

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ**

УДК 621.398

Алгоритмы устранения избыточности информации, передаваемой от бортовых телеметрических систем на Землю

В. В. Орешко

АО «Российские космические системы»

e-mail: viktororeshko@mail.ru

Аннотация. В статье представлены характеристики некоторых бортовых радиотелеметрических систем (БРТС). Описан способ формирования данных для выходного кадра БРТС и возникающая избыточность в передаваемых на Землю пакетах данных. Рассматриваются два способа устранения возникающей избыточности: адаптивный разностный алгоритм формирования данных и способ, основанный на нетрадиционном представлении данных образами-остатками.

Адаптивный разностный алгоритм — это накопительный алгоритм с пакетной передачей данных. Имеет две особенности, которые накладывают ограничение на возможность его применения: низкая помехоустойчивость алгоритма и задержка при передаче информации.

При управлении или возникновении аварийной ситуации внесение лишних задержек в поступлении информации недопустимо. Суть способа, основанного на нетрадиционном представлении данных образами-остатками, заключается в уменьшении динамического диапазона передаваемых данных в два раза. Вместо исходного $2n$ -разрядного слова-измерения передается его остаток от деления на 2^n , который занимает в два раза меньше бит. Уменьшение избыточности на основе этого алгоритма может быть использовано в случае, если о контролируемом параметре заранее известно, что у него не может возникнуть скачков между соседними измерениями больших, чем 2^n при шкале 2^{2n} .

Ключевые слова: обработка результатов измерений на борту, устранение избыточности данных, информационный пакет, бортовая радиотелеметрическая система

Algorithms for Elimination of the Redundancy of the Information Transmitted from Onboard Telemetry System to the Earth

V. V. Oreshko

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: viktororeshko@mail.ru

Abstract. In this article the characteristics of some onboard radiotelemetry systems (RTS) are given. A method for forming the data for the egress frame of the onboard RTS and the arising redundancy in the data packages transmitted to the earth are described. Two methods of elimination of the arising redundancy are considered: the adaptive difference algorithm of data forming and a method based on the constructive theorem of the remainders.

The adaptive difference algorithm is an accumulative algorithm with a packet transmission of the data. It is characterized by a low noise stability and an information transfer lag. Those characteristics impose limitations on its applicability.

For control, or when an emergency occurs, large delays in data transmission are inadmissible. The essence of the method based on the constructive theorem of the remainders consists in halving of the dynamic range of the transmitted data. In place of the initial $2n$ -digit word-measurement, its remainder of division by 2^n , which occupies half as many bits, is transmitted. The deduction of redundancy based on this algorithm can be used when it is known in advance that the measured parameter cannot have difference between any two consequential measurements of more than 2^n on a scale of 2^{2n} .

Keywords: onboard processing of results of remote measurements, elimination of the data redundancy, packet telemetry, onboard radiotelemetry system

Введение

Рассматриваются бортовые радиотелеметрические системы (БРТС), к которым подключаются температурные (с частотой опроса 1–10 Гц), аналоговые и дискретные (сигнальные) датчики (с частотой опроса 50–200 Гц). Во всех БРТС подобного типа присутствует избыточность в передаваемых на Землю пакетах данных, обусловленная особенностями построения радиотелеметрической системы и алгоритмами функционирования.

Наибольшую часть информативности потока данных от БРТС на Землю занимают аналоговые датчики (см. табл. 1). Коммутатор аналоговых датчиков обычно имеет 1 АЦП на 64 датчика, и все они опрашиваются по очереди с одинаковой частотой. Полученные данные передаются в буферную память центрального блока системы, который, в соответствии с заложенной программой опроса, формирует из них выходной кадр БРТС.

При таком способе формирования данных по некоторым каналам будет присутствовать избыточ-

ность информации, так как не для всех каналов требуется одинаковая частота опроса. Частично эта избыточность может компенсироваться при формировании выходного кадра системы, путем прореживания информации, поступающей в буфер от некоторых датчиков. Рассмотрим два способа устранения возникающей избыточности: адаптивный разностный алгоритм формирования данных и способ, основанный на нетрадиционном представлении данных образами-остатками.

Адаптивный разностный алгоритм

Это накопительный алгоритм с пакетной передачей данных. При передаче используется пакет фиксированного размера. Адаптивность заключается в следующем: в зависимости от разницы между соседними измерениями в пакете может уместиться разное количество измерений. Чем меньше разница между соседними измерениями, тем больше измерений может уместиться в пакете. Подробно алгоритм рассмотрен на примере 8-разрядных измерений с использованием пакета CCSDS в [1]. Размер пакета для примера был взят 202 байта.

Для моделирования необходимо обобщить алгоритм. В общем случае размер информационной части пакета может быть различным. Пусть X — размер информационной части пакета, выраженный в битах, $8 \leq X \leq 1616$ бит. Y — разрядность АЦП, $6 \leq Y \leq 24$ бит. Тогда алгоритм будет выглядеть так, как представлено на рис. 1 или в табл. 2.

На рис. 2–5 показаны результаты моделирования алгоритма и изменяемые параметры.

Первый (верхний) график — исходный сигнал вида: $2^{Y-1} + 2^{Y-1} \times \sin(2\pi\omega t)$. Второй график — пачки несжатого сигнала, приведенного к байтному представлению, имитация выдачи пакетов. Имеется в виду, что если разрядность АЦП равна, например, 12, то два исходных измерения будут на втором графике представлены тремя точками (байтами: $12 \times 2/8 = 3$). Период выдачи байтов пакета для наглядности взят в 10 раз меньший, чем частота опроса исходного сигнала. Третий график — пачки сигнала, обработанные в соответствии с алгоритмом, имитация выдачи пакетов. Четвертый график (нижний) — восстановленный

Таблица 1. Некоторые бортовые радиотелеметрические системы

Система	Количество датчиков	Частоты опроса, Гц	Информативность, % от общей
БИТС-Б	256 дискретных	200	14
	192 аналоговых	200	84
	155 температурных	6	2
РТСЦ	448 дискретных	100	14,8
	320 аналоговых	100	84,5
	90 температурных	3	0,7
БИТС2Ц-7М	1792 дискретных	100	46,3
	256 аналоговых	100	52,9
	252 температурных	1,6	0,8
МБИТС-ТК	768 дискретных	100	27,1
	256 аналоговых	100	72,1
	186 температурных	1,6	0,8
МБИТС-01	1152 дискретных	100	35,8
	256 аналоговых	100	63,7
	252 температурных	0,78	0,5

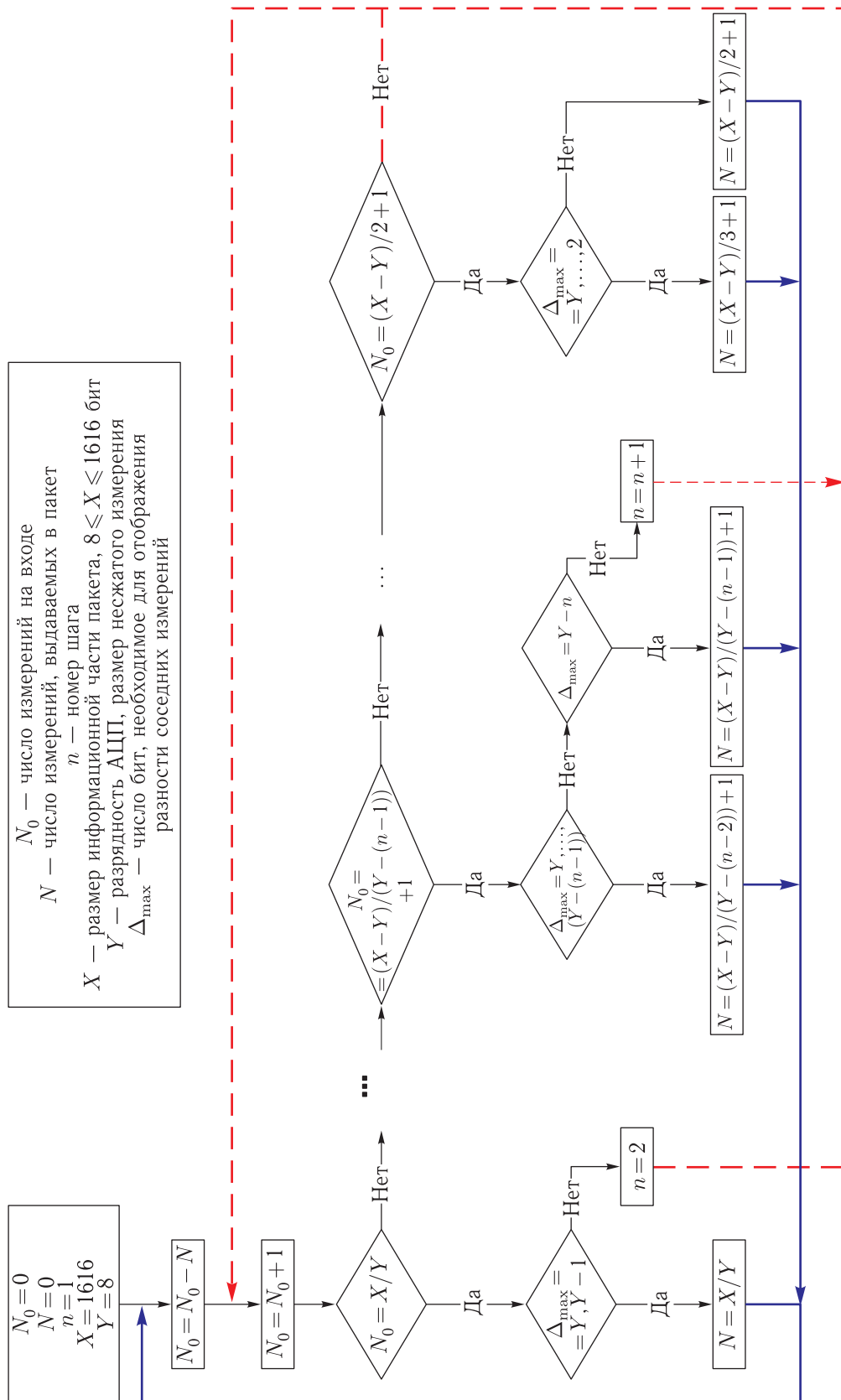


Рис. 1. Блок-схема обобщенного адаптивного разностного алгоритма

Таблица 2. Пошаговая работа адаптивного разностного алгоритма

Номер шага	Действие для буфера, в котором накапливаются измерения	Анализ Δ_{\max} — максимального количества бит, необходимого для отображения в двоичной форме разницы значений между измерениями
1	Накопление X/Y измерений	$\Delta_{\max} = Y$ или $(Y - 1)$ бит, в пакете X/Y измерения $\Delta_{\max} < (Y - 1)$ бит, переход к действию 2
2	Накопление $((X - Y)/(Y - 2) + 1)$ измерений	$\Delta_{\max} = Y$ или $(Y - 1)$ бит, в пакете X/Y измерения, переход к действию 1 $\Delta_{\max} = (Y - 2)$ бит, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - 2)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max} < (X - Y)/(Y - 2)$ бит, переход к действию 3
3	Накопление $((X - Y)/(Y - 3) + 1)$ измерений	$\Delta_{\max} = Y, \dots, (Y - 2)$ бит, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - 2)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max} = (Y - 3)$, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - 3)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max} < (Y - 3)$ бит, переход к действию 4
4	Накопление $((X - Y)/(Y - 4) + 1)$ измерений	$\Delta_{\max} = Y, \dots, (Y - 3)$ бит, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - 3)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max} = (Y - 4)$ бит, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - 4)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max} < (X - Y)/(Y - 4)$ бит, переход к действию 5

N	Накопление $((X - Y)/(Y - N) + 1)$ измерений	$\Delta_{\max} = Y, \dots, (Y - (N - 1))$ бит, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - (N - 1))$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max} = (Y - N)$ бит, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - N)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max} < (Y - N)$ бит, переход к действию $(N + 1)$

$Y - 1$	Накопление $(X - Y)/2$ измерений	$\Delta_{\max} = Y, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с $(X - Y)/3$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max} = 1$ бит, выдача 1 пакета с $(X - Y)/2$ измерениями, переход к действию 1

сигнал. Под четвертым графиком отображается коэффициент сжатия, определяемый как отношение общего количества выданных байт в соответствии со вторым графиком, к общему количеству выданных байт в соответствии с третьим графиком.

Из графиков видно, что чем выше частота сигнала, тем меньше коэффициент сжатия и время задержки выдачи первого пакета. А при уменьшении размера пакета уменьшается как время задержки информации, так и коэффициент сжатия.

Данный алгоритм имеет две особенности, которые накладывают ограничение на возможность его применения:

1) низкая помехоустойчивость алгоритма. При изменении нескольких бит в пакете из-за помехи все измерения в пакете, начиная с поврежденного места, будут недостоверными. При этом отсутствуют возможности контроля достоверности и восстановления информации;

2) так как алгоритм накопительный, то имеется задержка при передаче информации. При ча-

$T=60$; % время моделирования
 $P=0,01$; % период опроса
 $w=0,1$; % частота сигнала
 $X=1616$; % размер пакета, должно быть кратно 8
 $Y=8$; % разрядность АЦП

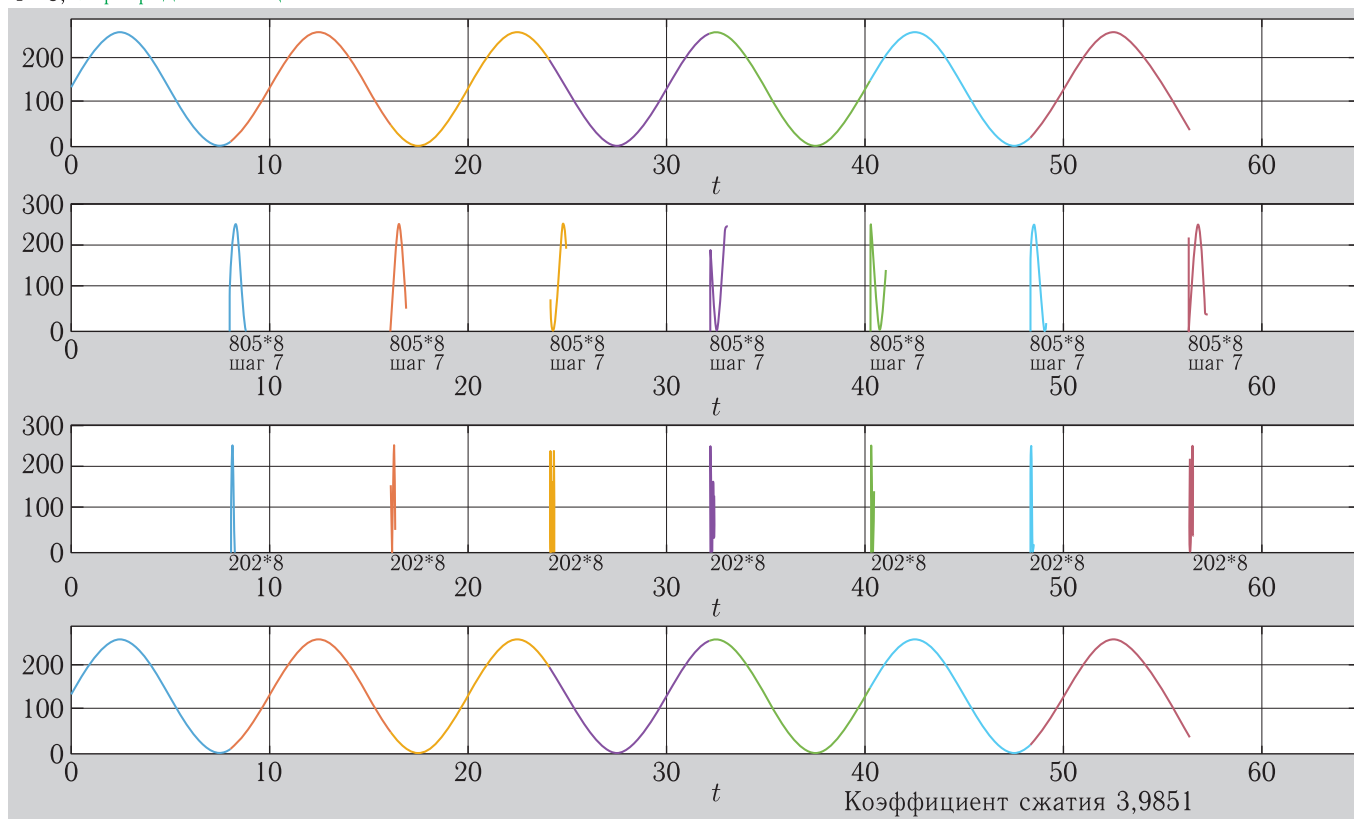


Рис. 2. Результаты моделирования

стоте опроса 100 Гц и размере информационной части пакета 202 байта в рассмотренном примере минимальная задержка составит 2 с, при этом сжатие информации отсутствует. Если же информация сжимается, то задержка составит до 8 с.

Первую особенность можно компенсировать, если использовать дополнительное помехоустойчивое кодирование информации внутри пакета на основе образов-остатков, более подробно рассматриваемое далее. Таким образом, остается один недостаток — задержка получения данных. Как видно из рис. 2 и 5, можно значительно уменьшить размер информационной части пакета. Минимальная задержка при этом уменьшится с 2,02 с до 0,09 с, а максимальная с 8 с до 0,4 с. Следует отметить, что при уменьшении информационной части пакета уменьшается и коэффициент сжатия. На рис. 2 и 5

коэффициенты сжатия составляют 3,9851 и 3,88 соответственно.

Алгоритмы преобразования данных на основе представления их образами-остатками

Есть несколько вариантов подобного кодирования. Например, каждый байт представляется в виде двух остатков от деления на 15 и 16. Каждый из остатков занимает не более 4 бит, при этом существует алгоритм однозначного восстановления данных из двух остатков по конструктивной теореме об остатках, представленный в [2]. Либо можно использовать алгоритм помехоустойчивого кодирования с двумя типами декодирования

T=60; % время моделирования
P=0,01; % период опроса
w=0,4; % частота сигнала
X=1616; % размер пакета, должно быть кратно 8
Y=8; % разрядность АЦП

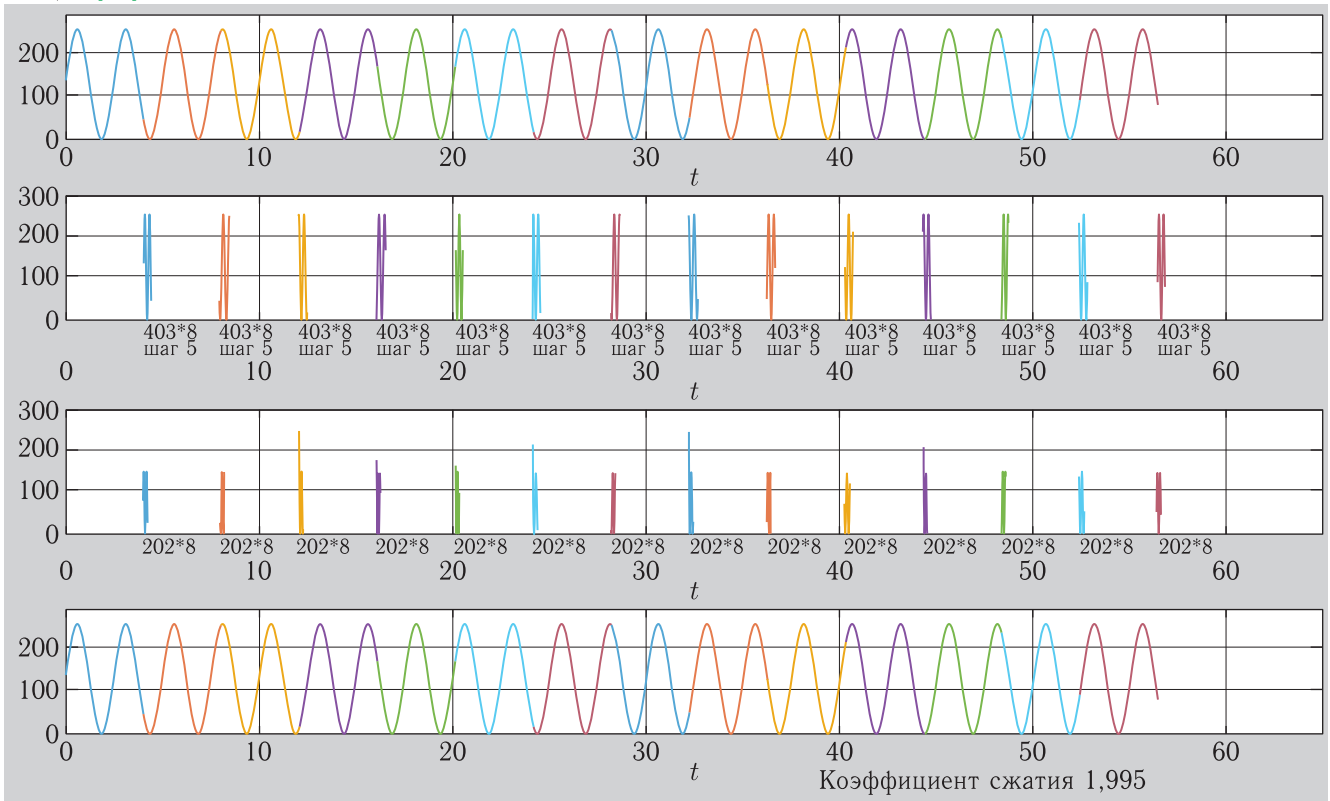


Рис. 3. Результаты моделирования

на принимающей стороне, условно называемыми «мягкое» и «жесткое» декодирование [3]. Суть алгоритма заключается в том, что исходный байт кодируется по формуле

$$C_i \equiv (X_i \times m_2) \pmod{m_3},$$

где X_i — исходный байт, $m_2 = 17$, $m_3 = 256$.

Алгоритм «жесткого» декодирования имеет следующий вид:

$$X_i = \frac{C_i^* + m_3[m_2 - (C_i^* \pmod{m_2})]}{m_2},$$

где $C_i^* = C_i + \varepsilon_i$ — закодированные на передающей стороне значения i — того результата телеизмерений, содержащие ошибку ε_i .

Алгоритм «мягкого» декодирования предполагает выполнение следующих операций:

1. Нахождение абсолютных разностей между соседними закодированными значениями телеметрируемого параметра (ТМП):

$$\delta_i = |C_{i+1}^* - C_i^*|.$$

2. Выделение графического фрагмента ТМП, заключенного между соседними значениями абсолютных разностей $\delta_i > 0,8m_3$.

3. Определение значений равноостаточности f_i^* для закодированных данных внутри выделенного графического фрагмента для каждого временного отсчета i :

$$f_i^* = C_i^* \pmod{m_3}.$$

4. Построение гистограммы распределений значений f_i^* и нахождение ее моды:

$$\text{мода } f_i^* = f_{\text{дост}},$$

T=60; % время моделирования
P=0,01; % период опроса
w=1; % частота сигнала
X=1616; % размер пакета, должно быть кратно 8
Y=8; % разрядность АЦП

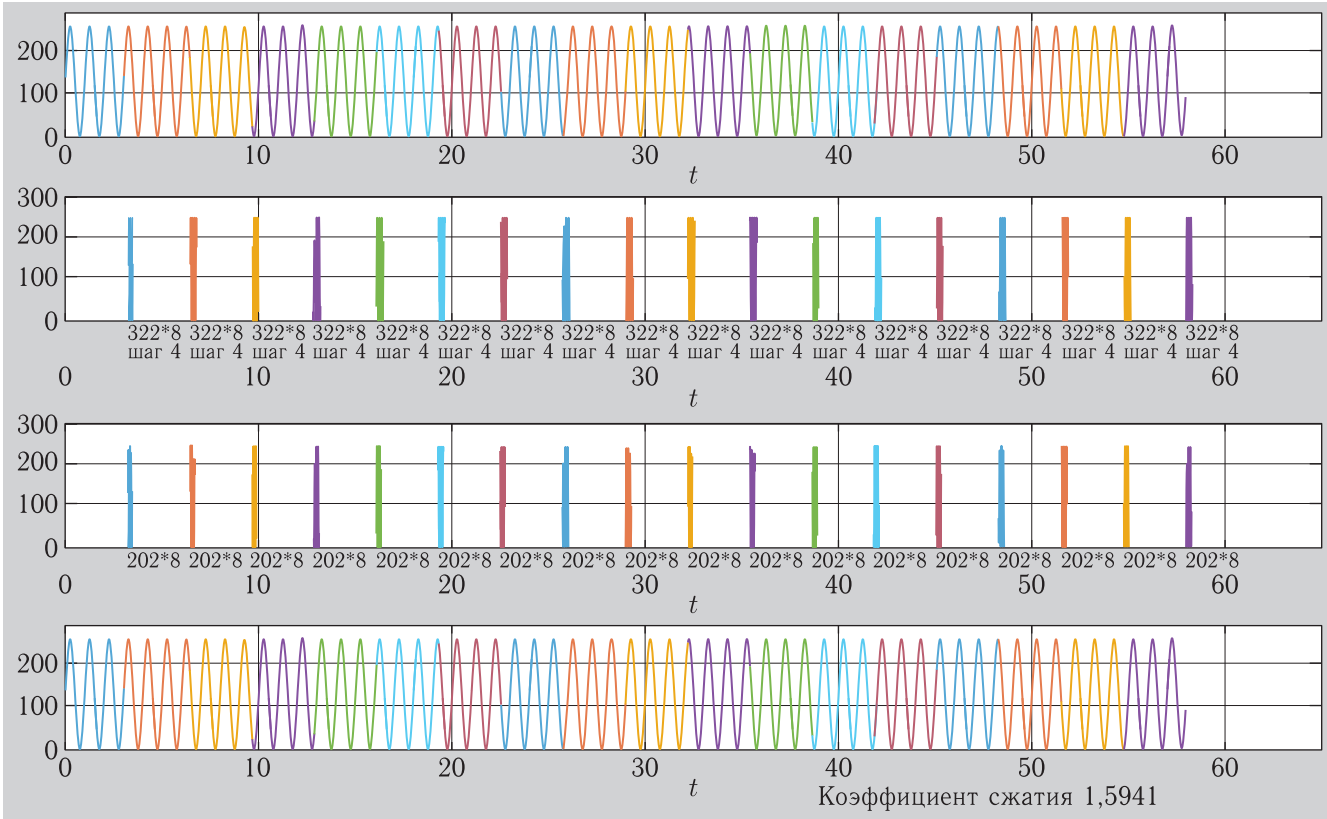


Рис. 4. Результаты моделирования

где $f_{\text{дост}}$ — значение равноостаточности, которое воспринимают как верное.

5. Выполнение операций:

а) корректировка f_i^* , предполагающая замену значений f_i^* , отличающихся от наиболее часто совпадающих значений (моды), на $f_{\text{дост}}$,

$$f_i^* \rightarrow f_{\text{дост}},$$

в результате чего исправляют ошибки ε_i ;

б) восстановление скорректированных значений

$$C'_i = C_i + \varepsilon'_i, \text{ где } \varepsilon'_i < \varepsilon_i;$$

в) сравнение C'_i со значением $C''_i = C_i + \varepsilon''_i$, полученным в первом блоке «жесткого» декодирования при использовании алгоритма сглаживания данных телеизмерений для подтверждения достоверности, и принятие решения о выдаче значения C'_i .

6. Окончание массива значений ТМП C_i^* , $i = 1, \dots, s$, попавших в выделенный графический фрагмент, и выдача результатов «мягкого» декодирования C'_i во второй блок «жесткого» декодирования.

Рассмотренные выше способы кодирования могут использоваться при необходимости повышения помехоустойчивости.

Представление данных образами-остатками можно также использовать для уменьшения избыточности передаваемых данных. Подробно способ описан в [2–4]. Суть способа заключается в уменьшении динамического диапазона передаваемых данных в два раза. Вместо исходного $2n$ -разрядного слова-измерения передается его остаток от деления на 2^n , который занимает в два раза меньше бит.

T=60; % время моделирования
P=0,01; % период опроса
w=0,1; % частота сигнала
X=200; % размер пакета, должно быть кратно 8
Y=8; % разрядность АЦП

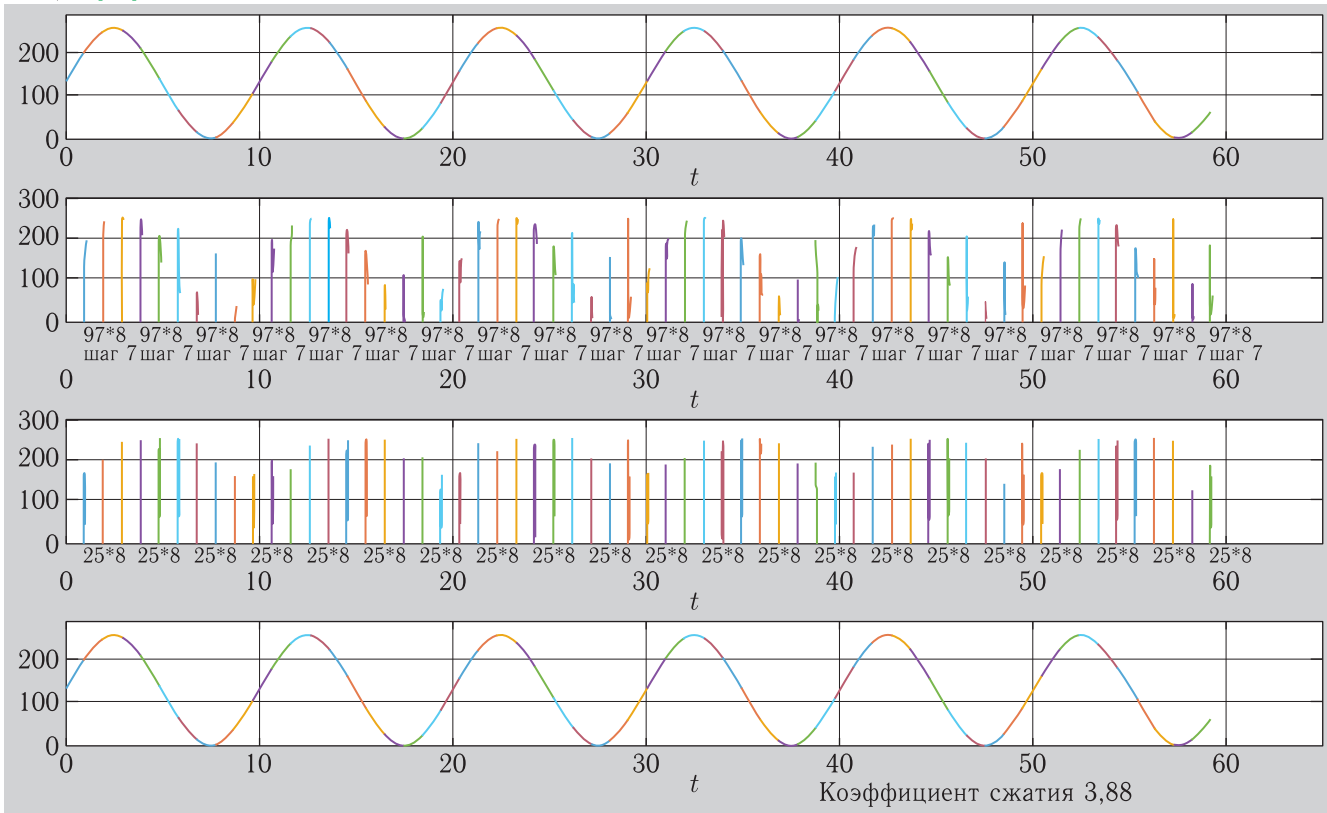


Рис. 5. Результаты моделирования

Алгоритм восстановления при приеме сжатого представления ТМП, иллюстрация которого приведена на рис. 7 (исходная шкала равна 16 разрядов, $n = 8$), заключается в следующем:

1. Первая операция восстановления данных ТМП связана с выделением графических фрагментов образов-остатков между соседними разрывами, обозначенными на рис. 7 в нижней части. В предлагаемом способе границы фрагментов ТМП, заключенных между разрывами, идентифицируют по максимальным значениям разности $\Delta b_i = b_{i+1} - b_i \rightarrow \max$.

2. Вторая операция преобразований, осуществляемых с целью получения исходного ТМП, основана на свойстве непрерывности контролируемых телеметрических процессов. Ее суть состоит в том, что заключенный между разрывами графический фрагмент представления ТМП образами-остатками

перемещают вверх или вниз, как это показано на рис. 7, для образования ТМП в виде непрерывной функции времени $x(t)$.

Правило перемещения переданных фрагментов ТМП вверх или вниз определяют на основе знака результата численного дифференцирования: если $(\Delta b_i / \Delta t)_{\text{к.пр.}} > 0$, то следующий графический фрагмент переданных значений, образованный результатами сравнения на основе модулей $m_i = \text{Ш}_{\text{Пн}_i}$, где $\text{Ш}_{\text{Пн}_i}$ — выбранные (заданные) пороговые уровни, необходимо переместить вверх, если же $(\Delta b_i / \Delta t)_{\text{к.пр.}} < 0$, то, наоборот, его перемещают вниз.

В результате описанной операции соединения графических фрагментов представления ТМП образами-остатками будут восстановлены (применительно к рассмотренному примеру) недостающие по отношению к исходному представлению 8 старших

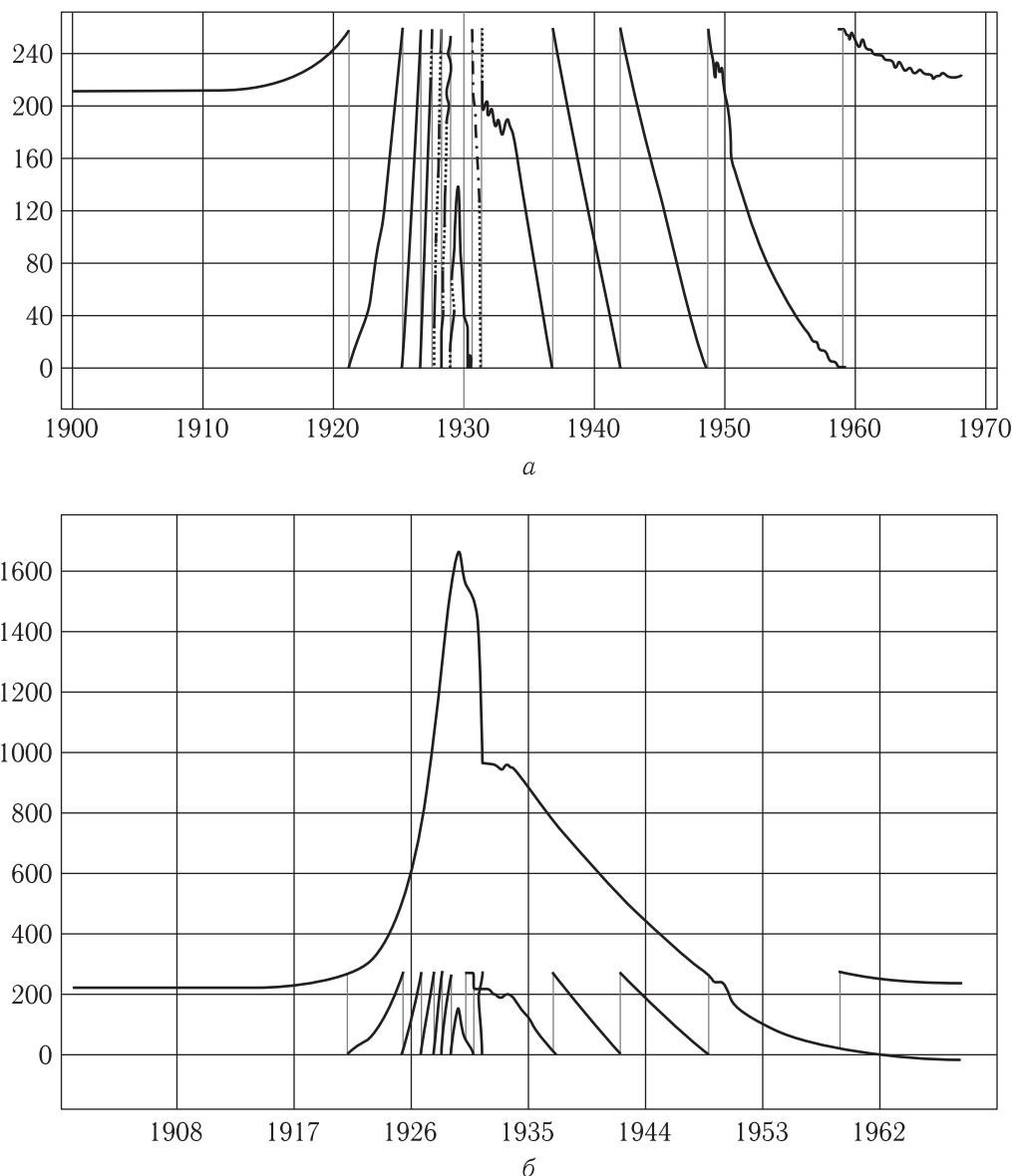


Рис. 6. Нетрадиционное представление результатов измерений образами-остатками. а) нетрадиционное представление ТМП 8-разрядными образами-остатками (фрагменты ТМП представлены в виде приращений относительно 2^n пороговых уровней с диапазоном 256 ед.); б) результат восстановления ТМП в традиционном виде

разрядов в каждом из переданных образов-остатков (рис. 6 и 7).

У рассмотренного алгоритма отсутствует недостаток в виде задержки поступающей информации, так как нет необходимости в накоплении данных для обработки. Однако возможность его применения тоже ограничена. Уменьшение избыточности на основе этого алгоритма может быть использовано в случае, если о контролируемом параметре заранее известно, что у него не может возникнуть скачков

между соседними измерениями больших, чем 2^n при шкале 2^{2n} . Кроме того, возникает вопрос, не освещенный в материалах патентов: откуда брать первое значение измерения в случае длительного обрыва линии связи между БРТС и Землей.

Заключение

Применять рассмотренные алгоритмы устранения избыточности следует с учетом требований

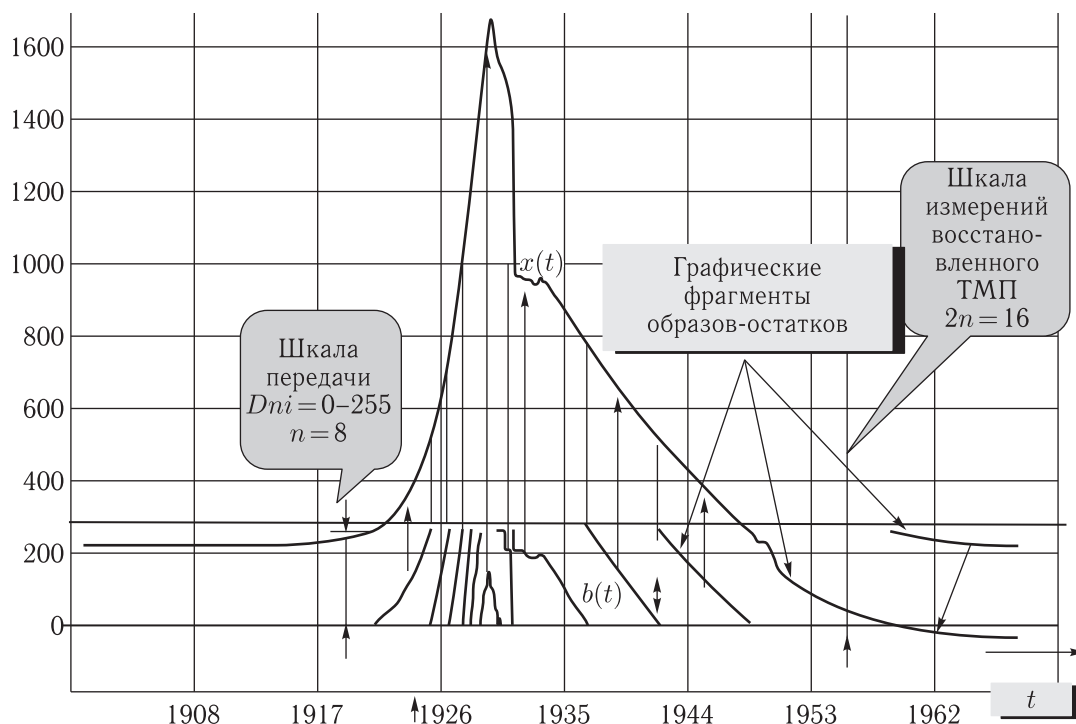


Рис. 7. Иллюстрация алгоритма восстановления исходного ТМП из фрагментов, представленных образами-остатками

технического задания на БРТС. Основные назначения БРТС — удаленное слежение за параметрами аппаратов и ракет с целью регистрации контролируемых параметров для последующего анализа нештатных ситуаций или обратная связь для системы удаленного управления. При управлении или возникновении аварийной ситуации недопустимо внесение лишних задержек в поступлении информации. При нештатных ситуациях возможны резкие скачки между соседними измерениями контролируемого параметра, которые могут быть восстановлены с ошибкой при использовании алгоритма на основе представления данных образами-остатками.

Список литературы

1. Орешко В.В. Алгоритм формирования адаптивной структуры данных в информационных пакетах для бортовых радиотелеметрических систем. Сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». (2–4 июня 2015 г.). М.: АО «РКС», 2015. 584 с.
2. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика. В 2-х тт. Т. 1. М: МО РФ, 2003. 284 с.
3. Кукушкин С.С., Кузнецов В.И. Патент 2 571 584.
4. Кукушкин С.С., Шемигон Н.Н., Аношкин А.В. Патент 2 434 302.