

© Кукушкин С.С.  
Kukushkin S.

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА РАЗЛИЧНЫХ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОДХОДОВ К УСТРАНЕНИЮ ИЗБЫТОЧНОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ

### METHODS OF ANALYSIS AND SYNTHESIS OF VARIOUS PROBLEM-ORIENTED APPROACH TO ELIMINATE REDUNDANCY TRANSMITTED INFORMATION

**Аннотация.** В статье рассматривается задача синтеза кода, адаптированного для повышения помехоустойчивости передачи измерительной информации. Для решения данной задачи предлагается использовать такой мощный и хорошо разработанный аналитический аппарат, как теория конечных полей.

**Annotation.** Article is devoted working out of new methods and technologies of processing of the optical information received on the basis of video images at combined natural tests of several complicated technical systems. It is shown, that the best results can be reached at use of the adaptive procedure defining admissible degree of an aggravation of contours of images.

**Ключевые слова.** Помехоустойчивость, передача измерительной информации, теория конечных полей.

**Key words.** Noise-immunity, issue to measuring information, theory by final flap.

Гений есть терпение мысли, сосредоточенное в известном направлении.

И.Ньютон

#### 1. Актуальность решаемой задачи

Актуальность исследований имеет тенденцию к неуклонному повышению. Связано это с неудержимым ростом объемов передаваемой информации, ее интегрированием, направленным на возможность использования единого тракта передачи данных и уменьшения на этой основе количества радиоканалов. Новации в области теории передачи информации предполагают учет специфических ее особенностей, чего ранее никогда не делалось [1,2]. «За универсальность приходится расплачиваться потерей эффективности» – этот основной закон Природы о себе все более поминает в ходе современного научно-технического прогресса. Поэтому возможность достижения требуемых показателей универсальности и стандартизации связана только с переходом к адаптивным системам передачи данных. Но для этого необходимо множество различных методов. При этом чем их больше,

тем выше показатели адаптивности обучаемой сложной технической системы [1,2].

Также появляется острая потребность в поиске новых технических решений, которые позволили бы перейти к проблемно-ориентированным технологиям [1–6].

#### 2. Желательность систематической теории

Каждый раз, приступая к изучению какого-нибудь нового явления, мы вынуждены, как правило, начинать с «пустого места». Наши возможности при этом ограничивались использованием отдельных индивидуальных особенностей каждого из них. Получается, что стремимся к обобщению и к разработке теории, а получаем коллекцию разрозненных задач и подходов. Поэтому так важно учиться использовать сведения, полученные ранее на частных примерах, для упрощения исследований и прогнозирования развития новых технологий передачи информации.

Что касается информационно-измерительных

---

Кукушкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник 4 ЦНИИ Министерства обороны РФ, тел. (495)502-84-23.

Kukooschkin Sergej – Dr. Sci. Tech, the professor conducting the scientific employee, 4 CNII the Ministries of Defense, tel. (495)502-84-23.

комплексов и систем передачи данных, то начало желаемой систематической теории уже положено. Ее основу составляет конструктивная теория конечных полей (КТКП) и модернизированный морфологический анализ (ММА) [1]. КТКП среди существующих теорий в наибольшей степени ориентирована на цифровые технологии представления и передачи информации. ММА позволяет на основе известных аналогов генерировать расширенное множество идей, что необходимо для реализации предлагаемого проблемно-ориентированного подхода [1]. Анализ различных методов сжатия данных ТМИ также проводится с той целью, чтобы еще раз (уже на основе сравнений) показать те преимущества, которые появляются при нетрадиционном представлении данных образами-остатками [1,2].

### **3. Методы, модели и методики сжатия и помехоустойчивого кодирования данных ТМИ и их сравнительный анализ**

Сжатие целевой информации в бортовых и наземных высокопроизводительных командно-информационных системах при формировании и передаче интегрированных цифровых информационно-управляющих потоков имеет особую значимость для повышения эффективности автоматизированных систем информационно-телеметрического обеспечения (АСИТО) испытаний РКТ и штатной эксплуатации (ШЭ) КА. Сжатие данных уменьшает объем содержательной информации, предназначенной для передачи по каналам связи с ограниченной пропускной способностью. Это сокращение объема может быть использовано для достижения следующих целей:

- увеличения пропускной способности канала передачи;
- полезного использования освободившегося объема для реализации избыточного кодирования, что позволяет повысить помехоустойчивость переданных и восстановленных данных.

Методы экономного кодирования (сжатия) последовательной дискретной информации можно условно разделить на три группы: статистические методы; словарные методы и контекстные методы [3-5]. Методы первых двух групп базируются на статистических и словарных моделях, соответственно. Они достаточно многочисленны и составляют основу прикладной теории экономного кодирования дискретной информации. Методы третьей группы менее многочисленны, плохо поддаются классификации по типу информационной модели и поэтому в качестве кандидатов для практической реализации ранее

не рассматривались.

Статистические методы в большинстве своем являются адаптивными методами [3-5]. Вычисление вероятностных оценок осуществляется одним и тем же способом на этапах кодирования и декодирования, что позволяет не хранить описание информационной модели.

Статистические методы отличаются между собой только способом получения оценок условных вероятностей появления символов в различных контекстах. Можно выделить четыре основных способа получения таких оценок, которые легли в основу следующих статистических методов: метода PPM, метода DMC, метода CTW и метода, основанного на использовании нейронных сетей [3,4].

Для практической реализации процесса сжатия информации в модели обработки интегрированных цифровых информационно-управляющих потоков из набора перечисленных выше статистических методов был выбран метод PPM, представляющий собой проблемно-ориентированную модификацию метода PPM. Метод PPM является методом экономного кодирования, который широко используется на практике [3,4]. Он весьма эффективен и допускает возможность достаточно простой реализации. К недостаткам большинства вариаций метода PPM относятся: несовершенство способа оценки вероятностей и повышенную требовательность к ресурсам оперативной памяти, от объема которых во многом зависит производительность метода.

Наилучшие результаты PPM показывает применительно к текстовым данным отличный коэффициент сжатия при высокой скорости. Недостатки метода PPM заключаются в следующем: медленное декодирование (обычно на 5-10% медленнее кодирования), что связано с повышенными требованиями к ресурсам оперативной памяти; несовместимость программ в случае изменения алгоритма кодирования; чрезвычайно медленная обработка малоизбыточных данных (скорость сжатия может падать на порядок).

Кроме того, результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что различным файлам соответствует свой оптимальный максимальный порядок модели. Для файлов с ТМИ он меняется в пределах от 4 до 10, поэтому при выборе модели какого-то фиксированного порядка часть файлов будет сжиматься хуже, чем могла бы. Почти все практические словарные кодировщики принадлежат семейству алгоритмов, которые базируются на принципах сжатия Зива и Лемпела [3,4]. Основная их суть заключается в том, что фразы заменяются указателем, который определяет место их более раннего появления в тексте. Это семейство алгоритмов называется ме-

тодом Зива-Лемпела (Ziv-Lempel) и обозначается как LZ-сжатие [3,4]. При этом используются словарные модели, основу которых составляет информационная структура, именуемая словарем. Данный метод характеризуется повышенными свойствами адаптивности к структуре текста и может использоваться для кодирования коротких функциональных слов, если они часто в нем появляются. Новые слова и фразы могут также формироваться из частей слов, которые ранее уже встречались.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что при сжатии файлов с нестабильными контекстами классический алгоритм PPMD заметно уступает LZ-методам. При использовании сложных моделей высокого порядка появляются большие запросы к емкости памяти. Кроме того, наблюдались провалы в степени сжатия по сравнению с алгоритмами LZ при файлах, имеющих длинные повторы блоков символов.

Рассмотрим структурные модели представления информационных потоков для организации проблемно-ориентированного сжатия данных телеизмерений. При разработке модели сжатия телеизмерений и телекомандной информации была использована следующая структура информационных потоков (рис. 1).

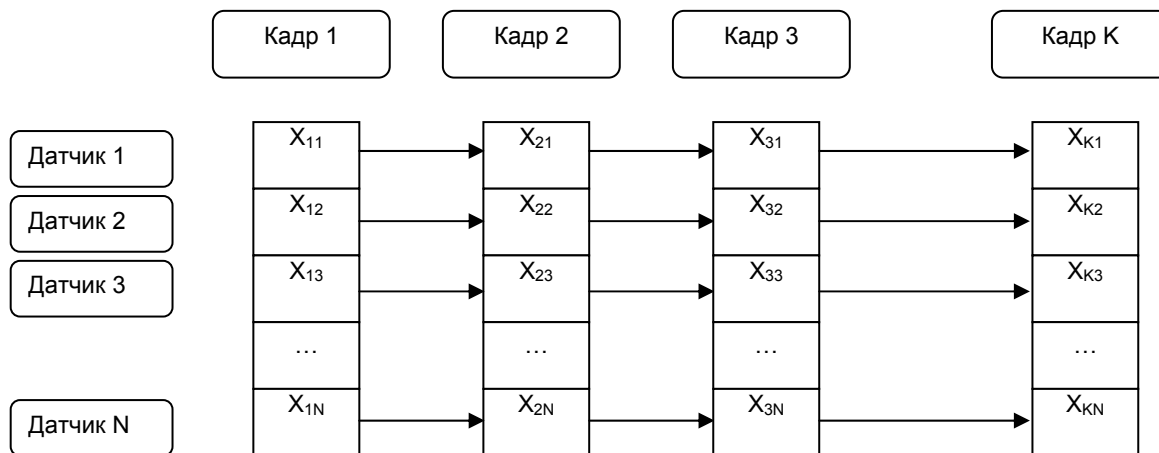


Рис. 1. Модель структуры информационного потока данных телеизмерений

Для реализации модели сжатия информационных потоков были предложены 3 базовых подхода: покadroвая обработка входного потока ТМИ, буферизация кадров и инкрементальное сжатие.

При покadroвой обработке входного потока сокращение избыточности ТМИ производится на основе построения упорядоченной матрицы телеизмерений, вид которой с использованием когнитивной (порождающей знание) графики представлен на рис. 2.

Каждая из строк упорядоченной матрицы представляет собой соответствующий телеметрический кадр (первая строка – первый кадр, вторая – второй и т.д.).

Из иллюстрации следует, что значительная часть данных телеизмерений остается неизменной от кадра к кадру, что проявляется в одном и том же «битовом орнаменте» столбцов матрицы. Следовательно, эффективным является их покadroвое сжатие, при котором передаются данные только первого столбца, а другие, повторяющиеся, исключаются из передачи. Эта идея, как показывают проведенные исследования, является плодотворной и составляет основу одного из предлагаемых методов сжатия данных ТМИ, базирующегося на использовании когнитивной графики [1,2]. Основным недостатком метода заключен в необходимости использования относительно больших объемов памяти на борту ракеты или КА. Однако этот недостаток не является таким значимым при организации сбора и переработки ТМИ, зарегистрированной при разнесенном приеме различными ИПами.

Сжатие, основанное на буферизации кадров, ориентировано на сокращение данных при ограничениях на используемую память и требуемое время, затрачиваемое на сжатие. Данный тип сжатия основан на принципе сокращения избыточности ТМИ без накопления кадров. Для этого необходимо реализовать режим быстрого сжатия значений ТМП в пределах одного кадра (рис. 3, 4).

К данному типу сжатия может быть отнесено и предлагаемое сокращение избыточности передаваемой ТМИ на основе нетрадиционного представления дан-

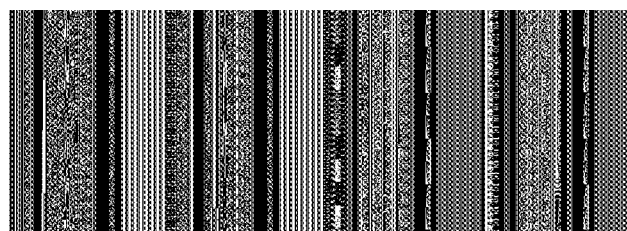


Рис. 2. Когнитивная графика ТМИ, представленная на уровне пикселей бит, отображающая упорядоченную структуру сформированных и передаваемых данных телеизмерений

ных образами-остатками [1,2]. Проведенные исследования показали, что алгоритмы сжатия данных на основе образов-остатков являются наилучшими (оптимальными) в рассматриваемом классе методов. Они требуют наименьшего времени на преобразования (вычисления) и позволяют мгновенно перейти от традиционного представления данных к их образам-остаткам путем, например, исключения из передачи старшего полуслова каждого телеизмерения. При этом обеспечивается коэффициент сжатия, равный 2 ( $K_{сж} = 2$ ). Проведенные экспериментальные сравнительные исследования показали, что для класса алгоритмов преобразования данных в реальном масштабе времени коэффициент сжатия, равный 2, является предельно достижимым. В этом заключена особая научная и практическая значимость полученных результатов.

Графическое представление данных на уровне бит, сокращенных на основе представления значений ТМП одним образом-остатком  $b_i$ , полученным на основе передачи только младших  $n$ -разрядных полуслов исходного  $2n$ -разрядного двоичного слова-измерения  $x_i$ ;  $x_i \equiv b_i \pmod{m_i}$ , представлен на рис. 3. Исходный вид несжатых данных ТМИ приведен на рис. 2.

На рис. 4 приведена структурная модель сжатия

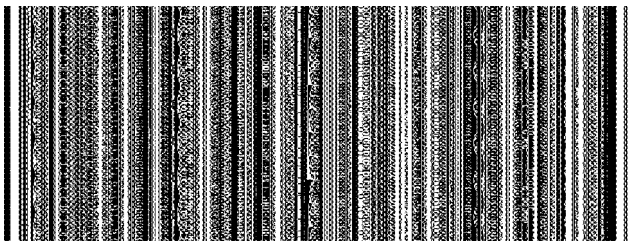


Рис. 3. Когнитивная графика ТМИ, представленная на уровне пикселей бит, отображающая упорядоченную структуру сформированных и передаваемых сжатых данных телеизмерений

данных ТМИ, основанная на принципе буферизации телеметрических кадров.

Из иллюстрации, приведенной на рис. 3, следует, что были объединены в единую модель принципы кадрового сжатия и сокращения избыточности, основанные на буферизации телеметрических кадров (рис. 4). Такое объединение позволило получить коэффициент сжатия, равный 12 ( $K_{сж} = 12$ ). При этом из представленного графического изображения и его сравнения с иллюстрацией, приведенной на рис. 2, следует, что устранена не вся избыточность ТМИ. Об этом свидетельствует иллюстрация кортежей бит, представленная на рис. 3. Еще один важный практический вывод заключен в том, что необходимо стремиться к одновременному использованию не одного, а нескольких алгоритмов сжатия. Этот факт является дополнительным подтверждением справедливости основополагающего принципа системного анализа – «за универсальность приходится расплачиваться потерей эффективности» [1,2]. Объединение различных алгоритмов, предлагаемое в работах [1,2], позволяет компенсировать недостатки различных методов проблемно-ориентированного преобразования ТМИ. К их числу относятся и рассматриваемые методы сжатия данных.

Следующий тип преобразований, осуществляемых с целью сокращения избыточности данных, представлен методами инкрементального сжатия. Они отличаются тем, что анализу на предмет сокращения избыточности подвергаются не непосредственные результаты телеизмерений, а разности между предшествующими и последующими значениями одного и того же телеметрического датчика:  $\Delta^1 x = |x_i - x_{i+1}|$  (рис. 5). При этом неизменяющиеся значения ТМП, строгим признаком которых являются нулевые значения первых разностей ( $\Delta^1 x = 0$ ),

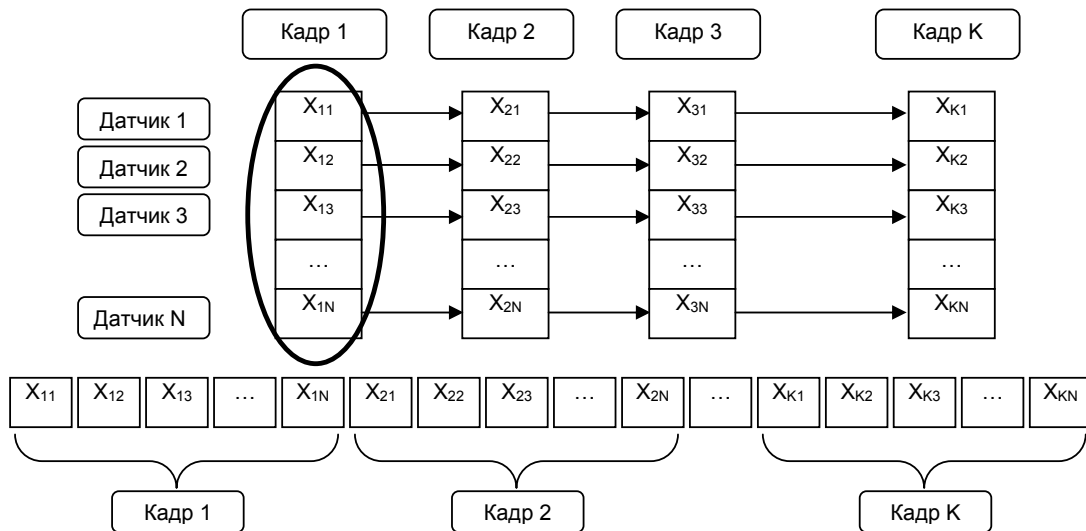


Рис. 4. Структурная модель сжатия данных ТМИ, основанная на принципе буферизации кадров

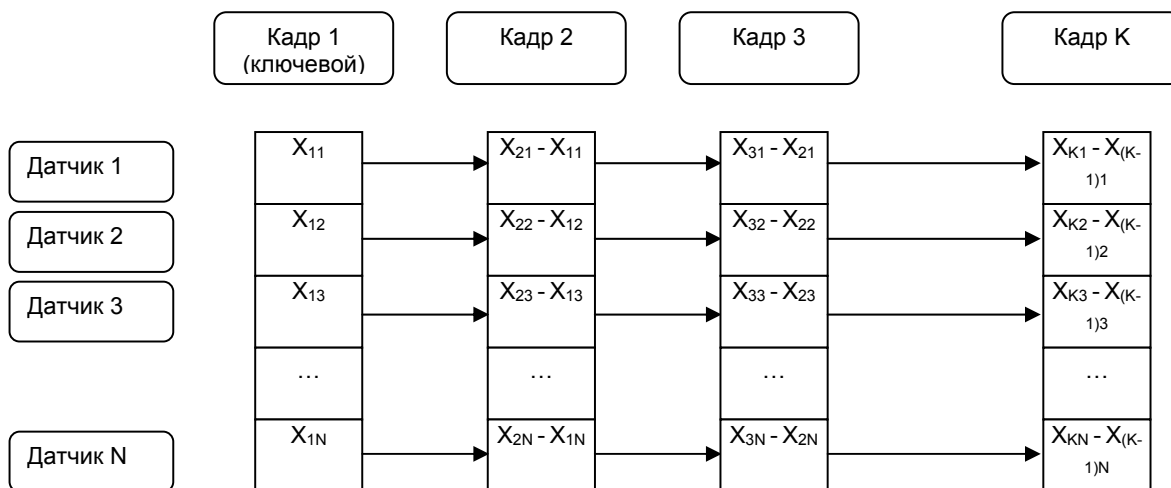


Рис. 5. Структурная модель инкрементального сжатия данных телеизмерений

исключаются из передачи. При моделировании метод инкрементального сжатия реализован с использованием префиксных кодов Хаффмана [2]. Общая архитектура построения моделирующей среды, предназначенной для проведения сравнительного анализа различных методов сжатия данных, приведена на рис. 6.

Разработанная моделирующая среда (МС) состоит из двух основных компонентов: управляющей программы и набора модулей обработки данных. Графически архитектуру можно представить в виде, представленном на рис. 6. Основным назначением управляющей программы (УП) является обеспечение цикла обработки данных и сбор статистики о времени, затраченном на обработку данных каждым из заданных пользователем модулей. Модули обработки данных реализованы в виде динамически подгружаемых библиотек.

Основной цикл работы УП выглядит следующим

образом:

- 1) загрузка файла конфигурации;
- 2) загрузка всех необходимых для решения задачи модулей и создание обработчиков;
- 3) инициализация всех созданных обработчиков;
- 4) цикл обработки данных со сбором статистики (в штатном режиме, выполняется до тех пор, пока модуль чтения не сообщит об отсутствии данных);
- 5) деинициализация обработчиков;
- 6) вывод информации о результатах моделирования;
- 7) освобождение ресурсов.

В ходе выполнения задачи управляющая программа взаимодействует с модулями через унифицированные интерфейсы, передавая данные между модулями по конвейеру. В случае возникновения ошибок при работе модулей цикл выполнения УП может быть завершён досрочно с выводом сообщения об ошибке на экран.



Рис. 6. Модель общая архитектура моделирующей среды (МС)

**4. Методика испытаний, позволяющая оценить производительность используемых методов компрессии и кодирования**

Целью проведенных испытаний является определение затрат вычислительных мощностей на компрессию и кодирование, а также уточнение минимально необходимого аппаратного обеспечения для конкретного метода компрессии. Для каждого метода компрессии (буферные варианты ZLIB и PPMD, ZLIB, PPMD, инкрементальное, инкрементальное с использованием ZLIB для опорных кадров) последовательно выполняется схема, аналогичная схеме из первой группы испытаний. Входной уровень ошибок был взят за 0,001, отношение шумовых и импульсных помех за 0,5. Схема выполняется циклически десять раз, средние значения полученных результатов делятся на количество обработанных кадров (чтобы отразить время на обработку одного кадра) и систематизируются в общей таблице.

Получены следующие результаты сравнительного анализа различных методов сжатия ТМИ. Структурная модель совмещения сжатия данных и их помехоустойчивого кодирования приведена на рис.7. Из нее следует, что для реализации традиционного подхода исходные данные ТМИ необходимо вначале сжать, а затем сжатые сообщения подвергнуть помехоустойчивому кодированию. Традиционный подход к помехоустойчивому кодированию передаваемой ТМИ ориентирован на коды Рида-Соломона [3,4]. На рис. 8 и 9 приведены структурные модели, основу которых составляют: буферное и покадровое сжатие данных, соответственно. При этом только покадровое сжатие может использоваться при приеме ТМИ существующими приемно-региструющими стан-

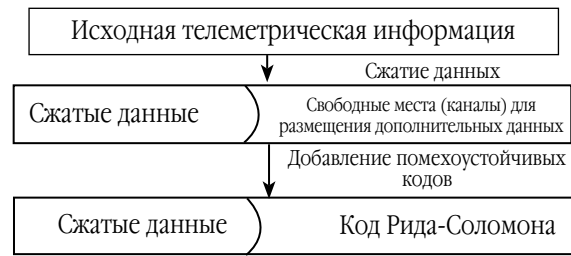


Рис. 7. Структурная модель совмещения сжатия данных и их помехоустойчивого кодирования ТМИ

циями, так как синхронизирующая информация передается в традиционном (несжатом) виде. В этом заключается основное условие приема и регистрации преобразованной содержательной части ТМИ.

Иллюстрации, приведенные на рис. 10, позволяют лучше представить основные противоречия, которые необходимо знать каждому разработчику современной телеметрической техники. Они, в частности, проявляются в том, что покадровое сжатие ТМИ, наиболее подходящее для использования в составе существующих телеметрических комплексов (ТК) и основанное на традиционных методах, требует самых больших вычислительных ресурсов и, как следствие этого, временных затрат. Из-за этого противоречия покадровое сжатие ТМИ на основе известных методов не годится для практического использования. Для покадрового сжатия ТМИ требуется применение нетрадиционных методов представления данных образам-остатками [2]. Другие же известные методы, базирующиеся на буферной и инкрементальной моделях сжатия данных, по сравнению с покадровым сжатием ТМИ характеризуются существенно меньшими вычислительными и временными затратами на реализацию. Однако они также не могут быть использованы

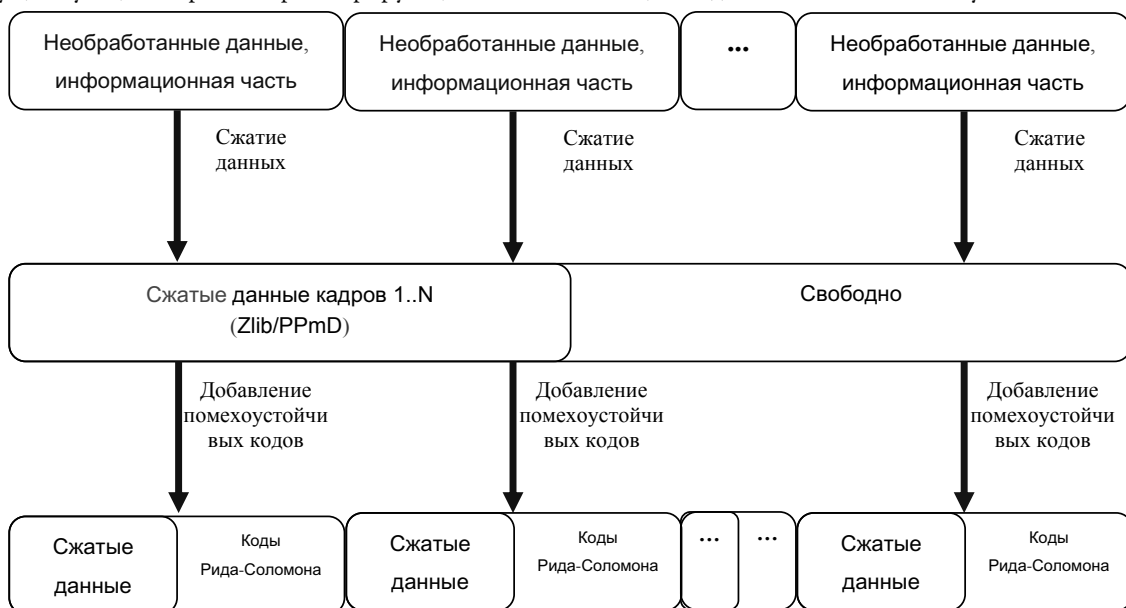


Рис. 8. Структурная модель буферного сжатия данных и помехоустойчивого кодирования ТМИ

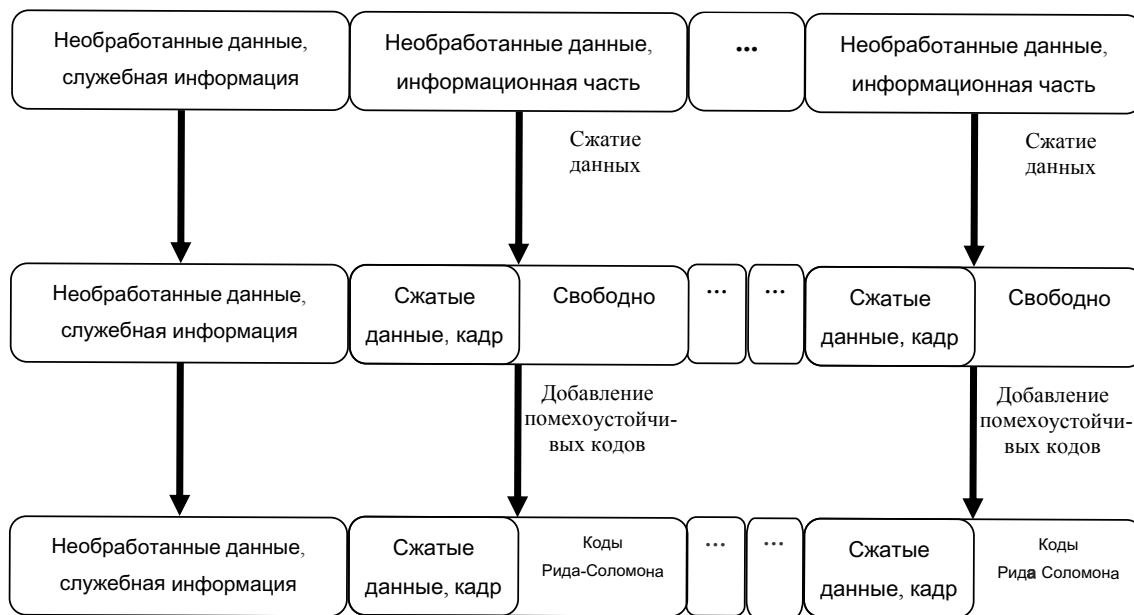


Рис. 9. Структурная модель покадрового сжатия данных и помехоустойчивого кодирования ТМИ

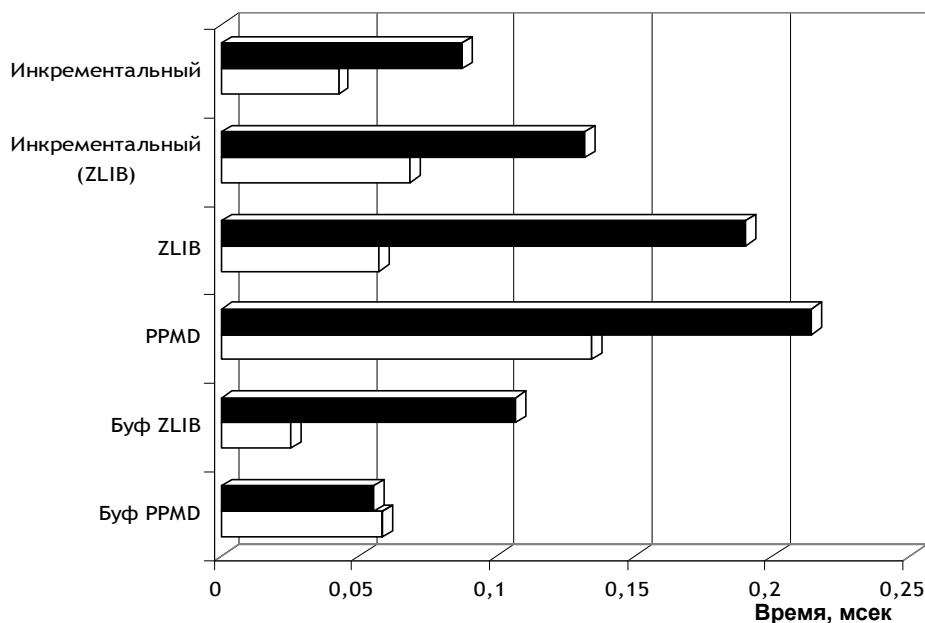


Рис. 10. Временные затраты на проведение сжатия и помехоустойчивого кодирования ТМИ:  
 ■ – кодирование; □ – сжатие

в существующем ТК, поскольку для приема ТМИ необходимы сигналы синхронизации в их исходном (не сжатом) виде. А при буферных и инкрементальных моделях сокращения избыточности телеизмерений сжатию также подвергаются и служебные слова, а их присутствие в традиционном несжатом виде представляет собой основное условие приема ТМИ существующими НПРС.

Таким образом, в рамках традиционного подхода к сокращению избыточности данных невозможно выбрать те методы, которые можно было бы использовать для сжатия ТМИ при испытаниях РКТ и штатной эксплуатации (ШЭ) КА. Особую значимость эта проблема приобретает при испытаниях перспективных баллистических ракет,

поскольку требования, предъявляемые к объемам и качеству получаемой ТМИ, самые высокие, а временные возможности для ее преобразования на борту – минимальные. Поэтому в настоящее время нет альтернатив применению нетрадиционных методов сжатия на основе представления данных телеизмерений образами-остатками [1,2].

К такому же выводу можно прийти и на основе анализа достижимого коэффициента сжатия. Проведенные испытания модифицированных традиционных методов сокращения избыточности реальной ТМИ (PPMD и ZLIB) показали, что при кадровом сжатии коэффициент сжатия не превышает 2 ( $K_{сж} \leq 2$ ). В случае нетрадиционного представления данных образами-остатками, полу-

ченными исключением из передачи старших полуслов результатов телеизмерений  $K_{сж} = 2$ . Кроме того, при этом сжатие становится не пок кадровым, а пословным, благодаря чему обеспечивается более высокий уровень приспособления (адаптивности) новых методов к специфическим особенностям ТМИ.

Также при этом наиболее просто решается вопрос об эталонных выборках, представляющих собой выборки первичного сигнала, не подлежащих сжатию и используемых для определения моментов начала отсчета при определении разностей значений выборок. Эти эталонные сигналы должны включаться достаточно часто, чтобы исключить накопление ошибок при восстановлении сжатых сообщений. Эталонные сигналы представляются в прежнем объеме путем передачи двух полуслов-остатков, полученных на основе различных модулей сравнения.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что традиционные алгоритмы помехоустойчивого кодирования Рида-Соломона, рекомендованные международными телеметрическими стандартами IRIG и CCSDS при их реализации также требуют значительных вычислительных и временных затрат (рис. 10). При этом затраты оказываются тем выше, чем меньше объем сжимаемых данных. Если бы можно было бы при традиционном подходе предположить режим пословного сжатия данных телеизмерений, то затраты на его реализацию должны были быть чрезмерно большими. Получается, что сама Природа в виде физических законов и закономерностей демонстрирует, что в рамках традиционного подхода сжатие реальных данных телеизмерений практически либо невозможно, либо же характеризуется крайне низкими показателями эффективности. Кроме того, заранее не представляется возможным выбрать наиболее подходящую длину кодоблоков, обеспечивающую

наилучшее сжатие в рамках традиционного подхода. В результате этого одни данные ТМИ могут сжиматься «хорошо», а другие «плохо».

Для разрешения этого противоречия в работах [3–5] предлагается использовать адаптивные алгоритмы сжатия, при которых анализируются передаваемые данные ТМИ и принимается решение об его изменении. Но поскольку принятие решения об изменении длины кодоблоков необходимо будет принимать в ходе летного испытания на борту ракеты, появляется другая не менее сложная проблема, как эту информацию вовремя довести до приемной стороны. Проблема сжатия телеизмерений до настоящего времени не нашла приемлемого решения и в США, о чем свидетельствуют результаты обмена ТМИ в соответствии с Договором о СНВ-1. Но потребность в них при испытаниях МБР и БРПЛ США еще больше, поскольку существующие противоречия при телеизмерениях еще более жесткие. Это связано с тем, что объемы передаваемых телеизмерений у них на порядок выше по сравнению с аналогичной отечественной практикой. Пример США показывает, что должно нас ожидать в будущем при условии, что дальнейшего развала телеметрической науки и техники не будет.

Такова объективная реальность, относящаяся к проблеме сжатия данных телеизмерений. Но и без сжатия не представляется возможным значительно повысить эффективности ИТО испытаний РКТ и ШЭ КА. Поэтому нет другого более простого варианта модернизации телеметрических комплексов, кроме перехода к нетрадиционному представлению данных образами-остатками. Пока это не будет осознано, проблемы телеизмерений при испытаниях перспективных изделий РКТ будут нарастать как снежный ком, движущийся по направлению к пропасти.

#### Литература

1. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика: том.1 Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках - М: МО РФ, 2003. – 281 с.
2. Кукушкин С.С. Синтаксическое сжатие передаваемых данных //Двойные технологии №1, 2005. – с.34 – 38.
3. Lossless Data Compression. Draft Recommendation for Space Data System Standart, CCSDS 121.0-R-2. Red Book. Issue 2. Washington, D.C.: CCSDS, Au-gust 1996.
4. Lossless Data Compression. Recommendation for Space Data System Standart, CCSDS 121.0-B-1. Blue Book. Issue 1. Washington, D.C.: CCSDS, May 1997.
5. Аношкин АВ., Аношкин ДА., Зайцев ЮА., Ромашенко Е.К. Исследование возможностей универсального алгоритма сжатия и кодирования сжатых данных по сокращению избыточности типовых телеметрических сообщений. Сборник научных трудов Военной академии им. Петра Великого, 1998.

Материал поступил в редакцию 24. 03. 2010 г.