

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРИ ВЫБОРЕ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО КАНАЛАМ СВЯЗИ

Глумов Н.И.

Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

В работе рассматривается задача выбора алгоритмов сжатия и помехоустойчивого кодирования для передачи цифровых изображений по каналам связи. Рассмотрены критерии качества выходных изображений и предложена методика моделирования сбоев в канале связи. На примере метода сжатия на основе иерархической сеточной интерполяции показана возможность значительного повышения помехозащищенности сжатых изображений.

Введение

В системах формирования и передачи цифровых изображений (СФПЦИ) по каналам связи наиболее важными являются следующие алгоритмы преобразования информации. Во-первых, для сокращения объема передаваемой информации по каналу связи с ограниченной пропускной способностью используется алгоритм сжатия. Во-вторых, с целью защиты передаваемых данных от помех канала связи используется алгоритм помехоустойчивого кодирования.

Поскольку данные алгоритмы реализуются в различных подсистемах СФПЦИ, разработка алгоритмов обычно осуществляется независимо друг от друга, без учета взаимной специфики. С одной стороны, при выборе алгоритма сжатия не учитывается устойчивость сжатых данных к сбоям. С другой стороны, все известные алгоритмы помехоустойчивого кодирования (АПК) являются универсальными по отношению к исходным данным и не используют ограниченность набора возможных комбинаций массива сжатых данных известной длины. Кроме того, не учитывается вероятностный характер последствий неисправленных сбоев, которые могут привести как к незначительным искажениям декомпрессированной информации (по сравнению с искажениями, внесенными при сжатии), так и к существенным искажениям вплоть до полной потери изображения.

В данной работе рассматривается комплексный подход к выбору алгоритмов сжатия и помехоустойчивого кодирования для реализации в СФПЦИ. При этом предполагаем следующую модель формирования и преобразования передаваемой в канал связи информации. Пусть изображение формируется путем построчного сканирования. Строки изображения объединяются в кадры размером $N \times M$ пикселей. Кадры подвергаются компрессии с заданной степенью сжатия B_c независимо друг от друга. Далее сжатая информация делится на блоки длиной k бит, каждый из которых преобразуется АПК (при этом размер блока увеличивается до размера $n > k$) и передается в канал связи. Полагаем, что сбои (инвертирование) бит при передаче данных происходят независимо друг от друга и известна вероятность p_0 сбоя одного бита.

Пусть S_i событие, заключающееся в появлении i сбоев в массиве сжатой информации, $P(S_i) = C_n^i p_0^i (1 - p_0)^{n-i}$ – вероятность данного собы-

тия. Несложно показать, что вероятность наличия сбоев $P(\bar{S}_0) = 1 - P(S_0) = 1 - (1 - p_0)^n$ в передаваемом блоке недопустима велика при значениях $p_0 > 10^{-7}$ (см. рис.1), что может привести к непредсказуемым последствиям, если сбои останутся неисправленными. Например, при передаче блока с размерами $N = M = 128$ пикселей в режиме $B_c = 2$ бит/пиксел (при $p_0 = 10^{-6}$) приблизительно каждый тридцатый блок окажется со сбоями.

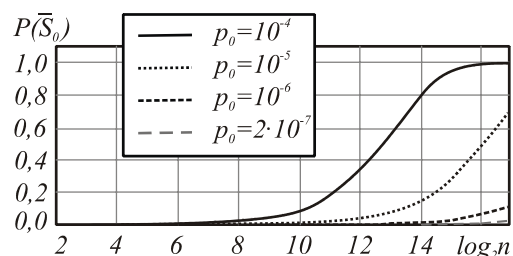


Рис.1. Вероятности появления сбоев при передаче по каналу связи блока длиной n бит

Критерии выбора алгоритма сжатия и АПК

Пусть A_c, A_{ecc} – соответственно алгоритмы сжатия и помехоустойчивого кодирования. Выбор АПК сводится к решению задачи оптимизации

$$\begin{cases} P(Q(A_{ecc}) = 0) \leq P_{bl} \\ \eta(A_{ecc}) \rightarrow \min_{A_{ecc}} \end{cases}$$

где $P(Q(A_{ecc}) = 0)$ – достоверность переданной информации, определяемая как вероятность безошибочного декодирования блока (потери информации отсутствуют), P_{bl} – требуемая достоверность передачи блока информации, $\eta = n/k$ – избыточность помехоустойчивого кода.

При выборе алгоритма сжатия и настройке его параметров эффективность оценивается в координатах «степень сжатия – качество восстановленной информации». При заданной степени сжатия B_c (бит/пиксел), ограниченной характеристиками канала связи и последующим внесением избыточности при помехоустойчивом кодировании, выбирается алгоритм, минимизирующий потери качества.

$$\begin{cases} B(A_c) \leq B_c \\ Q(A_c) \rightarrow \min_{A_c} \end{cases}$$

В качестве меры качества может использоваться, например, среднеквадратичное отклонение $\varepsilon_{кв}$ восстановленного после декомпрессии изображения от исходного.

Выше описанный подход с отдельным выбором алгоритмов требует применения АПК с высокой избыточностью, чтобы исключить потерю кадров вследствие неисправленных сбоев. Это приводит к ограничению допустимой степени сжатия и, соответственно, к ухудшению качества выходной информации. Более оправданной представляется следующая комплексная постановка задачи

$$\left\{ \begin{array}{l} B(A_c)\eta(A_{ecc}) \leq B_{fr} \\ P(Q(A_c) + Q(A_{ecc}) \leq Q_{fr}) \leq P_{fr}, \\ Q_{fr} \rightarrow \min_{A_c, A_{ecc}} \end{array} \right. \quad (1)$$

где B_{fr}, P_{fr} – требуемые степень сжатия и достоверность передачи всего кадра, Q_{fr} – суммарные потери качества восстановленного кадра вследствие применения алгоритма сжатия и АПК (полагаем соответствующие искажения независимыми). Следует отметить, что согласно данному критерию допускаются небольшие потери качества и при помехоустойчивом кодировании.

Оценка влияния сбоев на качество выходной информации

При сбоях различных бит в массиве сжатой информации наблюдается большой разброс значений показателя качества выходного изображения. Следовательно, оценка эффективности АПК только числом гарантированно исправляемых бит не совсем правомерна применительно к сжатой информации. Необходимо использовать вероятностные оценки качества выходных изображений, которые можно получить путем моделирования всей цепочки преобразования изображения – сжатия, помехоустойчивого кодирования, внесения сбоев в информацию, декодирования и декомпрессии.

Однако непосредственное моделирование сбоев с малой вероятностью (при $p_0 B_c N M \ll 1$) требует большого количества вычислительных эксперимен-

тов. Вместо этого предлагается проводить моделирование с априорно заданным количеством сбоев в массиве кодированной информации. Ограничиваясь при моделировании событиями $\{S_i\}_{i=1}^I$, можно построить гистограммы распределения выходного показателя качества и получить оценки условных вероятностей $P(Q \leq Q_{fr} / S_i)$. При этом необходимое количество моделируемых событий I определяется из условия заданной точности

$$\sum_{i=I+1}^n P(S_i) < \varepsilon.$$

Так, например, для моделирования сбоев в блоке длиной $n = 2^{15}$ при $p_0 = 10^{-5}$ достаточно ограничиться количеством $I = 4$, чтобы обеспечить погрешность менее $2 \cdot 10^{-5}$.

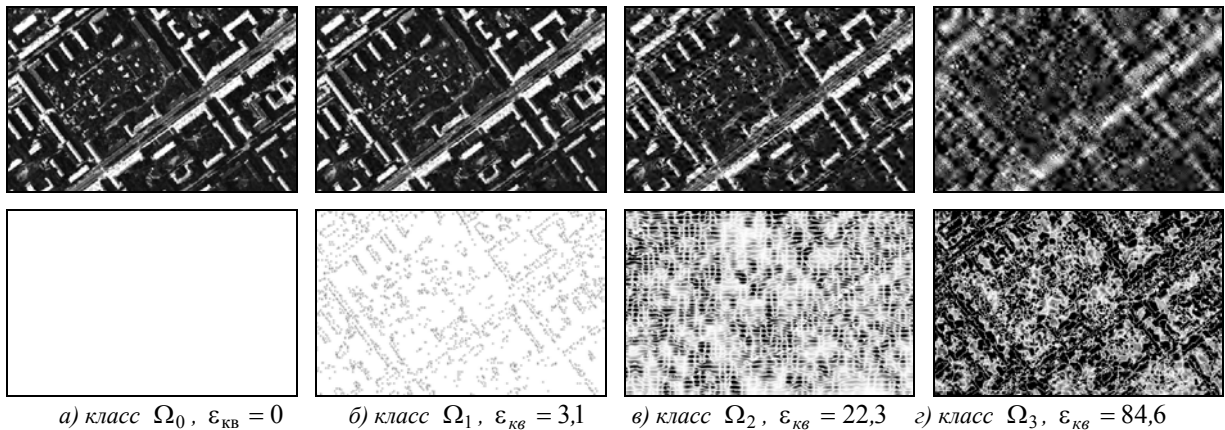
Окончательно качество выходного изображения оценивается с помощью интегральной гистограммы:

$$F(Q_{fr}) = \sum_{i=0}^I P(Q \leq Q_{fr} / S_i) P(S_i). \quad (2)$$

При сравнении различных алгоритмов удобнее пользоваться интегральными оценками вероятностей. Задавая некоторые пороговые значения Q_1, Q_2 , введем следующую классификацию искажений:

- 1) $Q=0$ – изображение не содержит искажений,
- 2) $0 < Q \leq Q_1$ – изображение содержит незначительные искажения (без потери визуального качества),
- 3) $Q_1 < Q \leq Q_2$ – изображение содержит существенные искажения, тем не менее, изображение может быть пригодно для использования в каких-либо целях,
- 4) $Q > Q_2$ – изображение содержит искажения, которые делают информацию непригодной для дальнейшего использования.

Пусть $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ – соответственно события, заключающиеся в попадании изображения в указанные выше классы. Тогда для сравнительного анализа алгоритмов сжатия и АПК можно использовать оценки вероятностей данных событий, легко рассчитываемые с помощью (2).



а) класс $\Omega_0, \varepsilon_{кв} = 0$ б) класс $\Omega_1, \varepsilon_{кв} = 3,1$ в) класс $\Omega_2, \varepsilon_{кв} = 22,3$ г) класс $\Omega_3, \varepsilon_{кв} = 84,6$

Рис.2. Примеры изображений, различных классов (сверху – восстановленные после декомпрессии со сбоями; снизу - модули разностей изображений, восстановленных со сбоями типа S_2 и без сбоев)

На рис. 2 показаны примеры изображений, принадлежащие описанным классам (кроме того, иллюстрирующие влияние неисправленных сбоев на качество восстановленной после компрессии методом на основе вейвлет-преобразования).

Повышение помехозащищенности сжатых изображений

В [3] предложен способ повышения помехозащищенности сжатых изображений, согласно которому информация разделяется на две части – растровую и служебную, включающую заголовок изображения, параметры алгоритмов и т.д. Доля служебной информации в кадре составляет не более 1%, но она обладает особой ценностью для восстановления изображения - ее повреждение приводит практически всегда к потере изображения. Следовательно, для защиты служебной информации необходимо использовать эффективные АПК (например, коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ), Рида-Соломона [1]), обеспечивающие требуемую надежность передачи данных.

При гарантированном восстановлении служебной информации могут быть снижены требования к защите растровых данных при условии, что искажения вследствие неисправленных сбоев незначительны по сравнению с искажениями, внесенными при сжатии. При этом согласно критерию (1) будет уменьшена избыточность помехоустойчивого кода,

улучшена степень сжатия B_c , и в итоге повышено качество выходного изображения.

Дополнительные возможности по повышению помехозащищенности предоставляет иерархическая структура сжатых данных. Так, в методе сжатия на основе иерархической сеточной интерполяции (ИСИ-методе) [2] сжатые данные формируются последовательно по иерархическим уровням изображения, начиная со сжатия прореженного в 2^{L-1} изображения (где L – число иерархических уровней). Поскольку при переходе на очередной уровень объем данных увеличивается приблизительно в 4 раза, то также растет и вероятность наличия сбоев на очередном уровне. Однако даже при невозможности исправления сбоев на младшем уровне изображение не теряется полностью, а может быть получено путем интерполяции восстановленных старших уровней. На рисунках 3а-3в показаны примеры декомпрессированных изображений со сбоями (типа S_2 – на младших иерархических уровнях $l=0$ и $l=1$), восстановленного до различных иерархических уровней l , а также разностные изображения (модули разностей изображений, восстановленных со сбоями и без). В случае невозможности устранения сбоев использование интерполяции позволяет восстановить изображение (рис.3д), хотя и с худшим разрешением.

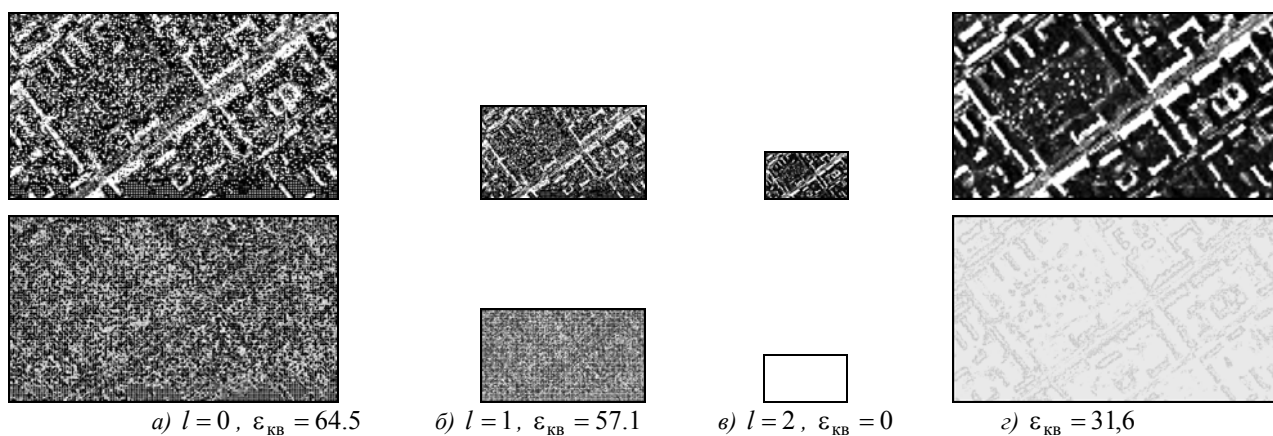


Рис. 3. Использование интерполяционного восстановления при неустраняемых сбоях (сверху – декомпрессированные восстановленные до l -го уровня изображения; снизу – разностные изображения)

Результаты исследований

В рамках работы проведено исследование трех методов сжатия цифровых изображений – JPEG, на основе вейвлет-преобразования и ИСИ-метода, доработанного с целью повышения помехозащищенности сжатых данных. Модификация ИСИ-метода заключалась:

1) во внесении в служебную информацию контрольных признаков для каждого иерархического уровня;

2) в выделении и кодировании служебной информации с помощью БЧХ-кодов.

Вычисление при декомпрессии изображения контрольных признаков и сравнение их с истинными значениями позволяет обнаружить и исправить сбои типов S_1, S_2 .

На рис. 4 представлены зависимости вероятностей потери иерархических уровней изображения от вероятности сбоя одного бита (при $B_c NM = 2^{15}$ бит). При этом вероятность безошибочной передачи всего изображения составляет $1 - P_{loss}(0)$. Легко видеть, что вероятность потери старших уровней пренебрежимо мала.

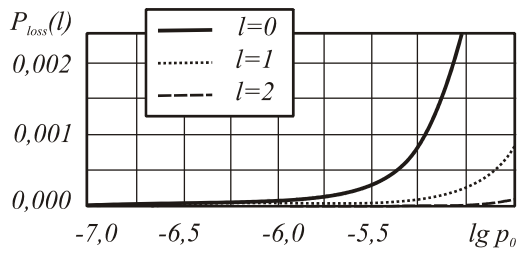


Рис. 4. Оценка вероятностей потери данных иерархических уровней изображения в ИСИ-методе

На рис. 5, 6 представлены результаты исследования влияния сбоев на сжатые изображения для различных методов сжатия. При этом помехоустойчивое кодирование (за исключением кодирования служебной информации в ИСИ-методе) не применялось. Для сравнения помехоустойчивости сжатых данных приведены интегральные гистограммы показателя качества (среднеквадратичного отклонения $\varepsilon_{кв}$) и зависимости вероятностей принадлежности декомпрессированного изображения к классам Ω_0 и Ω_3 от вероятности сбоя p_0 .

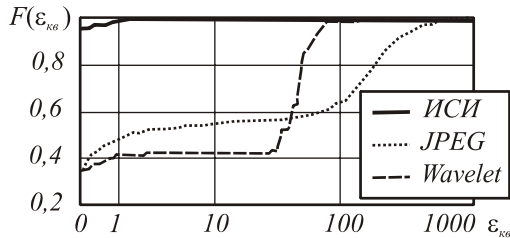


Рис. 5. Интегральные гистограммы показателя качества (среднеквадратичного отклонения)

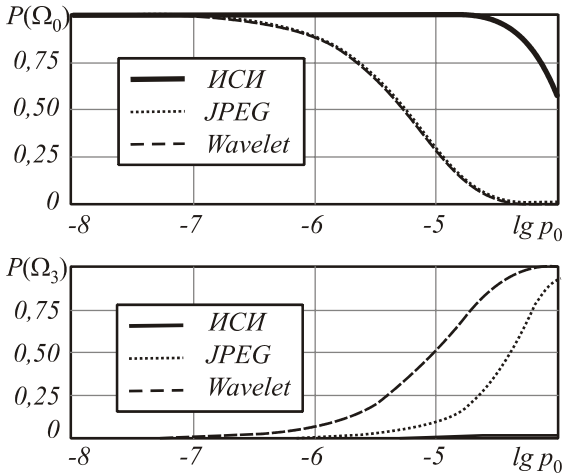


Рис. 6. Зависимости оценок качества выходной информации от вероятности сбоя одного бита

Результаты демонстрируют значительное превосходство ИСИ-метода по помехозащищенности

данных. Так, с вероятностью 0,986 последствия сбоев в сжатой ИСИ-методом информации будут полностью устранены (при $p_0 = 10^{-6}$), а с вероятностью 0,997 погрешность восстановления не превысит 1, что соответствует классу Ω_1 . Как показали исследования, влиянием сбоев на качество восстановленного изображения можно пренебречь на всем диапазоне $p_0 < 10^{-5}$.

Для известных методов JPEG и на основе вейвлет-преобразования проблема помехозащищенности сжатых данных является весьма актуальной. С вероятностью не менее 0,5 восстановленные изображения будут неудовлетворительного качества, т.е. принадлежать классам Ω_2 и Ω_3 . Для того чтобы защитить изображения сжатые методами до уровня ИСИ-метода, необходимо путем помехоустойчивого кодирования ввести избыточность не менее 10%. Однако при фиксированной пропускной способности канала связи в этом случае применение АПК приведет к необходимости большего сжатия, что неизбежно ухудшит качество выходной информации.

Заключение

В работе предложен комплексный подход к выбору алгоритмов сжатия и помехоустойчивого кодирования для передачи сжатых изображений по каналу связи. На примере метода сжатия на основе иерархической сеточной интерполяции показана эффективность такого подхода, позволяющего оценить и значительно улучшить характеристики СФПЦИ на этапе проектирования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ, Администрации Самарской области и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF Project SA-014-02) в рамках российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант 04-01-96507.

Литература

1. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки // М.: Мир, 1976. 594 с.
2. Gashnikov M.V., Glumov N.I., Sergeyev V.V. Information-Processing Technology of Image Compression for Real-Time Systems // Pattern Recognition and Image Analysis, 2003. Vol. 13. No 2. P. 205-207.
3. Glumov N.I. Improving Noise Immunity of Transmission of Compressed Digital Images // Pattern Recognition and Image Analysis, 2003. Vol. 13. No 2. P. 273-276.