

Принцип формирования показателя избыточности информационного потока от аналоговых датчиков медленно меняющихся параметров и алгоритм его реализации

В. В. Орешко, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. А. Благодырев, *к. т. н., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье обоснована и поставлена задача разработки алгоритмов обработки информации в бортовых радиотелеметрических системах (БРТС), которые будут определять:

- наличие избыточности информации от датчиков и ее снижение;
- перераспределение пакетов информации от датчиков в транспортных кадрах БРТС при наличии аварийной ситуации.

На основе предложенного ранее адаптивного разностного алгоритма (АРА) [1, 2], который позволяет устранить избыточность, возникающую вследствие некорректно выбранной шкалы измерений, разработан адаптивный разностный алгоритм с прореживанием (АРАСП), который дополнительно позволяет снизить избыточность, вызванную завышенной частотой опроса. Совокупный максимальный коэффициент снижения избыточности АРАСП формируется путем перемножения коэффициента сжатия АРА и максимального коэффициента прореживания.

АРАСП позволяет изменять количество измерений, передаваемых в пакете в зависимости от поведения контролируемого сигнала, и создает резерв информативности в транспортном кадре за счет малоинформативных датчиков. Сжатие данных происходит за счет передачи не самих измерений, а разности между соседними отсчетами. При этом в процессе работы алгоритма формируется признак Δ — наибольшее число бит, которое занимает разность между соседними измерениями в пределах одного пакета. Этот признак Δ — показатель избыточности информации для входов с менее динамичным сигналом.

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

Principle of Formation of a Redundancy Parameter of the Information Stream from Analogue Sensors of Slowly Changing Parameters and the Algorithm of its Implementation

V. V. Oreshko, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

V. A. Blagodyrev, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article justifies and sets the task to develop the algorithms of information processing in onboard radio telemetry systems (RTS), which will define:

- Presence of redundancy of information from the sensors and its reduction;
- Redistribution of information packets from the sensors in transfer frames of onboard RTS in case of emergency.

Based on the earlier offered adaptive difference algorithm (ADA) [1, 2], which allows one to eliminate redundancy appeared due to the incorrectly chosen measurement scale, an adaptive difference algorithm with decimation (ADAD) is developed. This algorithm makes it possible to reduce redundancy caused by the increased sampling frequency. A cumulative maximum factor of elimination of redundancy of ADAD is formed by multiplication of the factor of compression of the ADA and the maximum factor of decimation.

ADAD allows you to change the number of measurements transmitted in the package depending on the behavior of the monitored signal, and creates a reserve of information in the frame due to low-information sensors. Compression of the data occurs at the expense of transfer differences between measurements. Thus in the course of algorithm operation the sign Δ (the greatest number of bits which occupies a difference between adjacent measurements within one packet) is formed. The sign Δ is the redundancy indicator of the information stream in onboard RTS.

Keywords: onboard processing of measurement results, reduction of data redundancy, information packet, onboard radio telemetry system

Введение

Для любого типа систем с временным уплотнением и для телеметрических импульсно-кодированных (ИКМ) систем в частности, согласно их определению, требуется дискретизация исходного сигнала до его передачи. Принятая модель процесса дискретизации сводится к квантованию аналогового сигнала по длительности с равномерной частотой, определяемой длительностью, которую можно считать короткой по сравнению с частотой выборки амплитудно-модулированного сигнала.

Дискретизированная функция (дискретный исходный сигнал) фактически существует только в моменты времени, совпадающие с моментом квантования аналогового сигнала, и по этой причине не может быть идеально восстановлена линейной аппроксимацией выделенных точек. Если частота следования значений выборок достаточно высока по сравнению с динамикой параметра, то представляется возможным достаточно точно восстановить форму сигнала и сохранить при этом все его существенные характеристики.

Преимущество передачи сигнала, ограниченного по полосе, заключается также и в возможном использовании теоремы, известной как теорема о дискретном представлении, определяющей условия получения корректной частоты выборки выходных сигналов датчика. Она известна также как теорема Найквиста–Котельникова–теорема отсчетов.

Согласно этой теореме, сигналы с ограниченной шириной полосы пропускания (B) в случае их дискретизации через каждые t_s секунд можно корректно восстанавливать, используя следующее неравенство: $t_s \leq 1/(2B)$, где B представляет собой границу полосы пропускания сигнала [3].

Другими словами, если функция на интервале T не содержит частот выше $2W$ Гц, то она полностью определяется своими мгновенными значениями периода $1/(2W)$ с [4].

Избыточность количества отсчетов при передаче данных в телеметрии закладывается при назначении частоты опроса параметров с учетом априорных сведений о сигнале, предназначенном для передачи по линии связи.

Первоначально в качестве характеристики эффективности исследуемого алгоритма сжатия данных был выбран так называемый «коэффициент сжатия», вычисленный как отношение количества исходных отсчетов к количеству отсчетов на выходе устройства сжатия данных. Но довольно скоро выяснилось, что коэффициент сжатия данных зависит не только от эффективности алгоритма, но и от первоначально назначенной частоты опроса параметров, а также от формы сигнала на заданном промежутке времени. Иными словами, определенный указанным образом коэффициент сжатия не характеризует однозначно алгоритм сжатия данных и выбор эффективного алгоритма сжатия данных и классификацию алгоритмов сжатия по эффективности.

Еще одно условие исследования и сравнения алгоритмов сжатия данных — предположение априорной известности аналитического представления сигнала, подвергаемого процедуре сжатия, что при решении практических задач ракетной телеметрии не имеет места. Более того, на аварийных участках полета поведение телеметрических параметров не является стационарным, что ограничивает применение метода статистических испытаний для выбора эффективного алгоритма сжатия данных [4].

Частота опроса аналоговых датчиков медленно меняющихся параметров (ММП)

В [5] отмечается, что датчики двигательной установки опрашиваются обычно с частотой 50 Гц и 100 Гц, однако для того, чтобы получить информацию о поведении двигательной установки в аварийной ситуации, частота опроса соответствующих датчиков должна быть увеличена до 200–400 Гц.

С целью повышения частоты опроса некоторых датчиков можно использовать параллельное подключение одного датчикового выхода на несколько входов подсистемы сбора сообщений [6]. При этом может возникнуть неравномерность выборок измерений для датчика, так как цикл опроса локального коммутатора (ЛК) составляет 5 мс, а кадровый цикл — 10–20 мс. Это необходимо учитывать в алгоритме работы системы при наборе информации

в выходной кадр из буфера («зеркала») подсистемы сбора сообщений в соответствии с программой измерений.

Приведенные в [7] исследования показали, что частоту опроса в локальных коммутаторах аналоговых датчиков (ЛКА) можно увеличить в 2–4 раза путем подбора элементов в буферном каскаде для уменьшения времени переходного процесса коммутации каналов. Таким образом, возможно увеличение максимальной частоты опроса для аналоговых датчиков до 400 Гц или 800 Гц.

Однако при существующих способах размещения информации о состоянии датчиков в транспортных кадрах увеличение частоты опроса для большинства датчиков не имеет смысла, т.к. длительность кадрового цикла и так уже в 4 раза больше цикла опроса ЛКА. То есть совокупная информативность всех ЛК значительно выше, чем информативность радиоканала. В настоящее время для согласования информативности подсистемы сбора сообщений (ПСС), т.е. совокупности всех ЛК, и информативности радиоканала используется ограниченное количество программ опроса, которые определяют положение в кадре и частоту опроса (частоту повторения в кадре) каждого датчика. При этом в случае нештатного функционирования изделия может потребоваться большая частота опроса датчика, для которого в программе опроса заложена низкая частота, ведь все возможные ситуации предусмотреть невозможно. Таким образом, возникает задача разработки алгоритмов обработки информации в БРТС, которые будут определять:

- наличие избыточности информации от датчиков и ее снижение;
- перераспределение пакетов информации от датчиков в транспортных кадрах БРТС.

Принцип формирования показателя избыточности информационного потока в БРТС

Телеметрическая система собирает информацию от многих датчиков. Наибольшую часть информативности потока данных от БРТС на землю

занимают аналоговые датчики — от 53% до 84% [1]. Коммутатор аналоговых датчиков обычно имеет 1 аналого-цифровой преобразователь (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 заложеной программой опроса формирует из них выходной кадр БРТС. При таком способе формирования данных по некоторым каналам будет присутствовать избыточность 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.

В [1, 2] для снижения избыточности информации от аналоговых датчиков предлагается использовать адаптивный разностный алгоритм (АРА). Это накопительный алгоритм с пакетной передачей данных. При передаче используется пакет фиксированного размера. Сжатие данных происходит за счет передачи не самих измерений, а разности между соседними отсчетами. При этом в процессе работы алгоритма формируется признак Δ — наибольшее число бит, которое занимает разность между соседними измерениями в пределах одного пакета.

Этот признак Δ является показателем избыточности информации для входов с менее динамичным сигналом. За счет этого можно применять выборочное прореживание информации для входов с меньшей динамичностью сигнала датчика и использовать освободившуюся информативность для передачи информации от датчиков с большей динамичностью сигнала. При этом произойдет увеличение максимального коэффициента сжатия, пропорциональное коэффициенту прореживания.

Адаптивный разностный алгоритм с прореживанием

Как видно из [1], АРА устраняет избыточность при опросе датчика на одной частоте с коэффициентом сжатия не больше 4. Алгоритм прореживания устраняет избыточность с коэффициентом,

равным отношению максимальной и минимальной частот опроса. Объединение этих алгоритмов даст еще больший коэффициент снижения избыточности. Рассмотрим работу адаптивного разностного алгоритма с прореживанием (АРАСП).

Пусть частота опроса датчиков всегда равна 200 Гц, при этом минимальная частота выдачи информации от датчиков при прореживании равна 12,5 Гц, то есть можно принять коэффициент прореживания равным 16. Размер информационной части пакета равен 16 байтам, разрядность АЦП — 8. Результаты работы АРАСП выглядят, как представлено в табл. 1. Полный цикл АРАСП в данном случае занимает 19 шагов.

Первые 7 шагов соответствуют полному циклу алгоритма АРА, коэффициент Δ вычисляется по отношению к двум соседним измерениям одного параметра, проводимым с частотой 200 Гц. Сначала накапливаются 16 измерений, проверяется условие $\Delta_{\max n} < 7$ бит. Если условие не выполняется, то в пакет параметра помещается 16 измерений без сжатия. Если условие выполняется, то накопление измерений продолжается.

После накопления 18 измерений на втором шаге сначала проверяется условие $\Delta_{\max n} < 7$ бит. При невыполнении условия выдается пакет, сформированный на первом шаге, и осуществляется возврат алгоритма к первому шагу. Если условие выполняется, то проверяется уточняющее условие $\Delta_{\max n} = 6$ бит. Если оно выполняется, то выдается пакет с 18 измерениями параметра, упакованными в 16 байт. Если уточняющее условие не выполняется ($\Delta_{\max n} < 6$ бит), то продолжается накопление измерений и осуществляется переход на третий шаг алгоритма.

После накопления 21 измерения на третьем шаге сначала проверяется условие перехода со второго шага: $\Delta_{\max n} < 6$ бит. При невыполнении условия выдается пакет, сформированный на втором шаге, и алгоритм возвращается к первому шагу. Если условие выполняется, то проверяется уточняющее условие $\Delta_{\max n} = 5$ бит. Если оно выполняется, то выдается пакет с 21 измерением параметра, упакованными в 16 байт. Если уточняющее условие не выполняется ($\Delta_{\max n} < 5$ бит), то продолжается накопление измерений и осуществляется переход на четвертый шаг алгоритма.

После накопления 25 измерений на четвертом шаге сначала проверяется условие перехода с третьего шага: $\Delta_{\max n} < 5$ бит. При невыполнении условия выдается пакет, сформированный на третьем шаге, и алгоритм возвращается к первому шагу. Если условие выполняется, то проверяется уточняющее условие $\Delta_{\max n} = 4$ бит. Если оно выполняется, то выдается пакет с 25 измерениями параметра, упакованными в 16 байт. Если уточняющее условие не выполняется ($\Delta_{\max n} < 4$ бит), то продолжается накопление измерений и осуществляется переход на пятый шаг алгоритма.

После накопления 31 измерения на пятом шаге сначала проверяется условие перехода с четвертого шага: $\Delta_{\max n} < 4$ бит. При невыполнении условия выдается пакет, сформированный на четвертом шаге, и алгоритм возвращается к первому шагу. Если условие выполняется, то проверяется уточняющее условие $\Delta_{\max n} = 3$ бита. Если оно выполняется, то выдается пакет с 31 измерением параметра, упакованными в 16 байт. Если уточняющее условие не выполняется ($\Delta_{\max n} < 3$ бит), то продолжается накопление измерений и осуществляется переход на шестой шаг алгоритма.

После накопления 41 измерения на шестом шаге проверяется условие перехода с пятого шага: $\Delta_{\max n} < 3$ бит. При невыполнении условия выдается пакет, сформированный на пятом шаге, и алгоритм возвращается к первому шагу. Если условие выполняется, то проверяется уточняющее условие $\Delta_{\max n} = 2$ бита. Если оно выполняется, то выдается пакет с 41 измерением параметра, упакованными в 16 байт. Если уточняющее условие не выполняется ($\Delta_{\max n} = 1$ бита), то продолжается накопление измерений и происходит переход на седьмой шаг алгоритма.

Обобщая действия для всех шагов АРА, кроме первого и последнего: на каждом шаге после накопления соответствующего количества измерений сначала проверяется условие перехода с предыдущего шага, $\Delta_{\max n} < Y - (n - 1)$, где Y — разрядность АЦП, n — номер шага. При невыполнении условия выдается пакет, сформированный на предыдущем шаге и алгоритм возвращается к первому шагу. При выполнении условия проверяется уточняющее условие: $\Delta_{\max n} = Y - n$. Если уточняющее условие выполняется, то выдается пакет

Таблица 1. Пример алгоритма АРАСП

Частота опроса	№ сту- пени	№ шага (дей- ствия)	Действие для буфера, в котором накапливаются измерения	Анализ $\Delta_{\max n}$ — максимального количества бит, необходимого для отображения в двоичной форме разницы значений между измерениями
200 Гц	0	1	Накопление 16 измерений	$\Delta_{\max n} = 8$ или 7 бит, в пакете 16 измерений $\Delta_{\max n} < 7$ бит, переход к действию 2
		2	Накопление 18 измерений (+2 изм.)	$\Delta_{\max n} = 8$ или 7 бит, выдача 1 пакета с 16 измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 6$ бит, выдача 1 пакета с 18 измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 6$ бит, переход к действию 3
		3	Накопление 21 измерений (+3 изм.)	$\Delta_{\max n} = 8, 7$ или 6 бит, выдача 1 пакета с 18 измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 5$ бит, выдача 1 пакета с 21 измерением, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 5$ бит, переход к действию 4
		4	Накопление 25 измерений (+4 изм.)	$\Delta_{\max n} = 8, \dots, 5$ бит, выдача 1 пакета с 21 измерением, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 4$ бит, выдача 1 пакета с 25 измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 4$ бит, переход к действию 5
		5	Накопление 31 измерения (+6 изм.)	$\Delta_{\max n} = 8, \dots, 4$ бита, выдача 1 пакета с 25 измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 3$ бита, выдача 1 пакета с 31 измерением, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 3$ бит, переход к действию 6
		6	Накопление 41 измерения (+10 изм.)	$\Delta_{\max n} = 8, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с 31 измерением, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 2$ бит, переход к действию 7
		7	Накопление 61 измерения (+20 изм.)	$\Delta_{\max n} = 8, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 1$ бит, переход к действию 8
100 Гц	1	8	Накопление 62 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 2 раза (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 31 измерения с частотой 100 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 5 шагу для 31 прореженного измерения $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с 61 измерением с частотой 200 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 3$ бит, переход к действию 9
		9	Накопление 82 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 2 раза (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 41 измерения с частотой 100 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 6 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с 61 измерением с частотой 200 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением с частотой 100 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 2$ бит, переход к действию 10
		10	Накопление 122 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 2 раза (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 61 измерения с частотой 100 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 7 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением с частотой 100 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 1$ бит, переход к действию 11

Таблица 1. Продолжение

Частота опроса	№ сту- пени	№ шага (дей- ствия)	Действие для буфера, в котором накапливаются измерения	Анализ $\Delta_{\max n}$ — максимального количества бит, необходимого для отображения в двоичной форме разницы значений между измерениями
50 Гц	2	11	Накопление 124 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 4 раза (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 31 измерения с частотой 50 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 8 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с 61 измерением с частотой 100 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 3$ бит, переход к действию 12
		12	Накопление 164 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 4 раза (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 41 измерения с частотой 50 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 9 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с 61 измерением с частотой 100 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением с частотой 50 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 2$ бит, переход к действию 13
		13	Накопление 244 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 4 раза (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 61 измерения с частотой 50 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 10 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением с частотой 50 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 1$ бит, переход к действию 14
25 Гц	3	14	Накопление 248 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 8 раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 31 измерения с частотой 25 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 11 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с 61 измерением с частотой 50 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 3$ бит, переход к действию 15
		15	Накопление 328 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 8 раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 41 измерения с частотой 25 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 12 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с 61 измерением с частотой 50 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением с частотой 25 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 2$ бит, переход к действию 10
		16	Накопление 488 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 8 раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 61 измерения с частотой 25 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 13 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением с частотой 25 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 1$ бит, переход к действию 17

Таблица 1. Окончание

Частота опроса	№ сту- пени	№ шага (дей- ствия)	Действие для буфера, в котором накапливаются измерения	Анализ $\Delta_{\max n}$ — максимального количества бит, необходимого для отображения в двоичной форме разницы значений измерений
12,5 Гц	4	17	Накопление 496 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 16 раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 31 измерения с частотой 12,5 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 14 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с 61 измерением с частотой 25 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 3$ бит, переход к действию 18
		18	Накопление 656 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 16 раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 41 измерения с частотой 12,5 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 15 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с 61 измерением с частотой 25 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением с частотой 12,5 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 2$ бит, переход к действию 19
		19	Накопление 976 измерений с частотой 200 Гц, прореживание в 16 раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение 61 измерения с частотой 12,5 Гц	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный 16 шагу $\Delta_{\max n} = 8, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с 41 измерением с частотой 12,5 Гц, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 1$ бит, выдача 1 пакета с 61 измерением с частотой 12,5 Гц, переход к действию 1

сформированный на текущем шаге. Если уточняющее условие ($\Delta_{\max n} = Y - n$) не выполняется, то выполняется условие перехода на следующий шаг ($\Delta_{\max n} < Y - n$), продолжается накопление измерений и осуществляется переход на следующий шаг алгоритма.

После накопления 61 измерения на седьмом шаге (что соответствует последнему шагу АРА) сначала проверяется условие перехода с шестого шага ($\Delta_{\max n} < 2$ бит), при его невыполнении выдается пакет, сформированный на шестом шаге, и алгоритм возвращается к первому шагу. Если условие выполняется, то, значит, $\Delta_{\max n} = 1$ бит. Для АРА на этом шаге выдается пакет с 61 измерениями, упакованными в 16 байт, и алгоритм возвращается к первому шагу, цикл начинается заново. Для алгоритма АРАСП происходит переход в цикл прореживания информации, то есть на восьмой шаг.

На восьмом шаге производится накопление 62 измерений с частотой 200 Гц. Коэффициент Δ вычисляется по отношению к двум соседним измерениям выборки, произведенной с частотой 100 Гц. Таким образом, берется каждое второе измерение от исходного, получается 31 измерение с частотой 100 Гц, что соответствует пятому шагу алгоритма АРА. Далее обработка осуществляется аналогично пятому шагу, только обрабатываются двукратно прореженные измерения.

После накопления 31 измерения с частотой 100 Гц на восьмом шаге сначала проверяется условие, аналогичное для перехода с пятого шага на шестой: $\Delta_{\max n} < 3$ бит. При невыполнении этого условия выдается пакет, сформированный на седьмом шаге, т.е. 61 измерение, проведенное с частотой 200 Гц и упакованное в 16 байт. Если условие выполняется, то продолжается накопление измерений и выполняется переход на девятый шаг АРАСП.

На девятом шаге накапливаются 82 измерения с частотой 200 Гц и осуществляется прореживание в два раза. Полученное 41 измерение обрабатывается аналогично шестому шагу. Сначала проверяется условие перехода с предыдущего шага: $\Delta_{\max n} < 3$ бит. При невыполнении этого условия выдается пакет, сформированный на седьмом шаге, т.е. 61 измерение с частотой 200 Гц, упакованное

в 16 байт, и алгоритм возвращается к первому шагу. При выполнении условия ($\Delta_{\max n} < 3$ бит) проверяется уточняющее условие $\Delta_{\max n} = 2$ бита. Если оно выполняется, то выдается пакет с 41 измерением, полученным с частотой 100 Гц, упакованным в 16 байт. Если уточняющее условие ($\Delta_{\max n} = 2$ бита) не выполняется, то $\Delta_{\max n} = 1$ бит и продолжается накопление измерений, после чего осуществляется переход на десятый шаг алгоритма АРАСП.

На десятом шаге накапливаются 122 измерения с частотой 200 Гц и осуществляется двукратное прореживание. Полученное 61 измерение с частотой 100 Гц обрабатывается аналогично седьмому шагу. Сначала проверяется условие перехода с предыдущего шага: $\Delta_{\max n} < 2$ бит. При невыполнении этого условия выдается пакет, сформированный на девятом шаге, т.е. 41 измерение с частотой 100 Гц, упакованное в 16 байт, и алгоритм возвращается к первому шагу. При выполнении условия продолжается накопление измерений и происходит переход на одиннадцатый шаг АРАСП.

Результат работы алгоритма АРАСП приведен в табл. 1. Из табл. 1 видно, что все дальнейшие шаги подразделяются на повторяющиеся группы по три шага, отличающиеся между собой только частотой измерений, из которых формируется выходной пакет информации. На одиннадцатом, двенадцатом и тринадцатом шагах происходят действия, аналогичные восьмому, девятому и десятому шагам, с той разницей, что эквивалентная частота опроса упаковываемых в пакет измерений понижается еще в два раза. Эти повторяющиеся группы условно можно назвать шагами адаптивного алгоритма прореживания (ААП), действующего совместно с АРА, или ступенями прореживания. Число этих групп определяется заданным коэффициентом прореживания. На последнем шаге АРАСП вместо перехода на следующую ступень прореживания выдается пакет, сформированный из 61 измерения (с частотой 12,5 Гц), упакованного в 16 байт информационной части пакета. После чего цикл АРАСП начинается заново.

В обобщенном виде алгоритм АРАСП представлен в табл. 2.

Блок-схема обобщенного АРАСП показана на рисунке.

Таблица 2. Обобщенный алгоритм АРАСП

Частота опроса, Гц	Сгруппированные частоты	№ шага (действия)	Действие для буфера, в котором накапливаются измерения	Анализ $\Delta_{\max n}$ — максимального количества бит, необходимого для отображения в двоичной форме разницы значений между измерениями
$f_{\max}$	0	1	Накопление X/Y измерений	$\Delta_{\max n} = Y$ или $(Y - 1)$ бит, в пакете X/Y измерения $\Delta_{\max n} < (Y - 1)$ бит, переход к действию 2
		2	Накопление $((X - Y)/(Y - 2) + 1)$ измерений	$\Delta_{\max n} = Y$ или $(Y - 1)$ бит, в пакете X/Y измерения, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = (Y - 2)$ бит, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - 2)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < (X - Y)/(Y - 2)$ бит, переход к действию 3
		3	Накопление $((X - Y)/(Y - 3) + 1)$ измерений	$\Delta_{\max n} = Y, \dots, (Y - 2)$ бит, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - 2)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = (Y - 3)$, выдача 1 пакета с $(X - Y)/(Y - 3)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < (Y - 3)$ бит, переход к действию 4
				...
		n	Накопление $((X - Y)/(Y - n + 1) + 1)$ измерений	$\Delta_{\max n} = Y, \dots, (Y - (n - 1))$ бит, выдача 1 пакета с $((X - Y)/(Y - (n - 1)) + 1)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = (Y - n)$ бит, выдача 1 пакета с $((X - Y)/(Y - n) + 1)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < (Y - n)$ бит, переход к действию $(n + 1)$
$f_{\max}/2$	1			...
		$Y - 1$	Накопление $((X - Y)/2 + 1)$ измерений	$\Delta_{\max n} = Y, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/3 + 1)$ измерениями, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 1$ бит, выдача 1 пакета с $((X - Y)/2 + 1)$ измерениями, переход к действию Y
		Y	Накопление $((X - Y)/4 + 1) \times 2$ измерений с частотой $f_{\max n}$, прохождение в 2 раза (эквивалент уменьшения частоты опроса), накопление $((X - Y)/4 + 1)$ измерений с частотой $f_{\max n}/2$	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный $Y - 3$ шагу для $((X - Y)/4 + 1)$ прореженного измерения $\Delta_{\max n} = Y, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/2 + 1)$ измерениями с частотой $f_{\max n}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 3$ бит, переход к действию $Y + 1$
		$Y + 1$	Накопление $((X - Y)/3 + 1) \times 2$ измерений с частотой $f_{\max n}$, прохождение в 2 раза (эквивалент уменьшения частоты опроса), накопление $((X - Y)/3 + 1)$ измерений с частотой $f_{\max n}/2$	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный $Y - 2$ шагу $\Delta_{\max n} = Y, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/2 + 1)$ измерениями с частотой $f_{\max n}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 2$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/3 + 1)$ измерениями с частотой $f_{\max n}/2$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 2$ бит, переход к действию $Y + 2$

Таблица 2. Продолжение

Частота опроса, Гц	Степень прореживания частоты	№ шага (дей- ствия)	Действие для буфера, в котором накапливаются измерения	Анализ $\Delta_{\max n}$ — максимального количества бит, необходимого для отображения в двоичной форме разницы значений между измерениями
$f_{\max}/2$	1	$Y + 2$	Накопление $((X - Y)/2 + 1) \times 2$ измерений с частотой $f_{\max n}$, про- реживание в 2 раза (эквивалент уменьшения частоты опроса), по- лучение $((X - Y)/2 + 1)$ измере- ний с частотой $f_{\max n}/2$	Анализ $\Delta_{\max n}$, аналогичный $Y - 1$ шагу $\Delta_{\max n} = Y, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/3 + 1)$ измерением с частотой $f_{\max n}/2$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 1$ бит, переход к действию $Y + 3$
...				
$f_{\max}/K_{\text{pr}}$	$m = \log_2 K_{\text{pr}}$	$Y + 3m - 3$	Накопление $((X - Y)/4 + 1) \times K_{\text{pr}}$ измерений с частотой $f_{\max n}$, про- реживание в K_{pr} раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), по- лучение $((X - Y)/4 + 1)$ измере- ний с частотой $f_{\max n}/K_{\text{pr}}$	$\Delta_{\max n} = Y, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/2 + 1)$ измерениями с частотой $2xf_{\max n}/K_{\text{pr}}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 3$ бит, переход к действию $(Y + 3m - 2)$
		$Y + 3m - 2$	Накопление $((X - Y)/3 + 1) \times K_{\text{pr}}$ измерений с частотой $f_{\max n}$, про- реживание в K_{pr} раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), по- лучение $((X - Y)/3 + 1)$ измере- ний с частотой $f_{\max n}/K_{\text{pr}}$	$\Delta_{\max n} = Y, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/2 + 1)$ измерениями с частотой $2xf_{\max n}/K_{\text{pr}}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 2$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/3 + 1)$ измерениями с частотой $f_{\max n}/K_{\text{pr}}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 2$ бит, переход к действию $(Y + 3m - 1)$
		$Y + 3m - 1$	Накопление $((X - Y)/2 + 1) \times K_{\text{pr}}$ измерений с частотой $f_{\max n}$, про- реживание в K_{pr} раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), по- лучение $((X - Y)/2 + 1)$ измере- ний с частотой $f_{\max n}/K_{\text{pr}}$	$\Delta_{\max n} = Y, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/3 + 1)$ измерениями с частотой $f_{\max n}/K_{\text{pr}}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 1$ бит, переход к действию $Y + 3m$
...				

Таблица 2. Окончание

Частота опроса, Гц	Степень прореживания частоты	№ шага (дей- ствия)	Действие для буфера, в котором накапливаются измерения	Анализ $\Delta_{\max n}$ — максимального количества бит, необходимого для отображения в двоичной форме разницы значений между измерениями
$f_{\max}/K_{\text{pr_max}}$	$m_{\max} = \log_2 K_{\text{pr_max}}$	$Y + 3m_{\max} - 3$	Накопление $((X - Y)/4 + 1) \times K_{\text{pr_max}}$ измерений с частотой $f_{\max}$, прореживание в $K_{\text{pr_max}}$ раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение $((X - Y)/4 + 1)$ измерений с частотой $f_{\max}/K_{\text{pr_max}}$	$\Delta_{\max n} = Y, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/2 + 1)$ измерениями с частотой $2xf_{\max}/K_{\text{pr_max}}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 3$ бит, переход к действию $(Y + 3m_{\max} - 2)$
		$Y + 3m_{\max} - 2$	Накопление $((X - Y)/3 + 1) \times K_{\text{pr_max}}$ измерений с частотой $f_{\max}$, прореживание в $K_{\text{pr_max}}$ раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение $((X - Y)/3 + 1)$ измерений с частотой $f_{\max}/K_{\text{pr_max}}$	$\Delta_{\max n} = Y, \dots, 3$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/2 + 1)$ измерениями с частотой $2xf_{\max}/K_{\text{pr_max}}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 2$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/3 + 1)$ измерением с частотой $f_{\max}/K_{\text{pr_max}}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} < 2$ бит, переход к действию $(Y + 3m_{\max} - 1)$
		$Y + 3m_{\max} - 1$	Накопление $((X - Y)/2 + 1) \times K_{\text{pr_max}}$ измерений с частотой $f_{\max}$, прореживание в $K_{\text{pr_max}}$ раз (эквивалент уменьшения частоты опроса), получение $((X - Y)/2 + 1)$ измерений с частотой $f_{\max}/K_{\text{pr_max}}$	$\Delta_{\max n} = Y, \dots, 2$ бита, выдача 1 пакета с $((X - Y)/2 + 1)$ измерением с частотой $f_{\max}/K_{\text{pr_max}}$, переход к действию 1 $\Delta_{\max n} = 1$ бит, переход к действию 1
N_0 — число измерений на входе; N — число измерений, выдаваемых в пакет; n — номер шага адаптивного разностного алгоритма с прореживанием, $1 \leq n \leq Y + 3m_{\max} - 1$; X — размер информационной части пакета, бит; Y — разрядность АЦП, размер несжатого измерения; $\Delta_{\max n}$ — число бит, необходимое для отображения разности соседних измерений на шаге n ; $f_{\max}$ — максимальная частота опроса, Гц; $f_{\min}$ — минимальная частота опроса, Гц; K_{pr} — коэффициент прореживания, кратный 2, $1 \leq K_{\text{pr}} \leq K_{\text{pr_max}}$; $K_{\text{pr_max}}$ — максимальный коэффициент прореживания ($f_{\min} = f_{\max}/K_{\text{pr_max}}$); m — степень прореживания частоты, $m = 0, 1, 2, \dots, m_{\max}$; $m_{\max}$ — последняя степень прореживания частоты, соответствует максимальному коэффициенту прореживания $K_{\text{pr_max}}$				

Заключение

Таким образом, разработанный алгоритм АРАСП не только позволяет уменьшать избыточность за счет снижения количества передаваемых разрядов, как это делает АРА, но и может компенсировать избыточно заложенную частоту опроса. Совокупный максимальный коэффициент снижения избыточности АРАСП формируется путем перемножения коэффициента сжатия АРА и максимального коэффициента прореживания. Коэффициент сжатия АРА зависит от размера информационной части пакета и разрядности аналого-цифрового преобразования. В приведенном примере коэффициент сжатия АРА равен 3,8125, а коэффициент прореживания равен 16. Если сигнал датчика изменяется слабо и таким образом, что обработка по АРАСП доходит до последнего шага, то вместо 976 накопленных измерений с частотой 200 Гц в пакет выдается 61 измерение с частотой 12,5 Гц. Так как размер информационной части пакета выбран под 16 измерений без сжатия, то коэффициент снижения избыточности при этом равен $976/16 = 3,8125 \times 16 = 61$.

Список литературы

1. Орешко В.В. Алгоритмы устранения избыточности информации, передаваемой от бортовых телеметрических систем на Землю // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 2. С. 75–84.
2. 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 «Российские космические системы», 2015. 584 с.
3. Хоран С. Введение в телеметрические системы с импульсно-кодовой модуляцией. Перевод Ю. И. Кондратьевой под редакцией С. С. Кукушкина и В. А. Благодырева, 1997 г.
4. Победоносцев В.А. Теоретические вопросы измерения количества информации непрерывных сигналов на конечных интервалах // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 2. С. 47–58.
5. Хромов О.Е., Благодырев В.А. Научно-методические основы системного подхода к построению информационно-измерительного комплекса // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 1. С. 68–77.
6. ИЮ0.071.076. Структура видеосигнала БИТС2-МА-9МКТМ. 1985г.
7. Орешко В.В., Куликов А.И., Романов П.Е. Влияние свойств кабельной сети и датчиков-преобразующей аппаратуры на точность измерения аналоговых медленно меняющихся параметров бортовыми радиотелеметрическими системами // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2016, т. 14, № 8.