

# 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. Полагая, 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.

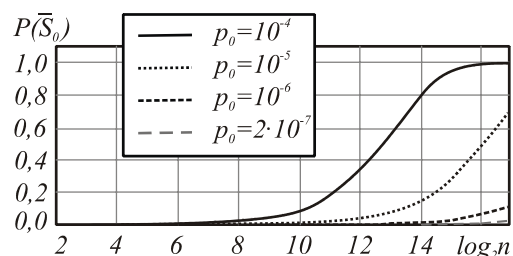


Рис.1. Вероятности появления сбоев при передаче по каналу связи блока длиной  $n$  бит

## 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  $p_0 B_c NM \ll 1$ ) 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  $2 \cdot 10^{-5}$ .

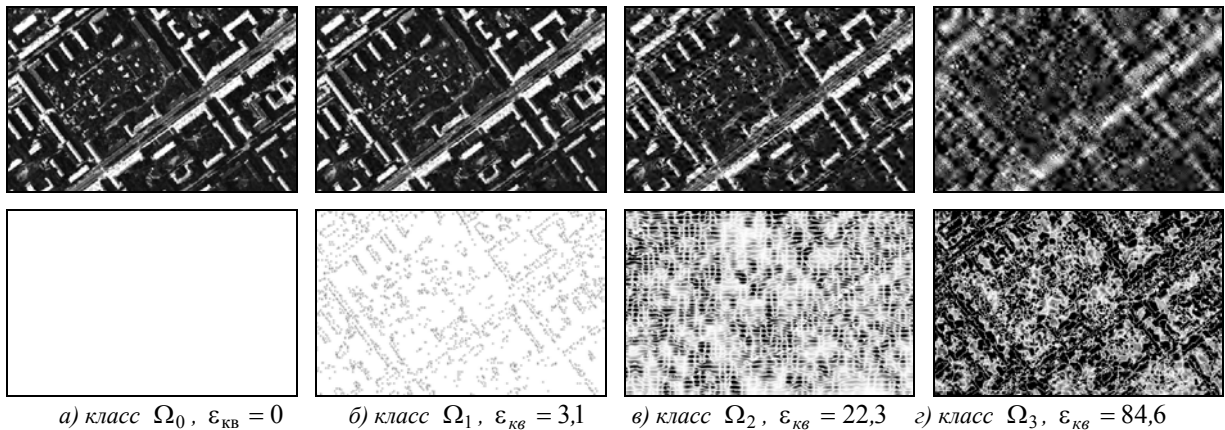
Окончательно качество выходного изображения оценивается с помощью интегральной гистограммы:

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

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.

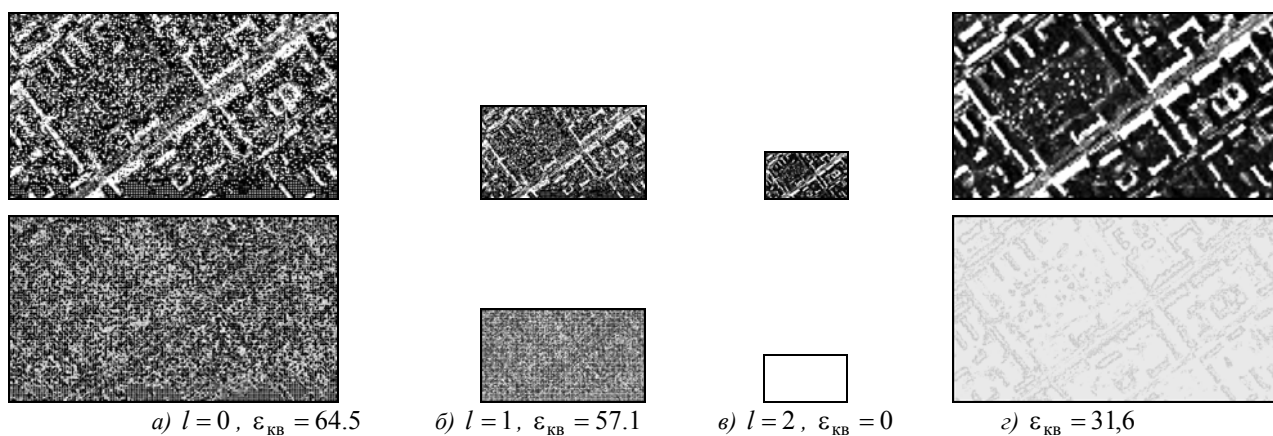


Рис. 3. Использование интерполяционного восстановления при неустраняемых сбоях (сверху – декомпрессированные восстановленные до  $l$ -го уровня изображения; снизу – разностные изображения)

### 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.

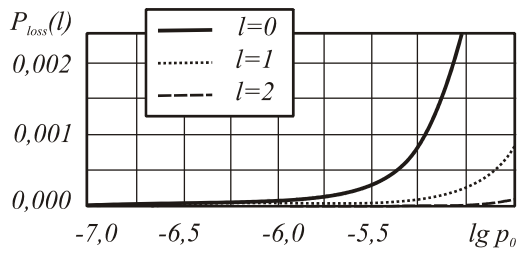


Рис. 4. Оценка вероятностей потери данных иерархических уровней изображения в ИСИ-методе

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  $\Omega_0$  и  $\Omega_3$  от вероятности сбоя  $p_0$ .

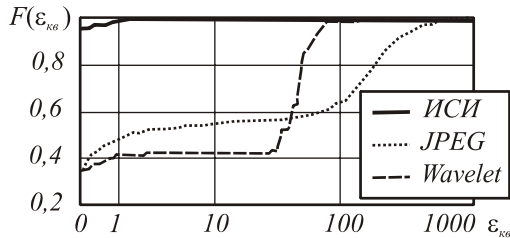


Рис. 5. Интегральные гистограммы показателя качества (среднеквадратичного отклонения)

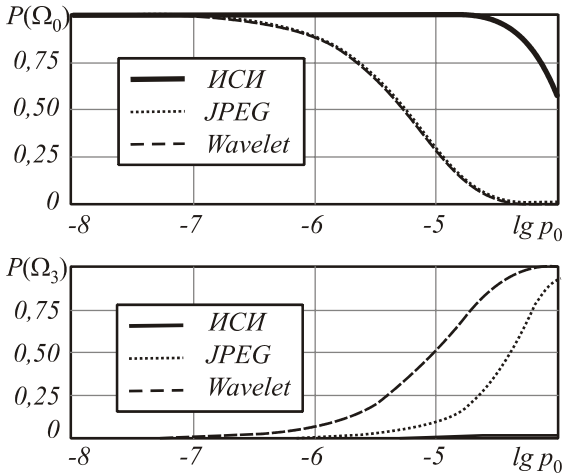


Рис. 6. Зависимости оценок качества выходной информации от вероятности сбоя одного бита

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  $\Omega_1$ . 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  $\Omega_2$  и  $\Omega_3$ . 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.

# Comprehensive approach to the choice of compression and error-control coding algorithms for digital image transmission through communication channels

*N.I. Glumov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Image Processing Systems Institute of RAS*

## ***Abstract***

The paper considers the problem of choosing the algorithms for compression and noiseless coding to transmit digital images over communication channels. The quality criteria for the output images are considered and a procedure for simulation of failures in the communication channel is proposed. The possibility of a significant increase in the noise immunity of compressed images is exemplified by the compression method based on hierarchical grid interpolation.

***Keywords:*** digital image, communication channel, error-control, coding, algorithm compression, noiseless coding, grid interpolation.

***Citation:*** Glumov NI. Comprehensive approach to the choice of compression and error-control coding algorithms for digital image transmission through communication channels. *Computer Optics* 2004; 26: 106-109.

## ***References***

- [1] Peterson WW, Weldon EJ Jr. Error-correcting codes. Cambridge, London: MIT-Press; 1972.
- [2] Gashnikov MV, Glumov NI, Sergeyev VV. Information-processing technology of image compression for real-time systems. *Pattern Recognition and Image Analysis* 2003; 13(2): 205-207.
- [3] Glumov NI. Improving noise immunity of transmission of compressed digital images. *Pattern Recognition and Image Analysis* 2003; 13(2): 273-276.