

# ЭКСПЕРИМЕНТ ПО АДАПТИВНОМУ ПОВЫШЕНИЮ РОБАСТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

М. В. ХАРИНОВ<sup>♦</sup>, О. В. ГОЛОЛОВОВА

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178

<khar@iias.spb.su>

---

УДК 681.3

Харинов М. В., Гололобова О. В. Эксперимент по адаптивному повышению робастности изображения // Труды СПИИРАН. Вып. 4. — СПб.: Наука, 2007.

**Аннотация.** Исследуется модель сигнала, в которой информация подразделяется на фиксированную информацию изображения и переменную информацию модифицируемого сообщения. Объем содержащегося в изображении сообщения определяет количество произвольной информации, которую можно передать в составе изображения. Для сравнения с классической оценкой количества информации устанавливается зависимость объема сообщения от коэффициента сжатия изображения без потерь. На примере сжатия с потерями демонстрируется повышение устойчивости изображения к искажениям за счет восстановления исходного сообщения. Обсуждаются возможные приложения. — Библ. 8 назв.

UDC 681.3

Kharinov M. V., Gololobova O. V. Experiment on Adaptive Improvement of Image Robustness // SPIIRAS Proceedings. Issue 4. — SPb.: Nauka, 2007.

**Abstract.** The model of the signal is being examined, where the information is divided in fixed image information and variable information of the modifiable message. The volume of the message contained in image determines quantity of arbitrary information, which can be transferred inside the image. To compare with classic estimation of information quantity, the dependence of the quantity of message from lossless compression factor is drawn. On the example of lossy compression the increasing of image stability to distortion owing to restoration of the initial message is demonstrated. Possible applications are discussed. — Bibl. 8 items.

---

## 1. Введение

Как известно, для практической оценки количества информации достаточно сжать сигнал за счет оптимального кодирования и установить его объем в сжатом виде, что согласуется с классической вероятностной оценкой информации [1–3]. Потребность развития способов практической оценки и вычислительной интерпретации информации сигнала возникает в практике современной стеганографии [4], в которой необходимо:

- разделить информацию на явную и неявную;
- оценить объем неявной информации, замещаемой на криптографическое сообщение [5].

Для обеспечения безопасности информации, а также решения других задач хранения, обработки и передачи сигналов в [6] предложена модель изображения, в которой считается, что оно обладает аппаратно-независимой цифровой «виртуальной» памятью, состоящей из фиксированных и модифицируемых запоминающих элементов. В фиксированных запоминающих элементах хранится информация изображения, которую мы видим, а в модифицируемых — информация сообщения, или просто сообщение, которое менее заметно. Запись сообщения в модифицируемые запоминающие элементы той или иной

---

<sup>♦</sup> Исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, в 2007 г. поддержаны грантом международного фонда «Научный потенциал» (<http://www.hcfoundation.ru/>).

ячейки виртуальной памяти кодируется последовательностью модификаций яркостного значения соответствующего пиксела изображения. При этом виртуальная память позволяет использовать сигнал для хранения и передачи сообщения как обычное запоминающее устройство на физическом носителе.

Важным свойством виртуальной памяти является *адаптивность*, заключающаяся в том, что модификация изображения при записи сообщения или под действием некоторого возмущения (например, сжатия с потерями), хотя и влияет на вычисление виртуальной памяти, но компенсируется при циклическом повторении записи требуемого сообщения. При этом влияние встраивания сообщения на виртуальную память полностью подавляется за счет изменения ее *структуры*, т. е. разделения запоминающих элементов на фиксируемые и модифицируемые.

В [6] адаптивность виртуальной памяти демонстрировалась на примере повышения *робастности* (устойчивость) к сжатию с потерями изображения с однородным сообщением, состоящим из одинаковых кодов. Целью настоящей статьи является экспериментальное изучение адаптивности виртуальной памяти в общем случае восстановления информации изображения, нарушаемой под действием прямого и обратного JPEG-преобразования (сжатие и восстановление в исходном формате). Для обоснования дальнейшего развития приложений модели выполняется также сопоставление экспериментальных оценок количества информации.

## 2. Экспериментальные оценки количества информации

Мы оцениваем количество информации как объем сообщения, которое можно встроить в изображение, сохраняя его в сегментированном виде [6]. При этом количество информации (объем сообщения) не меняется при пропорциональном увеличении яркостей пикселей изображения, при упаковке изображения по яркости, эквидистантной нормировке а также других *стандартных* преобразованиях и определяется прежде всего разнообразием встречающихся значений яркости, что не противоречит классической вероятностной оценке [3]. Интерпретация понятия информации [6] строится в рамках детерминированного комбинаторного подхода [7]. При этом сопоставление экспериментальных оценок количества информации позволяет продолжить упомянутую аналогию и рассмотреть, как детерминированная оценка количества информации согласуется с классической вероятностной.

Пример сопоставления экспериментальных оценок количества информации иллюстрируется графиком (рис. 1).

Рис. 1 иллюстрирует для набора изображений зависимость объема сообщения от объема изображения в сжатом виде при сжатии без потерь, обеспечиваемого стандартной программой ZIP. Объемы на рисунке выражены в процентах объема рассматриваемого изображения. В качестве изображений взяты представления стандартного изображения «Лена» в ограниченном числе 3, 7, 15 ... градаций шкалы яркости, которые вычисляются в итеративном алгоритме преобразования изображения с выравниванием гистограммы [6, 8].

Как показывает график, обсуждаемая зависимость описывается плавной монотонной кривой, и с возрастанием числа градаций представления из рассматриваемого набора его объем в сжатом виде (или *компрессированный* объем) возрастает синхронно с объемом содержащегося в нем сообщения.

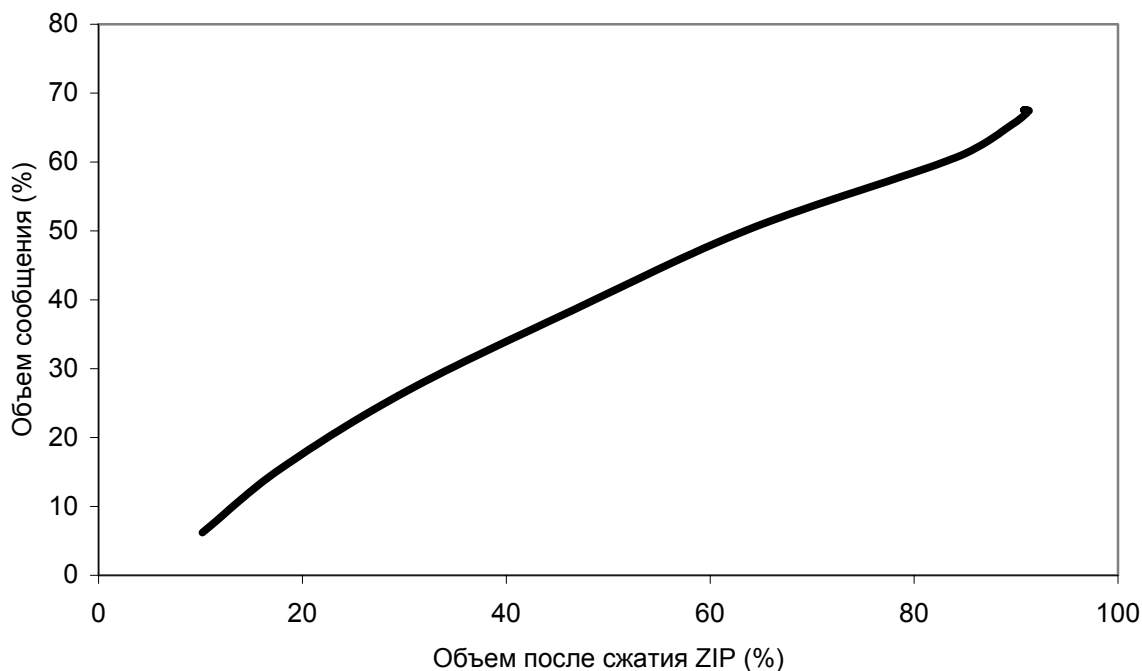


Рис. 1. Сравнение экспериментальных оценок количества информации по объему сообщения и компрессированному объему при сжатии без потерь.

Обсуждаемая зависимость близка к линейной и может аппроксимироваться, если не одним, то несколькими отрезками прямой, на которых объем сообщения допустимо считать пропорциональным компрессированному объему представления, содержащего это сообщение. Аналогичные результаты характерны и для других изображений, а также других параметров, например числа градаций, в зависимости от которого сравниваемые объемы ведут себя сходным образом.

Следует отметить, что в программной реализации модели учитывается формат записи видеоданных по цветовым компонентам, исключается накопление погрешностей вычислений и строго выполняются предусмотренные условия инвариантности. В отличие от объема изображения, сжатого универсальной программой ZIP, объем сообщения не меняется, скажем, при повороте изображения на 90° и строго монотонно возрастает при усложнении изображения за счет увеличения числа яркостей вблизи максимального значения\*.

Одним из приложений модели сигнала с виртуальной памятью является ее использование совместно с программами сжатия без потерь. Руководствуясь моделью, для увеличения коэффициента сжатия нетрудно перекодировать изображение так, чтобы увеличить число повторений байтов информации и усилить эффект перекодировки за счет редукции изображения по числу градаций яркости, что представляет интерес для области передачи изображений с целью последующей автоматической обработки.

Другим приложением является генерация изображений, устойчивых к возмущению в виде «черного ящика», механизм которого сложен или неизвестен.

\* Резкий изгиб в конце кривой на рис. 1 отображает немонотонное возрастание компрессированного объема с ростом числа градаций вблизи предельного значения при сжатии программой ZIP.

### 3. Повышение робастности изображения к JPEG-преобразованию

Алгоритм генерации представления изображения, адаптированного к тому или иному возмущению, сводится к чередованию преобразования изображения под действием возмущения с восстановлением в виртуальной памяти информации, извлеченной из первоначального изображения. При этом под действием возмущения модифицируется виртуальная память изображения и искажается содержащееся в ней сообщение. При восстановлении информации в модифицированную виртуальную память записывается содержимое виртуальной памяти исходного изображения (рис. 2).

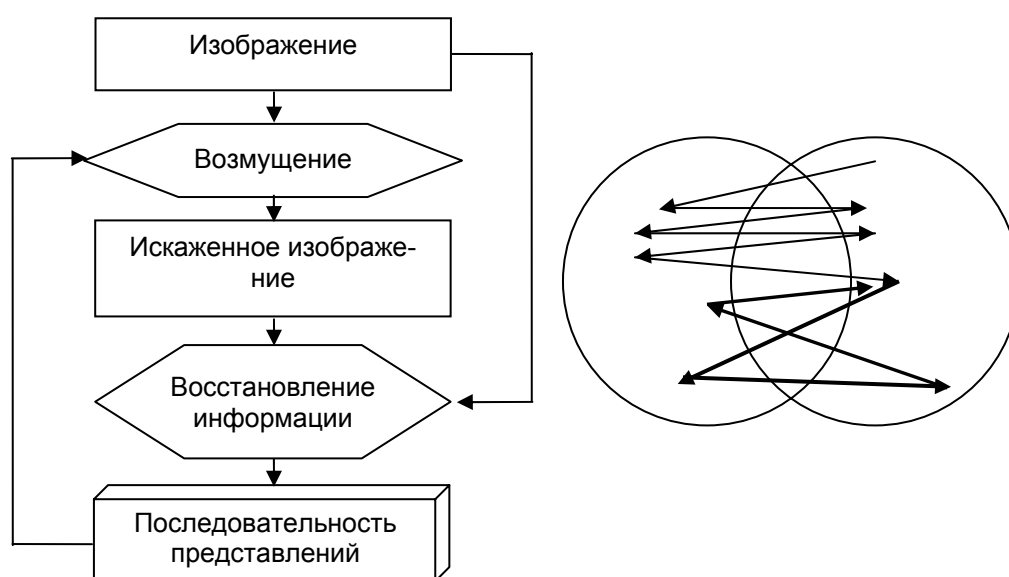


Рис. 2. Блок-схема генерации робастного представления изображения (слева) и схема получения последовательности представлений (справа).

Схема на рис. 2 справа приведена для *идемпотентных* преобразований изображения при восстановлении информации и под действием возмущения, каждое из которых при повторном выполнении не меняет полученное представление\*. Кругами обозначены множество рассматриваемых исходных изображений и множество представлений, получаемых под действием возмущения. Пересечение кругов обозначает множество представлений изображения, которые не меняются как при восстановлении информации, так и под действием возмущения.

Достаточное число повторений восстановления информации по очереди с возмущением приводит к некоторой последовательности представлений с восстановленной информацией, циклически преобразуемых одно в другое [6]. В идеальном случае полученная последовательность содержит единственное представление, которое сохраняется как при восстановлении информации, так и под действием возмущения. В более сложном случае полученное представление оказывается единственным, но искажается под действием возмущения.

\* Под *восстановлением* изображения имеется в виду его преобразование в представление, которое достигается при достаточном числе повторений записи информации исходного изображения в виртуальную память.

В общем случае при достаточном числе повторений зациклившаяся последовательность представлений содержит некоторое число «восстановленных» и такое же число «искаженных» представлений, из которых по тому или иному признаку выбирается единственное результирующее [6].

В проведенных экспериментах в качестве возмущения рассматривалась комбинация прямого и обратного JPEG-преобразования при управляющем параметре, равном 80, т. е. приблизительно при 40–50-кратном сжатии. Преобразование изображения под действием возмущения с последующим восстановлением повторялось до стабилизации зрительного восприятия и коэффициента сжатия при JPEG-преобразовании.

Результаты обработки представлены на рис. 3.

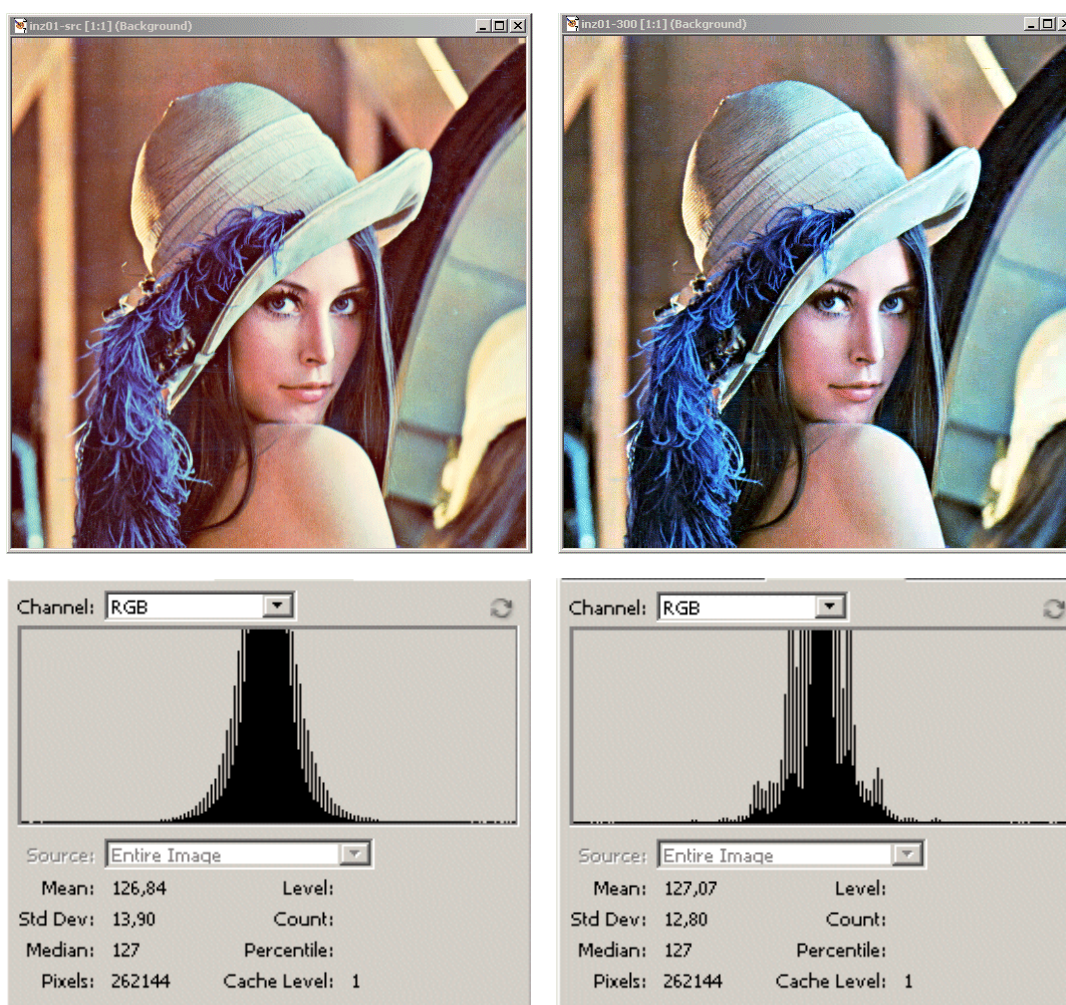


Рис. 3. Повышение робастности изображения к JPEG-преобразованию. Вверху: изображение (слева) и адаптированное представление (справа). Под изображениями показаны гистограммы искажений по всем трем цветовым компонентам, вносимых JPEG-преобразованием\*.

Гистограммы на рис. 3, полученные посредством программы PhotoShop, показаны в одинаковом масштабе и поэтому урезаны по высоте. Робастность адаптированного представления изображения выражается в уменьшении среднеквадратичной погрешности, вносимой JPEG-преобразованием.

\* Сравнение изображений выполнялось в *инвариантном* представлении, не зависящем от стандартных преобразований.

Оказывается, что робастность адаптированного представления изображения к JPEG-преобразованию сохраняется при изменении коэффициента сжатия (рис. 4).

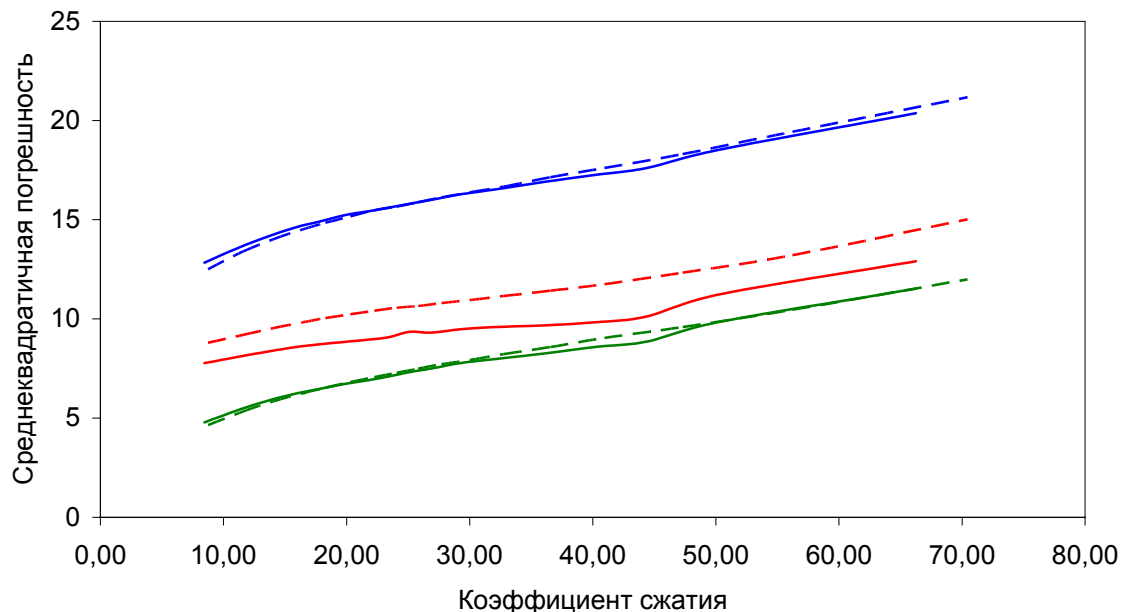


Рис. 4. Уменьшение погрешности искажения JPEG-преобразованием в адаптивном представлении (сплошные линии) по сравнению с исходным изображением (пунктирные линии). Верхняя пара кривых — B-компонента, средняя пара — R-компонента, нижняя пара — G-компонента.

Рис. 4 для каждой из цветовой компонент исходного и адаптированного изображений иллюстрирует вносимую JPEG-преобразованием среднеквадратичную погрешность яркости пикселей в зависимости от коэффициента сжатия. Графики для исходного изображения выполнены пунктиром, а для адаптированного представления — сплошной линией.

Как показывает эксперимент, максимальное снижение погрешности достигается при коэффициенте сжатия, при котором производилась адаптация изображения к JPEG-преобразованию. Снижение вносимой JPEG погрешности сохраняется также в окрестности указанного коэффициента, а для R-компоненты — во всем рассмотренном диапазоне коэффициентов сжатия.

## 5. Заключение

В результате описанных экспериментов мы установили, что предложенная в [6] детерминированная оценка количества информации согласуется с классической вероятностной [3] и на примере изображений убедились также в способности виртуальной памяти сигнала адаптироваться к возмущению при циклическом восстановлении в ней информации исходного изображения.

Следует подчеркнуть, что модель сигнала с виртуальной памятью применима не только к изображениям, но и к аудиосигналам, а также сигналам иной природы. В качестве возмущения необязательно рассматривать JPEG-преобразование, а в качестве сообщения — информацию, извлеченную из сигнала. Сообщение может быть задано любым, а возмущением может служить любое доступное воздействие на сигнал.

В качестве воздействия может рассматриваться, например, исполняемый модуль программы, которая встраивает в сигнал сообщение «свой» для опознания подвижного объекта. Если в условиях информационного противоборства оказывается доступным модуль, встраивающий сообщение «свой» противоположной стороны, то имеет смысл маскировать этим сообщением собственные позывные, встраиваемые в итеративной процедуре поочередно со встраиванием маскирующего сообщения.

Другим возможным приложением модели [6] является подавление систематических помех, вносимых каналом связи. Подобные помехи можно рассматривать в качестве возмущения и повысить робастность встраивания сообщения, если при обмене сообщениями по каналу связи не генерировать сигналы со встроенными сообщениями, а перезаписывать их в виртуальной памяти сигнала, который доходит до адресата, т. е. сигнала, формируемого под воздействием канала связи.

Наиболее интересным продолжением экспериментальных исследований модели сигнала с виртуальной памятью является изучение ее приложений в области фундаментальной проблемы передачи информации. Одной из проблем, которые возникают в практике передачи сигналов, является сохранение качества сигнала с точки зрения автоматической обработки одновременно с сохранением качества его естественного восприятия. Например, при обработке изображений, сжатых JPEG-преобразованием, специалистам по автоматической обработке нередко приходится преодолевать эффекты аппроксимации изображения блоками  $8 \times 8$ , которые нарушают результаты обработки. Вариантом решения проблемы является разделение информации изображения на две компоненты, обеспечивающие его зрительное восстановление при сохранении представления в ограниченном числе градаций яркости. Поскольку графические изображения с ограниченным числом градаций эффективно сжимаются без потерь, они могут передаваться вместе с сигналом, сжатым с потерями, без снижения общего коэффициента сжатия и обратимо встраиваться при приеме в искаженный сигнал, что является предметом текущих экспериментальных исследований.

## Литература

1. *Полонников Р. И.* Основные концепции общей теории информации / Под ред. Р. М. Юсупова. СПб.: Наука, 2006. 204 с.
2. *Кузьмин И. В., Кедрус В. А.* Основы теории информации и кодирования. Киев.: Выща шк., 1986. 168 с.
3. *Шеннон К. Э.* Работы по теории информации и кибернетике / Пер. с англ. М.: Инostr. лит., 1963. 829 с.
4. *Оков И. Н.* Аутентификация речевых сообщений и изображений в каналах связи / Под ред. В. Ф. Комаровича. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2006. 392 с.
5. Введение в криптографию / Под общ. ред. В. В. Яценко. М.: МЦНМО, 2000. 288 с.
6. *Харинов М. В.* Запоминание и адаптивная обработка цифровых изображений. / Под ред. Р. М. Юсупова. СПб.: Изд-во С.Петербург. ун-та, 2006. 138 с.
7. *Колмогоров А. Н.* Три подхода к определению понятия «Количество информации» // Проблемы передачи информации. 1965. Вып. 1, т. 1. С. 3–8.
8. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Том 1-2. 1200 с.