

Исследование ДИКМ с адаптивным экстраполятором при компрессии изображений

М.В. Гашников

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, д. 34, Самара, Россия

Аннотация

Исследуется метод компрессии изображений на основе дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ) с адаптивным экстраполятором, автоматически приспособляющимся к локальным особенностям контуров (границ) на изображении. Исследуется вопрос о негативном влиянии квантования на результат оптимизации адаптивного экстраполятора. Экспериментально показывается, что, несмотря на это влияние, адаптивный экстраполятор имеет преимущество над прототипами. Также проводится экспериментальное исследование рассматриваемого метода в целом, проводится сравнение с методом JPEG по максимальной погрешности на полутоновом Ватерлоо-наборе реальных изображений.

Ключевые слова: компрессия изображений; ДИКМ; экстраполяция; квантование; статистическое кодирование; коэффициент сжатия.

1. Введение

В настоящее время размер обрабатываемых изображений по-прежнему растёт быстрее, чем ёмкость запоминающих устройств. В первую очередь, это относится к мульти- и гиперспектральным изображениям [1]. Ввиду ограниченности доступных ресурсов, особенно остро эта проблема стоит для бортовых систем регистрации изображений, размещённых на спутниковых и других летательных аппаратах, в том числе атмосферных беспилотниках. В этих ситуациях использование компрессии является единственно возможным решением проблемы чрезмерно большого объёма данных, соответствующих изображениям.

К настоящему моменту разработано огромное количество методов компрессии изображений [2-6]. Фрактальные методы [7] имеют высокую эффективность (степень сжатия), но практически не используются из-за огромной вычислительной сложности и специфических искажений изображения в виде неестественных артефактов. Методы на основе вейвлет-преобразований [8], наиболее распространённым из которых является JPEG-2000 [9], являются, по мнению автора, наиболее предпочтительными в координатах «эффективность/сложность» и обладают наиболее широкой возможной областью применения. Похожими достоинствами обладают методы на основе двумерных дискретных ортогональных преобразований [10], прежде всего JPEG [11], который уступает [12] вейвлетным методам по эффективности, но существенно превосходит их по распространённости за счёт огромного количества находящихся в использовании программных и аппаратных средств. Однако, все упомянутые основанные на тех или иных преобразованиях методы компрессии являются довольно ресурсоёмкими, что затрудняет их использование в системах реального времени, в том числе бортовых системах. Кроме того, такие системы обычно предъявляют повышенные требования к управлению качеством компрессированных данных, что также является весьма проблематичным для упомянутых методов компрессии, прежде всего из-за трудностей управления погрешностью в пространстве трансформант (коэффициентов преобразования).

Таким образом, в ситуации ограниченности ресурсов и необходимости строгого контроля качества наиболее предпочтительными представляются методы компрессии изображений, не требующие использования каких-либо спектральных пространств и выполняющие всю обработку в пространственной области, что позволяет обеспечить низкую вычислительную сложность и реализовать управление качеством сжатой информации. К таким методам можно отнести дифференциальные (разностные) методы компрессии [2-3], осуществляющие декорреляцию сигнала за счёт перехода к его разностному представлению. К этому классу можно отнести иерархические методы компрессии [13-14], обладающие рядом важных преимуществ при использовании в наземных комплексах обработки изображений. Однако при бортовой обработке иерархичность этих методов не даёт особых преимуществ, но увеличивает структурную сложность алгоритмов. Поэтому, по мнению автора, для бортовых систем наиболее предпочтительными являются разностные методы, основанные на дифференциальной импульсно кодовой модуляции (ДИКМ) [2-3], область использования которых не ограничивается системами реального времени. Например, ДИКМ входит в качестве составного этапа в другие методы сжатия, например JPEG. Таким образом, задача исследования и повышения эффективности методов компрессии на основе ДИКМ по-прежнему актуальна.

ДИКМ-компрессия основана на экстраполяции (предсказании) отсчётов изображения и последующем кодировании разности между исходным и экстраполированным значениями сигнала. В работе [15] предложен метод компрессии на основе ДИКМ с адаптивным экстраполятором, оптимизация которого производится на основе критерия минимума модуля погрешности экстраполяции. Однако указанная работа не закрывает ряд важных вопросов, связанных с исследованием указанного метода компрессии. Прежде всего, не учтено влияние квантования на результат оптимизации параметров адаптивного экстраполятора. Кроме того, результаты исследования собственно экстраполятора не приведены, а вывод о его эффективности делается на основе исследования эффективности метода компрессии в целом. Настоящая работа имеет целью закрыть перечисленные пробелы в исследовании указанного

метода компрессии, сделать обоснованные выводы о его эффективности и выработать рекомендации по его использованию.

2. Компрессия изображений на основе дифференциальной импульсно-кодовой модуляции

Приведем краткое упрощённое описание метода компрессии изображения на основе ДИКМ. Пусть неотрицательные целочисленные отсчёты исходного цифрового изображения $x(m, n)$ обрабатывается построчно. Обозначим $\bar{x}(m, n)$ отсчёты декомпрессированного (восстановленного после компрессии) изображения и будем вычислять эти значения уже на этапе компрессии при обработке соответствующих отсчётов $x(m, n)$ для организации обратной связи. Для каждого отсчёта $x(m, n)$ будем вычислять его экстраполированное значение $\hat{x}(m, n)$ с помощью некоторого экстраполятора $P(\dots)$ на основе восстановленных значений $\bar{x}(m, n)$ уже обработанных отсчётов:

$$\hat{x}(m, n) = P\{\bar{x}(i, j) : i < m \text{ or } i = m \text{ and } j < n\}. \quad (1)$$

Затем из исходного значения отсчёта $x(m, n)$ вычитается экстраполированное значение $\hat{x}(m, n)$ для вычисления разностного сигнала $f(m, n)$, который затем подвергается квантованию $Q(\dots)$, результатом которого является квантованный разностный сигнал $\bar{f}(m, n)$, который подвергается кодированию и передаётся через канал связи либо направляется в файл архива. Квантованный сигнал $\bar{f}(m, n)$ при этом сразу используется для вычисления соответствующего восстановленного значения отсчёта $\bar{x}(m, n)$:

$$f(m, n) = x(m, n) - \hat{x}(m, n), \quad \bar{f}(m, n) = Q(f(m, n)), \quad \bar{x}(m, n) = \bar{f}(m, n) + \hat{x}(m, n). \quad (2)$$

Восстановленное значение отсчета $\bar{x}(m, n)$ используется для экстраполяции (1) следующего отсчета.

3. Экстраполяция при компрессии изображений на основе ДИКМ

Требование низкой вычислительной сложности вынуждает применять в ДИКМ только самые простые [16] экстраполяторы вида:

$$\hat{x}^{(0)}(m, n) = \bar{x}(m-1, n), \quad (3)$$

$$\hat{x}^{(1)}(m, n) = \frac{1}{2}(\bar{x}(m-1, n) + \bar{x}(m, n-1)), \quad (4)$$

$$\hat{x}^{(2)}(m, n) = \bar{x}(m, n-1). \quad (5)$$

Эти линейные экстраполяторы хуже всего работают на контурах (границах объектов). В качестве решения этой проблемы рассматриваются экстраполяторы, инвариантные к контурам, например экстраполятор Грехэма [3], инвариантный к вертикальным и горизонтальным контурам:

$$\hat{x}^G(m, n) = \begin{cases} \hat{x}^{(0)}(m, n), & \text{if } \lambda_m(m, n) < \lambda_n(m, n); \\ \hat{x}^{(2)}(m, n), & \text{if } \lambda_m(m, n) \geq \lambda_n(m, n), \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\lambda_m(m, n) = |\bar{x}(m, n-1) - \bar{x}(m-1, n-1)|, \quad \lambda_n(m, n) = |\bar{x}(m-1, n) - \bar{x}(m-1, n-1)|. \quad (7)$$

Идея этого экстраполятора основана на предположении, что меньшая из разностей (7) позволяет выявить направление контура в малой окрестности отсчёта изображения, а соотношение (6) обеспечивает экстраполяцию «вдоль» этого направления. Такой экстраполятор более точен на контурах, но на ровных участках проигрывает экстраполятору (4), который более устойчив к шумам за счёт усреднения. Достоинства «контурного» экстраполятора (6) и «усредняющего» экстраполятора (4) совмещает адаптивный экстраполятор:

$$\hat{x}^A(m,n) = \begin{cases} \hat{x}^{(0)}(m,n), & \text{if } \lambda(m,n) < \lambda^{(-)}; \\ \hat{x}^{(1)}(m,n), & \text{if } \lambda^{(-)} \leq \lambda(m,n) \leq \lambda^{(+)}; \\ \hat{x}^{(2)}(m,n), & \text{if } \lambda^{(+)} < \lambda(m,n), \end{cases} \quad (8)$$

где $\lambda(m,n)$ – «признак направления контура»:

$$\lambda(m,n) = \lambda_m(m,n) - \lambda_n(m,n), \quad (9)$$

а $\lambda^{(-)}, \lambda^{(+)}$ – параметры адаптивного экстраполятора, которые выбираются в диапазонах:

$$-x_{\max} \leq \lambda^{(-)} \leq 0 \leq \lambda^{(+)} \leq x_{\max}, \quad (10)$$

где x_{\max} – максимальная яркость на изображении. Если признак (9) близок к нулю (текущий отсчёт находится на ровном участке), то используется усредняющий экстраполятор (4), если же признак (9) имеет большое по модулю значение, то происходит экстраполяция «вдоль контура» аналогично тому, как это делает экстраполятор (6). Выбор параметров $\lambda^{(-)}, \lambda^{(+)}$ позволяет экстраполятору адаптироваться к особенностям каждого конкретного изображения: если контуров на изображении мало, то параметры $\lambda^{(-)}, \lambda^{(+)}$ устанавливаются далеко от нуля, если же вертикальных и/или горизонтальных контуров много, то соответствующий параметр должен иметь большое по модулю значение.

Параметры $\lambda^{(+)}, \lambda^{(-)}$ автоматически вычисляются перед собственно ДИКМ-обработкой для каждого конкретного изображения процедурой оптимизации адаптивного экстраполятора и помещаются в сжатые данные, т.к. они необходимы также и при декомпрессии.

4. Оптимизация адаптивного экстраполятора при компрессии изображений на основе ДИКМ

Оптимизация адаптивного экстраполятора (поиск параметров $\lambda^{(+)}, \lambda^{(-)}$) производится исходя из минимизации суммы модулей погрешности экстраполяции по множеству $\omega = \{(m,n)\}$ координат всех отсчётов изображения:

$$\delta(\lambda^{(+)}, \lambda^{(-)}) = \sum_{(m,n) \in \omega} |x(m,n) - \hat{x}(m,n)| \rightarrow \min_{\lambda^{(+)}, \lambda^{(-)}}. \quad (11)$$

Погрешность (11) может быть разбита на три составные части, соответствующие различным диапазонам «признака направления контура» (9):

$$\delta(\lambda^{(+)}, \lambda^{(-)}) = \delta^{(-)}(\lambda^{(-)}) + \delta^{(0)} + \delta^{(+)}(\lambda^{(+)}) \quad (12)$$

где

$$\delta^{(-)}(\lambda^{(-)}) = \sum_{(m,n) \in \omega^{(-)}} |x(m,n) - \hat{x}(m,n)|, \quad \delta^{(0)} = \sum_{(m,n) \in \omega^{(0)}} |x(m,n) - \hat{x}(m,n)|, \quad \delta^{(+)}(\lambda^{(+)}) = \sum_{(m,n) \in \omega^{(+)}} |x(m,n) - \hat{x}(m,n)|,$$

$$\omega = \omega^{(-)} \cup \omega^{(0)} \cup \omega^{(+)}, \quad \omega^{(-)} = \{(m,n) : \lambda(m,n) < 0\}, \quad \omega^{(0)} = \{(m,n) : \lambda(m,n) = 0\}, \quad \omega^{(+)} = \{(m,n) : \lambda(m,n) > 0\}.$$

В результате становится возможна декомпозиция двухпараметрической задачи оптимизации (11) на две однопараметрические задачи, которые решаются независимо друг от друга:

$$\lambda^{(+)} = \arg \min_{\lambda} \delta^{(+)}(\lambda), \quad \lambda^{(-)} = \arg \min_{\lambda} \delta^{(-)}(\lambda). \quad (13)$$

Для решения этих задач на предварительном проходе по изображению заполняется вспомогательная матрица

$$\Delta_{i,\lambda} = \sum_{(m,n) \in \omega(\lambda)} |x(m,n) - \hat{x}^{(i)}(m,n)|, \quad 0 \leq i \leq 2, \quad -x_{\max} \leq \lambda \leq x_{\max}, \quad (14)$$

каждый элемент которой содержит суммарную погрешность экстраполяторов номер i (3-5) для всех отсчётов, для которых значение признака (9) равно λ . По заполненной матрице (14) одномерный массив значений погрешности $\delta^{(+)}$ заполняется с помощью рекуррентной процедуры:

$$\delta^{(+)}(x_{\max}) = \sum_{\lambda=0}^{x_{\max}} \Delta_{1,x_{\max}}, \quad \delta^{(+)}(\lambda) = \delta^{(+)}(\lambda+1) + \Delta_{2,\lambda} - \Delta_{1,\lambda}, \quad 0 \leq \lambda < x_{\max}, \quad (15)$$

вычислительная сложность которой не зависит от размера изображения (массив $\delta^{(-)}$ заполняется аналогично). Оптимальное по критерию (11) значение $\lambda^{(+)}$ можно найти в этом массиве перебором, т.к. его длина всего $(x_{\max} + 1)$. Аналогичным образом вычисляется $\lambda^{(-)}$.

5. Квантование при компрессии изображений на основе ДИКМ

Для квантования в ДИКМ обычно используют шкалу Макса [5-6], которая обеспечивает минимальную относительную квадратичную погрешность

$$\varepsilon_{\text{отн}}^2 = \frac{\varepsilon^2}{D_x} = \frac{1}{MND_x} \sum_{(m,n) \in \omega} (x(m,n) - \bar{x}(m,n))^2 \quad (16)$$

между исходным изображением $x(m,n)$ и восстановленным (декомпрессированным) изображением $\bar{x}(m,n)$ при фиксированном количестве интервалов квантования (D_x - дисперсия изображения, MxN - размер изображения).

Если необходим более строгий контроль погрешности [17] из-за повышенных требований к качеству данных или уникальности этих данных, например при работе с данными дистанционного зондирования Земли (в том числе при компрессии гиперспектральных изображений [18-20]), то в ДИКМ можно использовать квантователь с равномерной шкалой [3], обеспечивающий управление максимальной погрешностью

$$\varepsilon_{\max} = \max_{(m,n) \in \omega} |x(m,n) - \bar{x}(m,n)|. \quad (17)$$

6. Влияние квантования на оптимизацию адаптивного экстраполятора

Следует отметить важный нюанс, имеющий место при оптимизации адаптивного экстраполятора. Описанную выше процедуру оптимизации адаптивного экстраполятора можно производить только при отсутствии квантования (при «выключенном» квантователе). При этом исходные $x(m,n)$ и восстановленные $\bar{x}(m,n)$ значения отсчётов изображения совпадают, разностный $f(m,n)$ и квантованный разностный $\bar{f}(m,n)$ сигналы также совпадают. Такой способ обработки является вынужденной мерой, так как «включение» квантователя на этапе оптимизации экстраполятора привело бы к невозможности вычисления восстановленных значений отсчётов, так как они, через цепочку преобразований, зависят от параметров экстраполятора $\lambda^{(+)}$, $\lambda^{(-)}$, которые на этом этапе ещё неизвестны.

Таким образом, общая схема ДИКМ-компрессии с адаптивным экстраполятором выглядит следующим образом. Сначала, для оптимизации экстраполятора, осуществляется предварительный проход по изображению с «выключенным» квантователем (т.е. с нулевой погрешностью). При этом происходит вычисление параметров экстраполятора. После этого, при повторном проходе по изображению, производится собственно ДИКМ-компрессия, при которой квантователь снова «включается», а для экстраполяции используются найденные на первом проходе параметры $\lambda^{(+)}$, $\lambda^{(-)}$.

В результате параметры экстраполятора, оптимальные по критерию (11) при нулевой погрешности, будут использоваться при компрессии с ненулевой погрешностью. В этой ситуации найденные параметры уже не будут оптимальны, и вопрос о том, насколько далеко от оптимума они находятся, нуждается в дополнительном исследовании, которое может быть только экспериментальным. Вычислительные эксперименты были проведены на так называемом наборе полутоновых изображений «Ватерлоо» [21], который традиционно используется для исследования методов компрессии. Типичные результаты показаны на рис. 1-2.

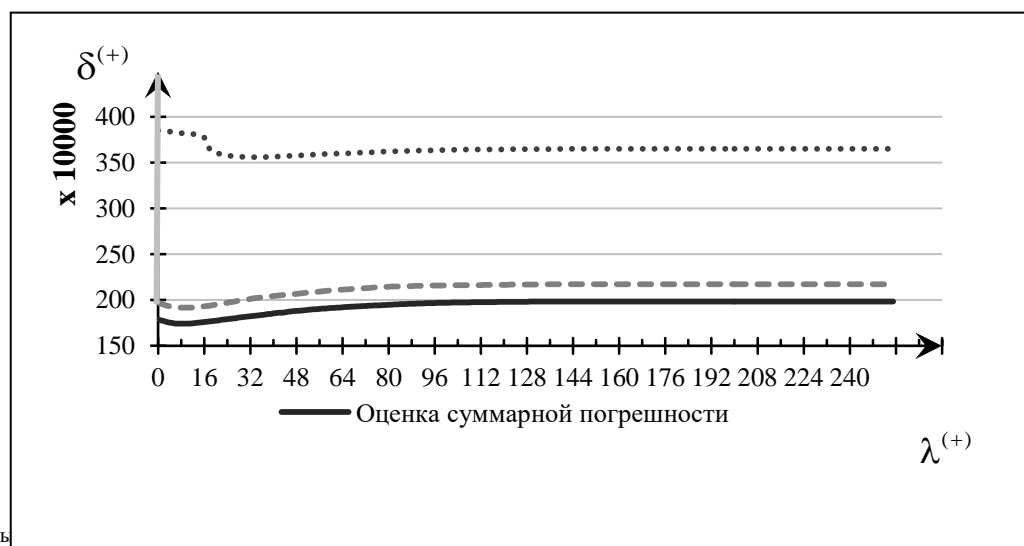


Рис. 1. Зависимость суммарной погрешности экстраполяции $\delta^{(+)}$, соответствующей положительным значениям признака направления контура (9), от параметра экстраполяции $\lambda^{(+)}$ при фиксированном $\lambda^{(-)} = -19$ (вертикальная линия показывает положение минимума оценки суммарной погрешности).

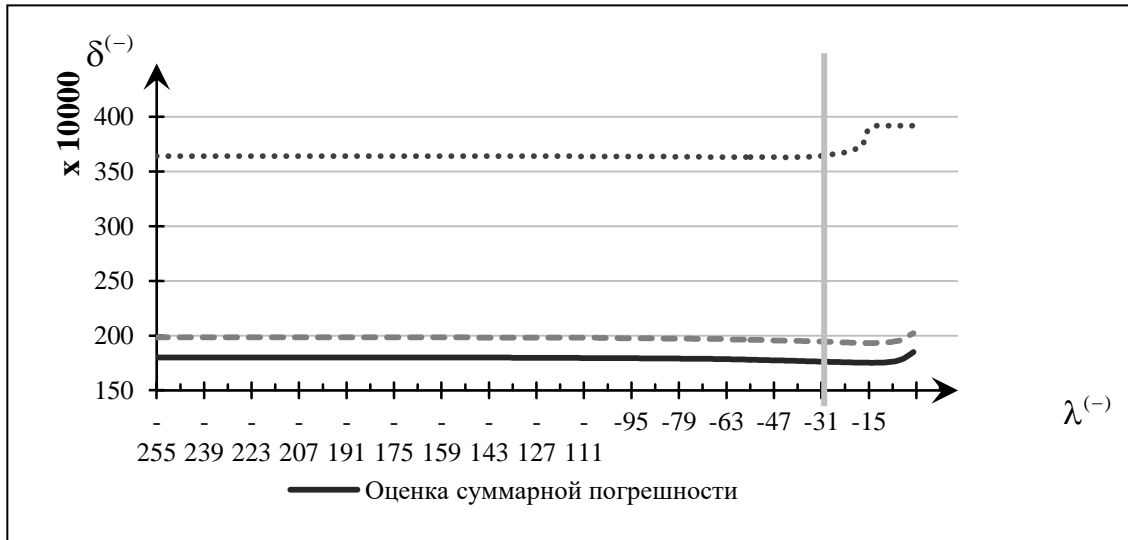


Рис. 2. Зависимость суммарной погрешности экстраполяции $\delta^{(-)}$, соответствующей отрицательным значениям признака направления контура (9), от параметра экстраполяции $\lambda^{(-)}$ при фиксированном $\lambda^{(+)} = 7$ (вертикальная линия показывает положение минимума оценки суммарной погрешности).

7. Исследование эффективности алгоритма адаптивной экстраполяции

Для оценки эффективности адаптивного экстраполятора с точки зрения компрессии он сравнивался с другими экстраполяторами по энтропии H_q квантованного разностного сигнала, которая является хорошей оценкой объема сжатых данных. Результаты показаны на рис 3-4.

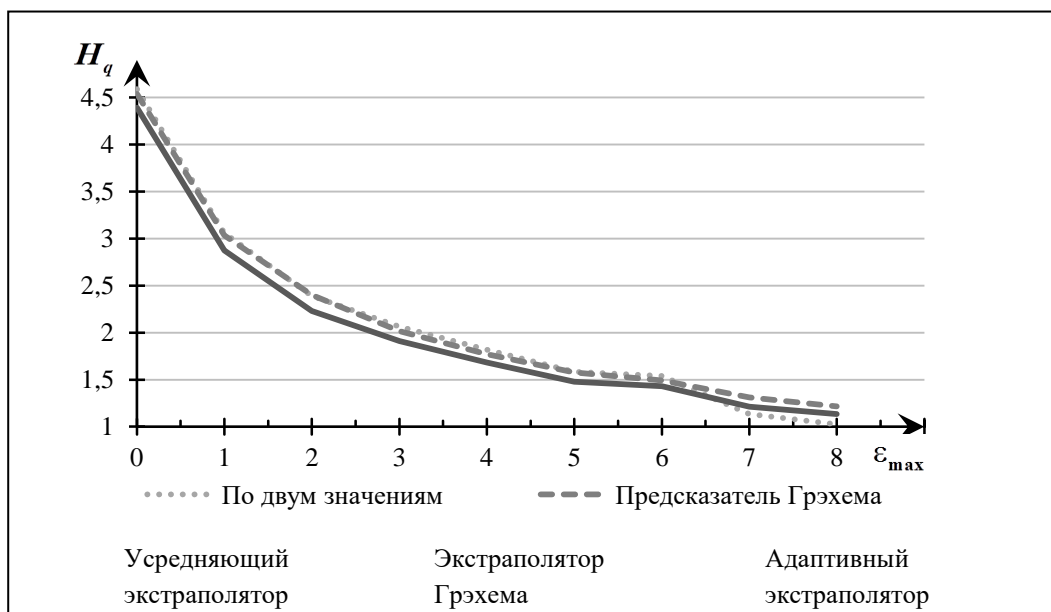


Рис. 3. Зависимость энтропии H_q квантованного разностного сигнала от максимальной погрешности ϵ_{\max} при использовании равномерной шкалы квантования.

Выводы:

1. Адаптивный экстраполятор имеет преимущество над прототипами по энтропии квантованного сигнала.
2. Следовательно, описанное в предыдущем разделе негативное влияние квантователя не имеет определяющего значения (по крайней мере, при малых погрешностях).

3. С ростом максимальной погрешности негативное влияние квантователя на эффективность адаптивного экстраполятора увеличивается. При максимальной погрешности больше шести он теряет преимущество.

8. Экспериментальное исследование ДИКМ с адаптивным экстраполятором при компрессии изображений

Для оценки эффективности метода компрессии изображений на основе ДИКМ с адаптивным экстраполятором производилось его сравнение с JPEG в координатах «погрешность – коэффициент сжатия» на наборе изображений «Ватерлоо» [21], который традиционно используется для сравнения методов компрессии. Полученные результаты, усреднённые по всем изображениям набора, показаны на рис. 5. Результаты экспериментов демонстрируют существенный выигрыш (до двух раз) ДИКМ с адаптивным экстраполятором у метода JPEG по максимальной погрешности.

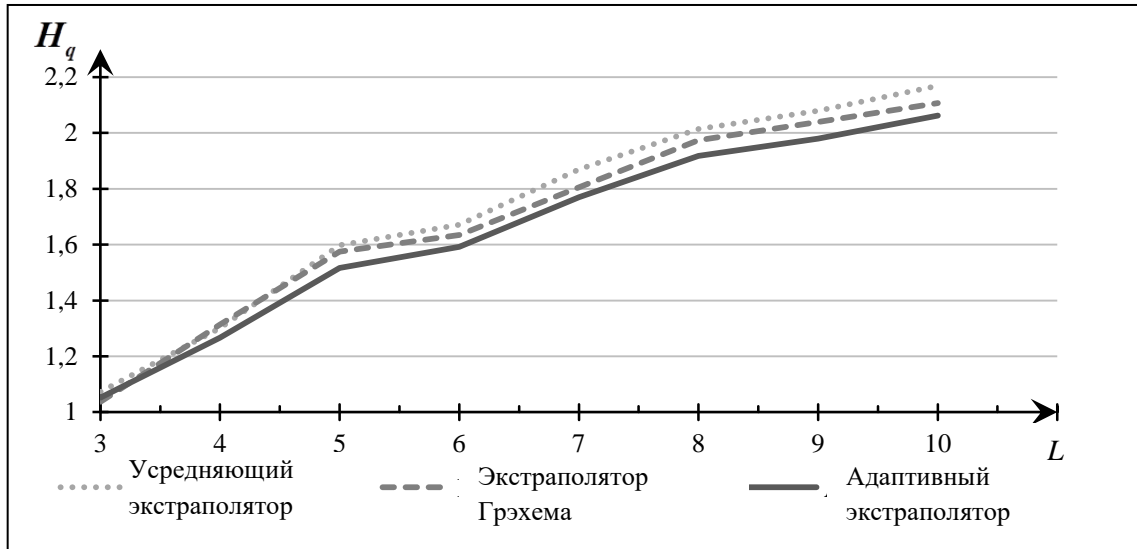


Рис. 4. Зависимость энтропии H_q квантованного разностного сигнала от количества квантованных уровней L при использовании шкалы квантования Макса.



Рис. 5. Зависимость максимальной погрешности ϵ_{max} от коэффициента сжатия $K_{сж}$ при сравнении «ДИКМ с адаптивным экстраполятором» с методом компрессии JPEG.

9. Заключение

Описано и экспериментально подтверждено существенное влияние квантования на оптимизацию параметров адаптивного экстраполятора. Экспериментально показано, что, несмотря указанное негативное влияние квантования, адаптивный экстраполятор в рамках метода компрессии ДИКМ всё равно имеет преимущество над прототипами при малой погрешности. Также проведены вычислительные эксперименты по исследованию эффективности метода компрессии на основе ДИКМ с адаптивным экстраполятором и показано его преимущество над методом компрессии JPEG по максимальной погрешности. Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод о перспективности использования рассмотренного метода в системах компрессии и передачи изображений.

Дальнейшие исследования будут направлены на исключение необходимости в предварительном проходе по изображению при оптимизации адаптивного экстраполятора, что необходимо для упрощения использования

рассматриваемого метода компрессии изображений для систем реального времени, в том числе бортовых систем. Возможность такого усовершенствования основана на допустимости оценки распределения погрешностей экстраполяции в процессе собственно ДИКМ-обработки. Вопрос о качестве такой «последовательно уточняемой» оценки требует дополнительного исследования.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-31-00014) "Создание лаборатории прорывных технологий дистанционного зондирования Земли".

Литература

- [1] Chang, C. *Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis* / C. Chang. – Wiley Press, 2013. – 1164 p.
- [2] Sayood, K. *Introduction to Data Compression*. / K. Sayood. The Morgan Kaufmann Series in Multimedia Information and Systems, 4ed. – 2012. – 743 p.
- [3] Salomon, D. *Data Compression. The Complete Reference* / D. Salomon. – Springer-Verlag, 4ed, 2007. – 1118 p.
- [4] Ватолин, Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 384 с.
- [5] Woods, E. *Digital Image Processing* / E. Woods, R. Gonzalez // Prentice Hall, 3ed, 2007. –976 p.
- [6] Pratt, W. *Digital image processing* / W. Pratt. – Wiley, 4ed, 2007. – 807 p.
- [7] Woon, W.M. Achieving high data compression of self-similar satellite images using fractal. / W.M. Woon, A.T.S. Ho, T. Yu; S.C. Tam, S.C. Tan, L.T. Yap. // *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. – 2000. – P. 609-611
- [8] Gupta, V. Enhanced Image Compression Using Wavelets. / V. Gupta, V. Sharma, A. Kumar. // *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*. – 2014. – Vol. 2(5). – P. 55-62.
- [9] Li, J. *Image Compression: The Mathematics of JPEG-2000* / J. Li // *Modern Signal Processing*. — MSRI Publications. – 2003. — V. 46. — P. 185-221.
- [10] Plonka, G.; Tasche, M. Fast and numerically stable algorithms for discrete cosine transforms / G. Plonka, M. Tasche // *Linear Algebra and its Applications*. – 2005. – Vol. 394(1). – P. 309–345.
- [11] Wallace, G. The JPEG Still Picture Compression Standard / G. Wallace // *Communications of the ACM*. – 1991. – Vol. 34(4). – P. 30-44.
- [12] Ebrahimi, F. JPEG vs. JPEG2000: An Objective Comparison of Image Encoding Quality / F. Ebrahimi, M. Chamik, S. Winkler // *Proceedings of SPIE Applications of Digital Image Processing XXVII*. – 2004. – Vol. 5558. – P. 300–308.
- [13] Gashnikov, M. Interpolation for hyperspectral images compression / M.V. Gashnikov // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2016. – Vol. 1638. – P. 327-333.
- [14] Gashnikov, M. Development and Investigation of a Hierarchical Compression Algorithm for Storing Hyperspectral Images / M.V. Gashnikov, N.I. Glumov // *Optical Memory and Neural Networks*. – Allerton Press. – 2016. – Vol. 25(3). – P. 168–179.
- [15] Гашников, М.В., Адаптивный параметризованный предсказатель для дифференциальной компрессии изображений / М.В. Гашников, С.А. Муллина // материалы Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ). – Самара, 2015. – С. 64-67.
- [16] Ефимов, В.М. Оценка эффективности иерархических и построчных алгоритмов сжатия полутоновых изображений без потерь / В.М.Ефимов, А.Н.Колесников // Тезисы докладов III конференции “Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии”. – Нижний Новгород, 1997. – Часть I. – С. 157-161.
- [17] Lin, S. *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*, second edition / S. Lin, D. Costello. – New Jersey: Prentice-Hall, inc. Englewood Cliffs, 2004. – 1260 p.
- [18] Chang, C. *Hyperspectral data exploitation: theory and applications* / C. Chang. – Wiley-Interscience, 2007. – 440 p.
- [19] Gashnikov, M.V. Hierarchical GRID Interpolation under Hyperspectral Images Compression / M.V.Gashnikov, N.I.Glumov // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – Allerton Press. – 2014. Vol. 23(4). – P. 246-253.
- [20] Borengasser, M. *Hyperspectral Remote Sensing – Principles and Applications* / M. Borengasser, W. Hungate, R. Watkins. – CRC Press, 2004. – 128 p.
- [21] Waterloo Grey Set. University of Waterloo Fractal coding and analysis group: Mayer Gregory Image Repository. [Electronic resource]. — Access mode: <http://links.uwaterloo.ca/Repository.htm> (19.12.2016).
- [22] Гашников, М.В. Бортовая обработка гиперспектральных данных в системах дистанционного зондирования Земли на основе иерархической компрессии / М.В. Гашников, Н.И. Глумов // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40(4). – С. 543-551.