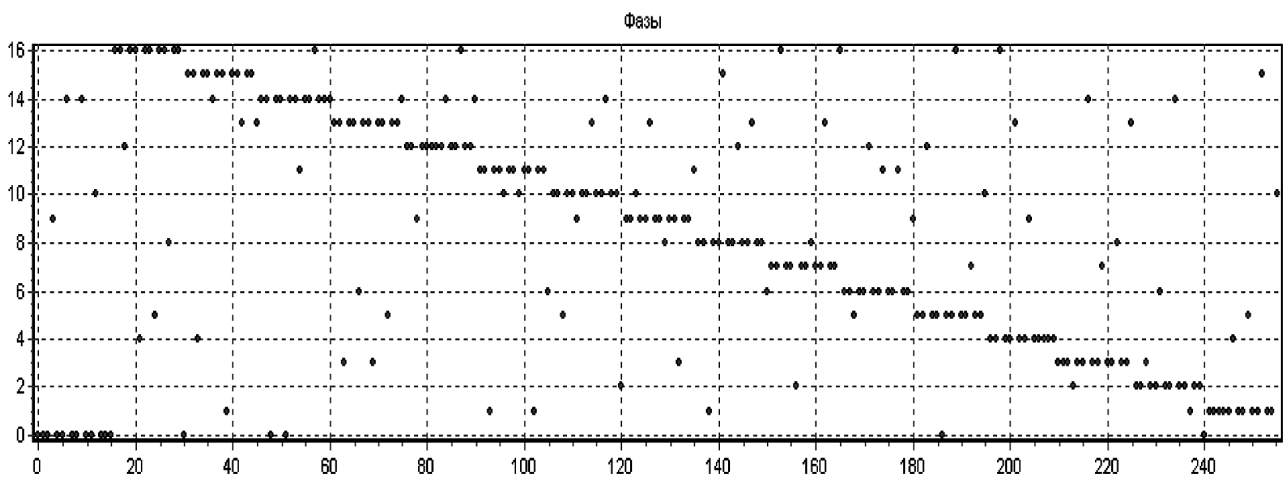


Рис. 7. Графическое представление фаз соответствующих групп данных (некоторые из них искажены в результате действия помех)

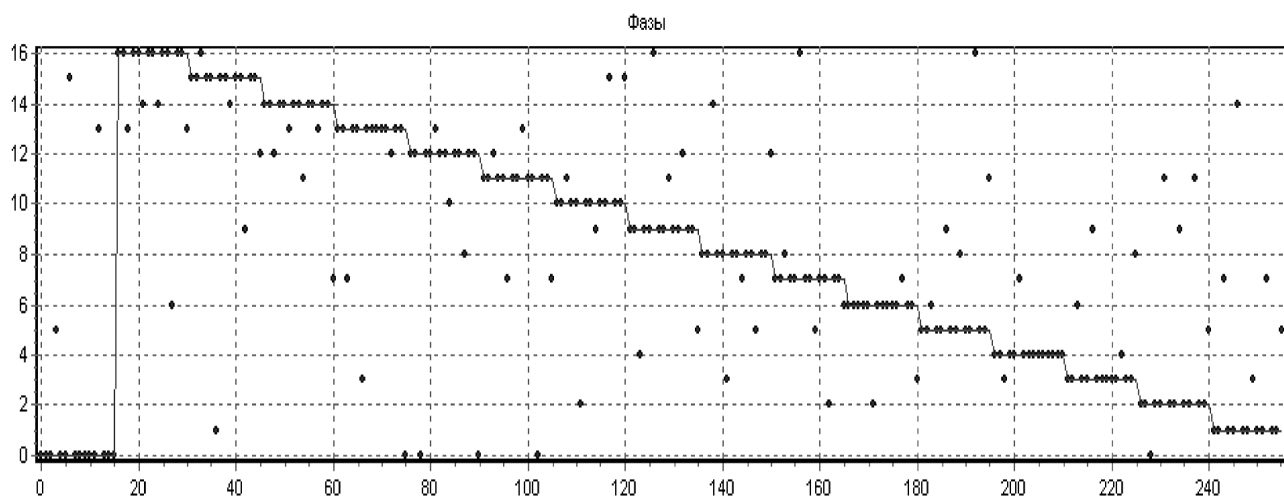


Рис. 8. Графическое представление восстановленных фаз фрагментов ТМП (групп данных), находящихся внутри разрывов первого рода

Если декодировать полученные значения с помощью адаптивного алгоритма обратного восстановления данных, основанного на конструктивной теореме об остатках, то при искажениях помехами они будут восстановлены с ошибками. Для исправления ошибок необходимо восстановить значения фаз (рис.8).

Для данного примера параметр изменяется в пределах одной фазы, соответственно при восстановлении общей фазы анализируется участок с использованием критерия наибольшего числа повторений одного значения.

В нашем случае 15,15,11,15,7,15,15 – число 15 встретилось пять раз из семи. Следовательно, необходимо значения 11 и 7 заменить на 15.

Алгоритм восстановления значений ТМП в исходном виде с устраненными ошибками заключается в следующем.

1. Для исправления ошибочных значений, вызванных различными видами помех, воспользуемся формулой (2).

$$d_{i1} = 130 - 15 = 115;$$

$$d_{i2} = \text{ближайшему кратному } 17 \text{ от } d_{i1} = 119;$$

$$d_{i3} = 119 + 15 = 134.$$

Ошибка устранена, восстановленное число 134 соответствует исходному значению.

2. Аналогично восстановим следующее искаженное значение 160.

$$d_{i1} = 160 - 15 = 145;$$

$$d_{i2} = \text{ближайшему кратному } 17 \text{ от } d_{i1} = 153;$$

$$d_{i3} = 153 + 15 = 168.$$

Ошибка устранена, восстановленное число 168 соответствует исходному значению ТМП.

Общая формула формирования кодового слова длины L

$$C_i = X_i \times m_i \pmod{L},$$

где m_i – модуль преобразования;

L – длина кодового слова;

X_i – восстановленное значение ТМП.

В результате такого преобразования будет установлено жесткое соответствие нового значения передаваемого параметра исходному, при этом расстояние между кодовыми словами будет составлять $m/2$.

Расстояние, равное $m/2$, позволяет осуществлять контроль достоверности передаваемого параметра и исправление ошибок.

Таким образом, в качестве общепризнанного критерия оценивания помехоустойчивости следует выбрать, кодовое расстояние $d(x)$.

В результате увеличения длины кодового слова появляется возможность увеличить кодовое расстояние между фрагментами:

- при 6-битовой длине кодового слова кодовое расстояние составляет ± 4 ;
- при 8-битовой длине кодового слова кодовое расстояние составляет ± 8 ;
- при 10-битовой длине кодового слова кодовое расстояние составляет ± 16 ;
- при 12-битовой длине кодового слова кодовое расстояние составляет ± 32 .

Приведенные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

- возможность обнаружения и исправления ошибок появляется при представлении данных образами-остатками;
- обнаружение и исправление ошибок становится возможным и при использовании избыточного кода;
- наиболее эффективный механизм обнаружения и исправления ошибок основан на свойстве постоянства (равноостаточности) преобразованных результатов телеизмерений внутри узкой шкалы представления значений ТМП, ограниченных модулем сравнения $2^n - 1$.

Литература

1. Гуткин Л.С. Теория оптимальных методов приема при флуктуационных помехах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961 – 488с.
2. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: «Радио и связь», 1982 – 623с.
3. Емельянов Г.А., Шварцман В.О. Передача дискретной информации. – М.: «Радио и связь», 1982 – 240с.
4. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. – М.: Мир, 1976. – 593с.
5. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика: т.1 Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании кон-структивной теоремы об остатках», - М.: МО РФ, 2003 – 284с.

Материал поступил в редакцию 24. 03. 2011 г.