

# Помехоустойчивость передачи сжатых данных видеоинформационных систем

И. А. Козин, Я. О. Саклаков

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского*

**Аннотация.** Рассматривается помехоустойчивость передачи сжатых массивов видеоданных видеоинформационных систем по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью. Предложен подход к повышению достоверности передачи массива сжатых видеоданных основанный на учете результатов совместной работы алгоритмов сжатия и формирования сигнально-кодовых конструкций.

**Ключевые слова:** видеоданные; пропускная способность, достоверность; сигнально-кодовые конструкции; сжатие

## I. ВВЕДЕНИЕ

Разрабатываемые в настоящее время образцы аэрокосмических видеоинформационных систем представляют собой высокотехнологичные изделия электроники, развивающиеся в направлении широкого использования высокоинформативной оптико-электронной аппаратуры (ОЭА), регистрирующей и передающей потребителю большие объемы видеоданных. Одним из требований, предъявляемых к таким видеоинформационным системам, является обеспечение высоких показателей скорости и достоверности доставки потребителям массивов зарегистрированных видеоданных (ВД). Обеспечение высоких показателей скорости передачи ВД сопряжено с необходимостью согласования растущих объемов, регистрируемых ВД с ограниченной пропускной способностью современных радиоканалов передачи данных на наземные комплексы приема информации (НКПИ) [1].

Пропускная способность радиоканала передачи ВД на НКПИ, как правило, определяется выделенной шириной полосы пропускания и качеством канала связи – отношением сигнал/шум на входе приемника [2]. При этом низкий уровень порогового отношения сигнал/шум определяется параметрами сигнально-кодовых конструкций (СКК), реализуемых на этапе канального кодирования данных, при их передаче по радиоканалу.

Задачу согласования высокой информационной производительности современной ОЭА с пропускной способностью радиоканала передачи ВД можно решить за счет применения различных алгоритмов сжатия (компрессии) ВД, снижающих объемы передаваемых данных.

При этом компрессия ВД и помехоустойчивое кодирование осуществляются разными подсистемами бортовой аппаратуры и алгоритмы преобразования ВД при компрессии и кодировании в настоящее время разрабатываются самостоятельно, и при этом не учитываются особенности их совместной реализации в составе бортовой аппаратуры. Это приводит к тому, что с одной стороны, выбирая алгоритм сжатия ВД не

учитывается его влияние на помехоустойчивость передачи ВД по радиоканалу. С другой стороны, реализуемые в настоящее время в бортовой аппаратуре алгоритмы канального кодирования могут быть применены к любым передаваемым данным и не учитывают возможные искажения, обусловленные сжатием передаваемых по радиоканалу ВД.

Более того, анализ качества принятых ВД показывает, что при компрессии и помехоустойчивом кодировании, передаваемых массивов ВД не учитываются особенности проявления искажений, принятых ВД (пропущенных и не исправленных корректирующим кодом). Такие искажения обусловлены каскадной работой систем сжатия и формирования СКК, приводящих при определенных условиях к значимым трансформациям принятых ВД вплоть до невозможности их использования. Поэтому при разработке высокоинформативных видеоинформационных систем для обеспечения высокой достоверности и оперативности передачи по радиолиниям с ограниченной пропускной способностью данных наблюдения высокого качества необходима проработка вопроса настройки совместной работы алгоритмов сжатия и формирования СКК [3, 4].

## II. КАЧЕСТВО ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОДАНЫХ ПО РАДИОКАНАЛАМ С ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Высокоскоростная передача ВД, регистрируемых видеоинформационными системами по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью, осуществляется, как правило, в условиях низкой надежности канала связи, что приводит к искажению, вплоть до полной потери принимаемых ВД. В общем виде воздействие шумов и помех на массив сжатых ВД при передаче по радиоканалу характеризуется появлением одиночных и групповых искажений ВД как это показано на рис. 1.

Одиночные искажения приводят к трансформации отдельных элементов изображений, групповые искажения приводят к тому, что трансформируются целые блоки ВД, выбиваются целые группы пикселей.

Анализ передачи по радиоканалу несжатых изображений показал, при вероятности искажения бита информации  $P_b = 10^{-2}$ , визуальный анализ изображений становится затруднительным, появляются искажения в виде большого числа пикселей с ошибочными значениями яркости, исправление которых возможно лишь путем применения фильтрации изображения с усреднением яркости по соседним пикселям, что позволяет значительно улучшить качество изображения и его визуальное восприятие. При таком подходе информационная избыточность несжатого изображения

частично повышает помехоустойчивость передачи. При группировании ошибок в канале (в соответствии с моделью Гильберта), происходит появление отдельных «выпадающих» строк изображения, восстановление которых невозможно. Характерной особенностью подобных искажений является их абсолютное разрушительное действие, часто приводящее к полной потере информации в сжатом массиве ВД и невозможности ее восстановления.

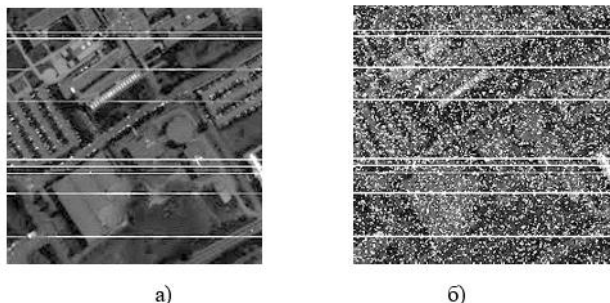


Рис. 1. Групповые искажения а) и групповые и одиночные б) искажения спутниковых снимков вследствие воздействия помех

Передача по радиоканалу массива сжатых ВД, приводит к появлению дополнительных искажений, обусловленных работой алгоритмов сжатия, что приводит к дополнительному снижению качества получаемых ВД, вплоть до полной их потери. Применительно к сжатым ВД снижение качества (увеличение количества ошибок при приеме и восстановлении изображения) приводит к заметным перепадам значения яркости части изображения, а в худшем случае соответствует появлению абсолютно черных или белых полос, как это показано на рис. 2.

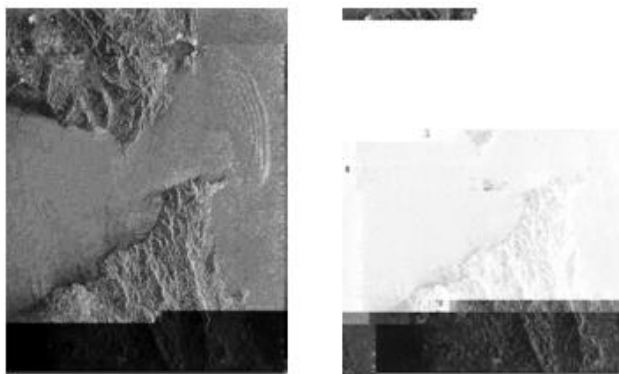


Рис. 2. Характер искажений принятого изображения при высокоскоростной передаче по радиоканалу с ограниченной пропускной способностью

Массив сжатых ВД подвержен воздействию помех в значительно большей степени, а конкретные эффекты искажения зависят во многом от математической основы алгоритма сжатия. Так воздействие помех на ВД, сжатые арифметическим методом, при наличии хотя бы одной ошибки изображение теряется практически полностью. Например, при кодировании методом Хаффмана возникают значительные искажения, имеющие вид деформации изображения. При сжатии методами, использующими разбиение изображения на блоки, искажения изображений зависят от того искажаются информационные символы, приходящиеся на передачу уровней яркости или на передачу маски изображения. Искажения символов, передающих значения яркости,

существенно влияют на визуальное восприятие изображений, при этом, как правило, исчезают целые блоки изображения.

При воздействии помех на изображения, сжатые по методу дискретно-косинусного преобразования (ДКП), искажаются коэффициенты преобразования. Поскольку длина кода, отведенного под передачу одного из коэффициентов невелика, то искажение значения яркости пикселя ВД, как правило, несколько меньше, чем то, что возникает при передаче изображения, не подвергнутого сжатию. Однако искажение при передаче одного коэффициента преобразования приводит к трансформации целой группы пикселей ВД. При этом в ряде случаев на изображениях возникают артефакты в виде изображений несуществующих объектов, которые могут быть приняты за реально существующие объекты. Это приводит к тому, что метод сжатия изображений, математической основой которого является ДКП, оказывается наиболее уязвимым к воздействию помех. Воздействие помех на ВД сжатые методом, математической основой которого является дискретное вейвлет-преобразование (ДВП), также может приводить к появлению ложных объектов на изображении, подобных используемым базисным функциям вейвлет-преобразования. Для метода сжатия на основе ДКП вероятность ошибки на бит при передаче изображения по радиоканалу не должна быть хуже  $P_b = 2 - 3 \times 10^{-5}$ , для алгоритмов сжатия на основе ДВП не менее  $P_b = 1 - 2 \times 10^{-4}$ , при этом несжатая передача требует вероятности ошибок не менее  $P_b = 10^{-3}$ . Поэтому в качестве наиболее перспективных методов сжатия следует рассматривать сжатие на основе ДВП. Основным препятствием на пути использования алгоритмов сжатия на основе ДВП является их вычислительная сложность и дороговизна в аппаратной реализации для использования в условиях космического пространства.

Таким образом, передача по радиоканалу сжатых ВД требует использования СКК на основе эффективных помехоустойчивых кодов, особое внимание необходимо уделять защите информации необходимой для восстановления сжатого изображения.

### III. ДОСТОВЕРНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ВД ПО РАДИОКАНАЛАМ С ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

В специализированных радиотехнических системах передачи ВД достоверность определяется степенью искажения принятых изображений. Эти искажения зависят от интенсивности и характера помех в радиолинии передачи, в этом случае достоверность передачи видеоданных полностью определяется помехоустойчивостью системы. Искажения также проявляются вследствие особенностей совместной работы алгоритмов сжатия видеоданных и формирования СКК при передаче по радиоканалу.

Оценивать достоверность передачи сжатых и пакетированных ВД целесообразно вероятностью искажения передаваемого транспортного кадра  $P_{ТК}$ . Особенностью технологии передачи видеоданных является разбиение передаваемого массива сжатых ВД на пакеты заданного размера. Сформированные пакеты подвергаются помехоустойчивому кодированию и передаются по радиоканалу в составе транспортных кадров. Транспортный кадр представляет собой

совокупность информационной и служебной части фиксированного объема. Информационная часть транспортного кадра предназначена для хранения и передачи ВД. Служебная часть транспортного кадра – для хранения и передачи информации о времени начала и окончания передачи, проверочных битах помехоустойчивого кода, номера переданного и следующего информационного пакета и т. п.

С практической точки зрения при организации передачи массива сжатых ВД по радиоканалу важно при заданном уровне пропускной способности радиоканала  $R$  обеспечить максимально высокий уровень достоверности передачи.

Пропускная способность радиоканала определяется параметрами используемой СКК, параметрами задействованного для передачи частотного диапазона, качества канала передачи и может быть определена как функция вида:

$$R = f(W(K_1), \{M\}, q(K_2)), \quad (1)$$

где  $W(K_1)$  – полоса частот,  $(W(K_1) \leq W_{\text{доп}}(K_1))$ , максимальное значение полосы частот  $W_{\text{доп}}$  задано регламентом радиосвязи;  $M$  – множество видов и параметров манипуляции,  $M \in (\Phi M, ЧМ, КАМ, \dots)$ ;  $q(K_2)$  – отношение сигнал/шум обеспечиваемое на входе приемной системы НКПОР,  $q(K_2) \leq q_{\text{max}}(K_2)$ ;  $K_1, K_2$  – коэффициенты эффективности использования полосы частот и вида манипуляции (1/сВт) соответственно.

Повышение достоверности передачи ВД с может быть обеспечено за счет разработки алгоритма  $A(A_{\text{сж}}, A_{\text{срк}})$  совместного функционирования алгоритмов сжатия ( $A_{\text{сж}}$ ) и формирования СКК ( $A_{\text{срк}}$ ) при передаче ВД, позволяющего минимизировать вероятность искажения транспортного кадра:

$$A(A_{\text{сж}}, A_{\text{срк}}): (\Pi_{\text{сж}}^{\text{opt}}, \Pi_{\text{срк}}^{\text{opt}}, \Pi_{\text{пмук}}) = \text{agr min}(P_{TK} = f(\Pi_{\text{сж}}^{\text{opt}}, \Pi_{\text{срк}}^{\text{opt}}, \Pi_{\text{пмук}})), \quad (2)$$

$$R = \text{const}$$

где  $\Pi_{\text{сж}}^{\text{opt}}$  – множество параметров сжатия,  $\Pi_{\text{срк}}^{\text{opt}}$  – множество параметров формирования СКК,  $\Pi_{\text{пмук}}$  – множество параметров характеризующих качество канала передачи.

При выборе и настройке алгоритма сжатия важно обеспечить требуемое качество ВД  $Q_{\text{тр}}$ , определяющее решение задач тематической обработки, и требуемый коэффициент сжатия  $K_{\text{сж тр}}$ , обеспечивающий сжатие с минимально возможными потерями качества ВД. В результате в бортовой аппаратуре космических видеoinформационных систем коэффициент сжатия выбирается из условия  $K_{\text{сж}}(A_{\text{сж}}) \leq K_{\text{сж тр}}$ , при этом достоверность восстановленных после сжатия ВД  $Q(A_{\text{сж}})$  должна соответствовать предъявляемым требованиям  $Q(A_{\text{сж}}) \rightarrow Q_{\text{тр}}$ .

Выбор и настройка алгоритмов помехоустойчивого кодирования  $A_{\text{пк}}$  для обнаружения и исправления ошибок и сбоев осуществляется так, чтобы достоверность переданного массива сжатых ВД  $P(Q(A_{\text{пк}}))$  (вероятность правильного декодирования ВД без потери данных,  $P(Q(A_{\text{пк}})) \rightarrow 0$ ) была не выше требуемой достоверности передачи ВД на НКПОР

$P_{b \text{ тр}}: (Q(A_{\text{пк}})) \leq P_{b \text{ тр}}$ . Помехоустойчивое кодирование сопряжено с увеличением объема передаваемых данных, поэтому вносимая избыточность помехоустойчивого кода  $\eta$  должна быть как можно меньше  $\eta(A_{\text{пк}}) \rightarrow \eta_{\text{min}}$ .

Как показали исследования, размер пакета транспортного кадра также существенно влияет на достоверность передачи ВД. Так вероятность того, что ни один бит в транспортном кадре объема  $L$  не будет искажен, равна произведению вероятностей правильной передачи каждого бита  $P = \prod_1^L (1 - P_b)$ , тогда вероятность правильного приема транспортного кадра определяется как  $P_{\text{птк}} = (1 - P_b)^L$ , а вероятность потери (искажения) кадра  $P_{TK} = 1 - (1 - P_b)^L$ . В случае обнаружения ошибки в одном из транспортных кадров его передача повторяется. При передаче ВД  $x$  транспортными кадрами с числом информационных бит  $V$ , размер транспортного кадра  $L$  определяется размером информационной части и размером служебной части  $Se$  транспортного кадра и составляет  $L = \frac{V}{x} + Se$ . В среднем для передачи одного транспортного кадра необходимо задействовать  $L(1 + P_{TK} + P_{TK}^2 + P_{TK}^3 + \dots)$  бит. С использованием выражения для бесконечно убывающей геометрической прогрессии и выражения для вычисления  $P_{TK}$  можно получить выражение для вычисления среднего размера транспортного кадра  $V_{TK}(x)$ :

$$V_{TK}(x) = (x \cdot L) / (1 - P_b) = x \cdot L \cdot (1 - P_b)^{-L} \quad (3)$$

Анализ функции  $V_{TK}(x)$  показывает, что на интервале  $[1:L]$  функция имеет единственный максимум, который позволяет определить, оптимальный для передачи ВД с заданной достоверностью, размер транспортного кадра.

Самостоятельный и несогласованный, применительно к решению задачи повышения достоверности передачи ВД, выбор параметров алгоритмов сжатия и помехоустойчивого кодирования ВД приводит к выбору алгоритмов помехоустойчивого кодирования с высокой избыточностью  $\eta$ , что позволяет исключить потерю данных из-за сбоев и ошибок, а также к выбору алгоритмов сжатия с ограниченным значением коэффициента сжатия  $K_{\text{сж}}$ . Реализуемые в настоящее время в бортовой аппаратуре космических видеoinформационных систем алгоритмы сжатия характеризуются низкими значениями коэффициентов сжатия, как правило, не более  $K_{\text{сж}} = 3-4$ .

Низкие значения коэффициента сжатия позволяют в любых условиях обеспечить минимальную разницу в качестве исходных и восстановленных ВД. Однако если при сжатии осуществлять контроль качества восстановленных изображений и сжимать ВД до тех пор, пока качество будет удовлетворять предъявляемы потребителем требованиям (не снижается качество решения конечных задач тематической обработки ВД) то можно реализовать большие значения коэффициентов сжатия, при этом потери информации при сжатии будут контролируемыми.

Максимально-возможный коэффициент сжатия ВД с потерями можно определить с использованием оценок стандартных объективных метрик качества изображений [5]: среднеквадратичной ошибки разности яркости эталонного зарегистрированного изображения и

восстановленного после сжатия изображения; вероятности (частоты) появления искаженных значений яркости пикселя в сжатом изображении; коэффициента корреляции двух изображений, энтропией. В результате выполнения операций сжатия зарегистрированного изображения с постепенным увеличением степени сжатия и проводя после каждой итерации, с помощью стандартных объективных метрик, оценку качества изображения, становится возможным существенно увеличивать степень компрессии ВД. В большинстве случаев коэффициент сжатия может быть  $K_{сж} \geq 6$ .

Таким образом, освобождаемый в результате большего сжатия видеоданных ресурс времени на передачу, может быть задействован для применения помехоустойчивого кодирования с повышением энергии передаваемых символов. Увеличение коэффициента сжатия позволяет использовать СКК с измененной схемой модуляции или использовать помехоустойчивые коды с меньшей кодовой скоростью, обеспечивающие более высокий уровень помехоустойчивости.

Для проведения исследований достоверности передачи сжатых видеоданных, с учетом результатов настройки совместной работы алгоритмов сжатия и формирования СКК, разработана аппаратно-программная имитационная модель бортового радиотехнического комплекса передачи ВД. Имитационная модель разработана в среде моделирования LabVIEW на графическом языке программирования «G». В модели программно реализованы алгоритмы работы системы формирования и сжатия ВД, системы формирования СКК с помехоустойчивым кодированием и системы формирования транспортных кадров для передачи по радиоканалу. В модели на аппаратном уровне на базе трех трансиверов «USRP SDR National Instrument» с диапазоном частот от 50 МГц до 6 ГГц реализованы элементы радиолинии передачи ВД.

Результаты моделирования показали, что существует оптимальный размер транспортного кадра, обеспечивающий заданное значение пропускной способности с максимальным значением достоверности передачи. Так, например, при пропускной способности канала  $R = 1\text{--}5$  Мбит/с для обеспечения достоверности передачи  $P_{TK} = 10^{-3}$  оптимальная длина пакета будет составлять порядка 12000 бит. Для оптимизации работы радиолинии передачи ВД могут быть применены схемы с адаптивным изменением размера транспортного кадра в зависимости от требуемой достоверности передачи и пропускной способности канала.

Для СКК на основе турбокодов (внешние БЧХ-коды и коды Рида–Соломона, внутренние сверточные и коды с низкой плотностью проверок на четность с кодовой скоростью 5/6–7/8) фазовая модуляция 8ФМ и при сжатии ВД алгоритмом на основе ДКП с коэффициентом сжатия 3 при увеличении коэффициента сжатия более 6 для достижения повышения достоверности передачи ВД с  $P_{TK} = 10^{-2}$  до  $P_{TK} = 10^{-3}$ , могут быть использованы турбокоды с кодовой скоростью 1/2–2/3 при фазовой модуляции 8ФМ или турбокоды с кодовой скоростью 5/6–7/8 и фазовой модуляции 4ФМ.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, достоверность оперативной передачи сжатых видеоданных космических видеоинформационных систем по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью может быть повышена за счет учета специфики совместной работы алгоритмов сжатия и формирования СКК. Контроль качества ВД при сжатии позволяет увеличить степень компрессии ВД по сравнению со стандартно реализуемой в современных космических видеоинформационных системах и задействовать при передаче по радиоканалу СКК с измененной схемой модуляции и кодами с более высоким уровнем помехоустойчивости. В большинстве случаев при увеличении коэффициента сжатия до шести и более и изменении параметров СКК удается снизить потери ВД при передаче по радиоканалу на 20–40 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Теория и практика космического телевидения / Под ред. А. А. Умбиталиева, А. К. Цицулина. СПб.: НИИ Телевидения, 2017. 368 с.
- [2] Кашеев А. А. Оценка оперативности доставки информации по высокоскоростной радиолинии космических систем дистанционного зондирования Земли // Журнал радиоэлектроники, 2016, №8. С. 1-10.
- [3] Козинев И. А., Лешоко А. А. Адаптивный выбор алгоритмов сжатия и формирования сигнально-кодовых конструкций для оперативной передачи видеоданных дистанционного зондирования Земли по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, № 667, 2019. С. 100–109.
- [4] Перспективные информационные технологии дистанционного зондирования Земли: монография / под ред. В. А. Соифера. Самара: Новая техника, 2015. 256 с.
- [5] Цицулин А. К., Зубаткин И. А. Концепция качества информации в теории связи // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2016, Вып.4. С. 26-32.