

УДК 621.373.826:772.99

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ АНТИОТРАЖАЮЩЮЮ АЛМАЗНУЮ СТРУКТУРУ

© 1999 Д.Л. Головашкин, В.С. Павельев, В.А. Сойфер

Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

Представлены результаты использования разностного метода решения уравнений Максвелла для электромагнитной волны типа Н, проведен анализ прохождения этой волны через границу алмазной пластины с нанесенным антиотражающим субволновым микрорельефом. Результат численного анализа находится в хорошем согласовании с результатами натурального исследования антиотражающих структур.

Введение

Достижения в области газофазного синтеза позволяют получать поликристаллические алмазные пленки (АП) с оптическими и теплофизическими свойствами, близкими к монокристаллам алмаза (теплопроводность @18-20 Вт/смЧК [1] и коэффициент поглощения @ $5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, показатель преломления $n=2,38-2,42$ для $\lambda=10,6 \text{ мкм}$). Значительный интерес к использованию подобных алмазных пластин толщиной до 1-2 мм и площадью до 100 см^2 в качестве выходных окон для CO_2 лазеров мощностью 10-20 кВт [2] обусловлен их более высокими порогами тепловой стабильности и разрушения, чем у традиционных материалов ИК оптики (ZnSe, KCl и др.). Однако задача создания более сложных оптических устройств оставалась нерешенной по двум основным причинам. Во-первых, механическая обработка АП с целью получения требуемого профиля затруд-

нена из-за высокой твердости алмаза. Во-вторых, относительно малая толщина алмазных пластин не позволяет получать традиционным способом оптические элементы с достаточной апертурой. В качестве альтернативы, в работах [3] предлагается использовать АП в качестве подложек дифракционных оптических элементов [4], фазовый рельеф которых формируется методом селективного лазерного травления, разработанного в Институте общей физики РАН. Другой проблемой являются относительно высокие потери энергии, связанные с френелевским отражением, что существенно при фокусировке излучения мощных технологических CO_2 -лазеров. Относительно высокий показатель преломления алмаза приводит к тому, что из-за потерь на отражение пропускание алмазной пластины на длине волны 10,6 мкм не превышает 71%. Поэтому, особую актуальность приобретает задача просветления АП.

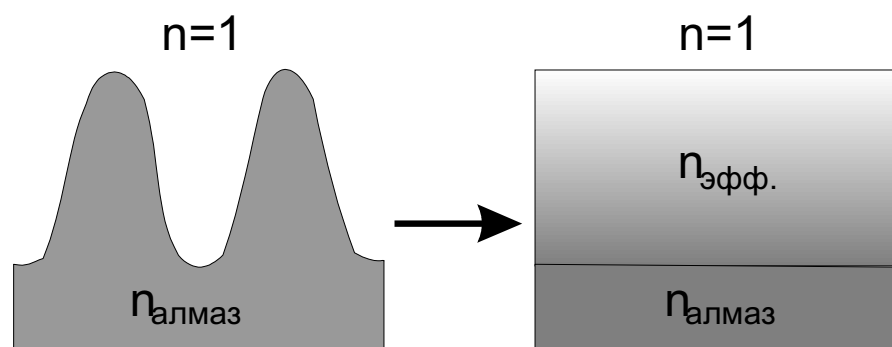


Рис. 1. Эквивалентная среда для рельефных субволновых решеток на поверхности алмазной пленки

Обычные пленочные антиотражающие покрытия значительно уступают алмазу по своим свойствам, что не позволяет использовать в полной мере уникальные свойства АП. В работах [5,6] на результатах натурального эксперимента продемонстрирована эффективность антиотражающих субволновых периодических микроструктур на поверхности алмазной пленки, созданных также методом селективного лазерного травления. Численный анализ работы антиотражающих структур в [5,6] проводился с помощью теории эффективных сред [7]. В рамках этой теории субволновая дифракционная структура рассматривается как градиентная среда с плавно меняющимся поперечным градиентным распределением показателя преломления (Рис. 1).

Однако, приближение теории эффективных сред не учитывает полностью реальных электромагнитных эффектов.

2. Численное моделирование с помощью разностного решения уравнений Максвелла

Рассмотрим распространение электромагнитной волны через поверхность с нанесенным дифракционным субволновым рельефом. В работе [8] представлена разностная схема для трехмерного уравнения Максвелла, записанного в системе СИ в декартовой системе координат. Так как дифракционный рельеф наносится в виде полос, то выбор декартовой системы координат с осью X, направленной параллельно полосам, позволяет построить следующую двумерную схему для волны типа H:

$$\begin{cases} H_z^{n+1} = \frac{h_x}{\mu_0 \mu} \frac{E_x^{n+1} - E_{x_{j-1}}^{n+1}}{h_y} + H_z; \\ E_x^{n+1} = \frac{h_x}{\epsilon_0 \epsilon} \left(\frac{H_{z_{j+1}} - H_z}{h_y} - \frac{H_{y_{k+1}} - H_y^{n+1}}{h_z} \right) + E_x; \\ H_y^{n+1} = -\frac{h_x}{\mu_0 \mu} \frac{E_x^{n+1} - E_{x_{k-1}}^{n+1}}{h_z} + H_y, \end{cases} \quad (1)$$

где H_y, H_z, E_x – соответствующие проекции векторов напряженности электрического и магнитного полей H и E в декартовой системе координат, $\epsilon_0, \epsilon, \mu_0, \mu$ – диэлектрические и магнитные проницаемости вакуума и среды, h_x, h_y, h_z – шаги дискретизации на сетке $w_{ht,hy,hz} = \{(y_j, z_k, t_n) \text{OD}\}$ в области $D = \{0 < y < L_y, 0 < z < L_z, 0 < t < L_t\}$, где j,k,n узлы сетки, причем $0 < j < N_y - 2, 0 < k < N_z - 2, 0 < n < N_t - 2$. Для простоты записи у значений полей отображены индексы, отличные от j,k,n. Краевые условия для E_x и H_y первого рода, для H_z второго рода. Полученная схема аппроксимирует краевую задачу с погрешностью аппроксимации $O(h_x, h_y, h_z)$. Найдя решение системы разностных уравнений (1) получаем искомое распределение электромагнитного поля в интересующей области.

Численные эксперименты, результаты которых приведены в Таблице 1, состояли в формировании волн типа H_{01} ($l=10.6$ мкм., с цугом в одну длину волны), падающих на границу раздела пластинка-воздух и моделировании дальнейшего распространения прошедших и отраженных волн. В работе [6] приведены результаты натурального исследования антиотражающей структуры с периодом 3 мкм и глубиной порядка 1.8 - 2.0 мкм, реали-

Таблица 1. Сравнение энергии отраженной волны при различных формах дифракционного рельефа

Номер численного эксперимента	Форма дифракционного рельефа	Диэлектрическая проницаемость пластинки (Ф/м)	доля отраженной энергии (%)
1	без дифракционного рельефа	5,6644	17,2
2	треугольник с базисом 4 мкм. и высотой 2,5 мкм.	5,6644	12,5
3	треугольник с базисом 3 мкм. и высотой 2,5 мкм.	5,76	9,65
4	треугольник с базисом 2 мкм. и высотой 2,5 мкм.	5,76	8,68

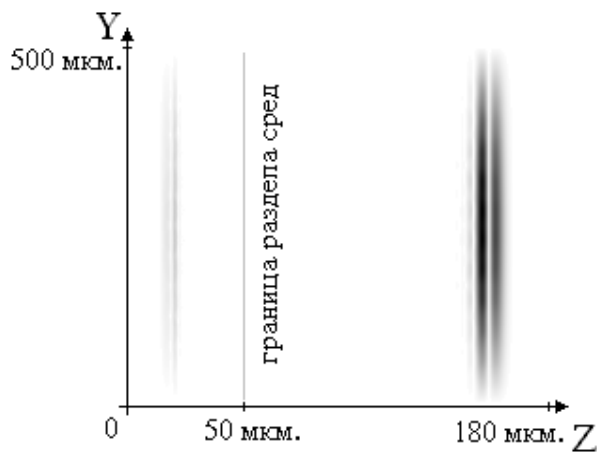


Рис. 2. Распределение модуля амплитуды электрической составляющей электромагнитного поля прошедшей и отраженной волны

зованной на алмазной пластине. Максимальное увеличение пропускания для алмазной пластины, обработанной с одной стороны, достигало »бё7%, что вполне согласуется с результатами, приведенными в (Таблице 1).

Параметры схемы (1) выбирались следующими : $L_y=500$ мкм., $L_z=180$ мкм., $L_t=8,1\text{Ч}10^{-14}$ с., $h_y=1/3$ мкм., $h_z=0,2$ мкм., $h_t=3,5\text{Ч}10^{-18}$ с. Энергия электромагнитного поля определялась [9] как

$$W = \frac{1}{2} \int_D (\epsilon_0 \epsilon |E|^2 + \mu_0 \mu |H|^2) dD.$$

На рис. 2 представлено разделение падающей волны (четвертый эксперимент) на прошедшую через границу раздела пластинка-воздух и отраженную от этой границы.

На рисунках (3), (4) показаны фрагменты формирующейся отраженной и прошед-

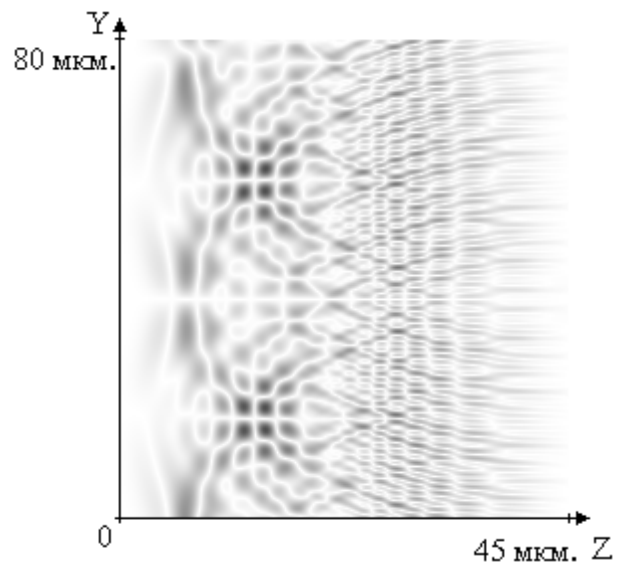


Рис. 3. Фрагмент распределения модуля амплитуды проекции H_z в отраженной волне

шей волны, на которых различимы волны типа Н высоких порядков, возникшие в дифракционном рельефе.

Заключение

В данной работе показана возможность использования разностного решения уравнений Максвелла для анализа работы антиотражающих алмазных субволновых структур. Результаты проведенного численного моделирования находятся в хорошем согласовании с результатами натуральных исследований, опубликованных в [5,6], и результатами численного анализа с помощью теории эффективных сред второго порядка [6,7]. Таким образом, разностное решение уравнение Максвел-

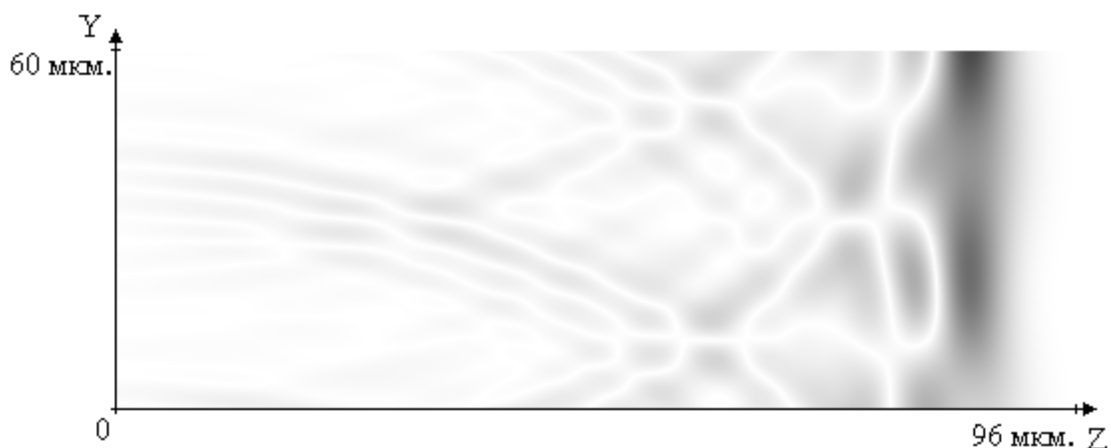


Рис. 4. Фрагмент распределения модуля амплитуды проекции H_z в прошедшей волне

ла впервые позволило провести моделирование алмазных антиотражающих структур и оценить их эффективность в рамках теории электромагнитного поля, а также провести анализ тонкой структуры отраженной электромагнитной волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V. Ralchenko, A. Vlasov, I. Vlasov, B. Zubov, A. Nikitin, A. Khomich*, SPIE Proc. 3484, Int. Conf., Tashkent, Uzbekistan, 1998
2. *Sussmann R.S., Brandon J.R., Coe S.E., Pickles C.S.J., Sweeney C.G., Wasenczuk A., Wort C.J.H., Dodge C.N.*, *Finer Points*, 10(2), 6, (1998).
3. *В.В. Кононенко, В.И. Конов, С.М. Пименов, А.М. Прохоров, В.С. Павельев, В.А. Сойфер*, *Квантовая электроника*, 26(1), 9-10, (1999).
4. *Сойфер В.А.*, Введение в дифракционную микрооптику, (Самара, 1996).
5. *Kononenko T.V., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Garnov S.V., Tischenko A.V., Prokhorov A.M., Khomich A.V.*, *Applied Physics A*, 68(1), 99-102, (1999).
6. *В.В. Кононенко, Т.В. Кононенко, В.И. Конов, С.М. Пименов, С.В. Гарнов, А.В. Тущенко, А.М. Прохоров, А.В. Хомич*, *Квантовая электроника*, 26(2), 158-162, (1999)
7. *Daniel H. Raguin, G. Michael Morris* Antireflection on structured surfaces for the infrared spectral region, *Applied Optics*, Vol. 32, N. 7, p.p. 1154-1167 (1993)
8. *Головашкин Д.Л.*, Разностная схема для уравнений Максвелла, Труды девятой межвузовской конференции, Самара, 1999, стр. 43-45.
9. *Никольский В.В., Никольская Т.И.*, *Электродинамика и распространение радиоволн*, М.:Наука, 1989.-544с.

SIMULATION OF THE ELECTROMAGNETICAL WAVE PROPAGATION THROUGH ANTIREFLECTING DIAMOND STRUCTURE

© 1999 D.L. Golovashkin, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer

Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Samara

Results of differential method application to solve Maxwell equations (H-type electromagnetic wave) are presented in this paper. Numerical analysis of electromagnetic wave propagation through diamond plate with anti-reflecting structure is implemented. Obtained computational results agree with the results of natural experiment.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОМПРЕССИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 1999 М.В. Гашников¹, Н.И. Глумов², В. В. Сергеев³

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет

² Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

³ Самарский филиал ЗАО «Совинформспутник»

В работе предложена информационная технология компрессии изображений, предназначенная для обработки видеoinформации в системах оперативного дистанционного зондирования. Центральное место разработанной технологии занимают метод сжатия на основе иерархической сеточной интерполяции и метод стабилизации скорости формирования кодируемого изображения, которые обеспечивают высокую степень компрессии и стабильную скорость потока выходной информации, малую и контролируруемую погрешность восстановления изображений.

Введение

Проблема квазиобратимого сжатия (компрессии/декомпрессии) цифровых изображений, формируемых системами сканирующих видеоизмерений земной поверхности и пересылаемых по цифровым каналам передачи данных, была сформулирована очень давно, но до сих пор остается актуальной. Специфика этой проблемы определяется следующими основными требованиями к используемым алгоритмам обработки информации:

1) высокая степень сжатия изображения, обусловленная большим объемом передаваемой информации и ограниченной пропускной способностью каналов связи;

2) высокое качество восстановления видеоданных (с контролируемой погрешностью), необходимое для решения сложных задач анализа, измерений, обнаружения и распознавания локальных объектов и т.д.;

3) низкая вычислительная сложность алгоритмов сжатия, предназначенных для работы в системе реального времени, т.е. реализуемых в темпе формирования видеoinформации;

4) стабилизация скорости формирования потока данных на выходе системы сжатия.

К настоящему времени известно несколько классов методов компрессии, удовлетворительно зарекомендовавших себя при решении различных задач формирования, передачи и хранения цифровых изображений.

Однако большинство из них не удовлетворяют всем перечисленным выше требованиям. Так, методы дифференциального кодирования (ДИКМ) [5], использующие разностные представления сигналов, не обеспечивают необходимую степень сжатия и качество восстановления. В методах кодирования с преобразованием [5] небольшие двумерные (обычно квадратные) блоки изображения подвергаются дискретному спектральному преобразованию (например, косинусному - алгоритм JPEG [9]), после чего производится выделение основных спектральных компонент и их кодирование. К этому же классу можно отнести группу методов, основанных на вейвлет-преобразованиях [8], активно развивающихся последнее время. Кодирование с преобразованием позволяет получить высокий коэффициент сжатия, универсально (мало чувствительно к статистике обрабатываемых изображений), удобно для цифровой реализации, поскольку существует большой набор быстрых алгоритмов. Тем не менее, при больших степенях сжатия, в восстановленных изображениях обычно наблюдаются характерные эффекты внутриблочного сглаживания, снижающие контраст мелких деталей, и сильно заметные скачки яркости на границах блоков. Кроме того, алгоритмы с преобразованием не позволяют контролировать ошибку восстановления и степень сжатия, что ведет к переменной скорости потока данных.

Фрактальные методы [6] компрессии/декомпрессии видеоданных обеспечивают очень высокий коэффициент сжатия за счет коренного изменения способа цифрового представления изображений: перехода от яркостных отсчетов к параметрам «сжимающих» аффинных преобразований фрагментов. Однако известные на сегодня алгоритмы этого класса требуют выполнения очень большого объема вычислений (особенно на этапе компрессии), что делает их пока практически не применимыми в системах реального времени.

Особое место среди методов сжатия занимают алгоритмы статистического кодирования [3]. Основное их достоинство заключается в реализации сжатия без потерь информации, т.е. безошибочном восстановлении кодированного сигнала. Однако сопутствующие недостатки - невысокая эффективность, переменная скорость формирования кодированных сообщений ограничивают непосредственное применение статистических алгоритмов для компрессии входного изображения. Тем не менее они успешно используются в составе других методов для кодирования преобразованного сигнала (спектральных компонент, ошибок интерполяции и т.д.).

В рамках настоящей работы рассматривается известный интерполяционный метод сжатия изображения, адаптированный для решения поставленной задачи. С целью возможности контроля качества восстановленной видеoinформации выбран критерий максимальной ошибки

$$\varepsilon_{\max} = \max_{n,m} |x(n,m) - \bar{x}(n,m)|, \quad (1)$$

где $x(n,m)$ - отсчеты исходного изображения, а $\bar{x}(n,m)$ - восстановленного. В отличие от обычно используемого критерия среднеквадратичной ошибки, который дает усредненное значение погрешностей и не учитывает локальные особенности поля яркости, критерий максимальной ошибки является более строгим показателем. Его применение оказывается целесообразным в случае формирования уникальных видеоданных при проведении дорогостоящих аэрокосмических экспериментов, наблюдении за экстраординар-

ными событиями, а также при многоцелевом использовании изображений, когда необходимо минимизировать возможные потери информации.

Данный метод сжатия в сочетании с модифицированными алгоритмами статистического кодирования и разработанным авторами методом стабилизации скорости сжатия и составляют предлагаемую информационную технологию компрессии видеoinформации, отвечающую всем перечисленным выше требованиям. Ниже подробно описываются алгоритмы сжатия и стабилизации скорости, занимающие центральное место разработанной информационной технологии.

Метод иерархической сеточной интерполяции

Метод иерархической сеточной интерполяции (Component Transformation with Pixel Interpolation - СТПИ), прототип которого описан в [7], основан на идее сокращения избыточности входных данных за счет использования прореженного изображения для аппроксимации промежуточных отсчетов. Рассмотрим следующее представление множества отсчетов исходного изображения X размера $M \times N$:

$$X = \bigcup_{r=0}^R X^{(r)},$$

$$X^{(r)} = \{x(n,m) : (n,m) \in I^{(r)}\},$$

$$I^{(r)} = \{(n \cdot 2^r, m \cdot 2^r)\} \cup \{(n \cdot 2^{r+1}, m \cdot 2^{r+1})\} \quad (2)$$

Здесь $X^{(r)}$ - r -й иерархический уровень (ИУ) представления изображения, который задается множеством индексов $I^{(r)}$, r - номер ИУ, R - номер старшего ИУ, а [...] - символ выделения целой части числа.

Легко видеть, что описанное представление не является избыточным и не увеличивает объем входных данных при сжатии. Кроме того, так как ИУ не пересекаются, то они могут быть закодированы последовательно, начиная со старшего. При этом закодированный и декодированный ИУ с большим шагом используется для аппроксимации ИУ с меньшим шагом. Заметим, что доля старшего ИУ в общем наборе данных невелика и вы-

бор процедуры кодирования для старшего ИУ не оказывает существенного влияния на степень сжатия (можно, например, передавать старший ИУ вообще без сжатия). Очевидно, что при таком подходе для сжатия каждого ИУ применяется один и тот же алгоритм, поэтому можно ограничиться описанием процедуры кодирования для ИУ с произвольным фиксированным номером $r < R$.

Процедура кодирования

1) Предсказание. Пусть к моменту кодирования отсчета $x(n, m)$ уже закодирован и декодирован некоторый набор отсчетов $\bar{x}(n, m)$. Тогда на их основе можно построить несколько различных процедур формирования предсказанного значения $\hat{x}(n, m)$ для отсчета $x(n, m)$ [2]. В качестве примера приведем одну из них:

$$\hat{x}_r(2n, 2m+1) = \langle \bar{x}_r(2n, 2m), \bar{x}_r(2n, 2m+2) \rangle,$$

$$\hat{x}_r(2n+1, 2m) = \langle \bar{x}_r(2n, 2m), \bar{x}_r(2n+2, 2m) \rangle,$$

$$\hat{x}_r(2n+1, 2m+1) = \left\langle \begin{array}{l} \bar{x}_r(2n+1, 2m), \\ \bar{x}_r(2n, 2m+1), \\ \bar{x}_r(2n+1, 2m+2), \\ \bar{x}_r(2n+2, 2m+1) \end{array} \right\rangle,$$

где

$$\hat{x}_r(n, m) = \hat{x}(n \cdot 2^r, m \cdot 2^r),$$

$$\bar{x}_r(n, m) = \bar{x}(n \cdot 2^r, m \cdot 2^r),$$

а $\langle \dots \rangle$ – символ усреднения с последующим округлением до целого.

2) Вычисление разностного сигнала:

$$f(n, m) = x(n, m) - \hat{x}(n, m), \quad (n, m) \in I^{(r)}.$$

3) Квантование разностного сигнала.

Вид шкалы квантования определяется принятым показателем качества. При использовании критерия максимальной ошибки (1) функция квантования приобретает вид:

$$q(n, m) = (f(n, m) + \varepsilon_{\max}) / (2\varepsilon_{\max} + 1). \quad (3)$$

Сжатие достигается за счет уменьшения разрядности или статистического кодирования сигнала $q(n, m)$. В данной работе использовался специально разработанный

адаптивный алгоритм статистического кодирования, основанный на совместном использовании методов Хаффмена [3] и кодирования длин серий [1]. Наиболее важной особенностью алгоритма является то, что он может обеспечивать степень сжатия лучшую, чем один бит на отсчет, что невозможно с помощью классического метода Хаффмена.

4) Восстановление: Для того, чтобы процедура предсказания работала одинаковым образом как при кодировании (сжатии) так и при декодировании данных, необходимо, чтобы предсказанное значение определялось на основе не исходных, а уже декодированных данных. Поэтому сразу после кодирования отсчета $x(n, m)$ производится восстановление его приближенного значения $\bar{x}(n, m)$. Очевидно, что для этого необходимо сначала вычислить восстановленное значение $\bar{f}(n, m)$ разностного сигнала:

$$\bar{f}(n, m) = q(n, m) \cdot (2\varepsilon_{\max} + 1),$$

а затем осуществить собственно восстановление полного сигнала:

$$\bar{x}(n, m) = \bar{f}(n, m) + \hat{x}(n, m), \quad (n, m) \in I^{(r)}.$$

На этом процедура кодирования произвольного уровня $\chi^{(r)}$ закончена.

Процедура декодирования

Процедура декодирования является обратной по отношению к описанной и состоит из этапов предсказания и восстановления, описанных выше.

Стабилизация скорости сжатия изображения

Описанный выше алгоритм сжатия двумерных данных (изображений) на основе иерархической сеточной интерполяции принадлежит к классу алгоритмов с контролируемой выходной погрешностью восстановления (по критерию максимальной ошибки) и это является его безусловным достоинством. Однако этот же факт порождает основной недостаток алгоритма - переменную скорость создания выходных сообщений, т.е. нестабильный во времени коэффициент сжатия. Данный недостаток ограничивает непосредственное применение алгоритма в системах

формирования и обработки изображений реального времени с фиксированной пропускной способностью эксплуатируемых каналов связи. Указанное препятствие обычно устраняется путем буферизации выходных данных (сжатого изображения) и управления параметрами алгоритма сжатия (в нашем случае - заданной максимальной ошибкой восстановления отсчетов) в зависимости от состояния буфера.

Пусть кодируемое изображение представляет собой бесконечную вертикальную полосу шириной в M отсчетов. Такой формат изображения делает целесообразным поблочную реализацию сжатия. При этом кодирование разных блоков размером $L \times M$ отсчетов (L - число строк в блоке) может осуществляться с различными управляющими параметрами, что приводит к отклонениям выходных показателей качества (степени сжатия и погрешности восстановления) от требуемых. Предлагаемая буферизация кодированных блоков должна по возможности гасить колебания погрешности и одновременно обеспечивать стабилизацию скорости выдачи закодированных данных в канал связи.

Построим математическую модель, дискретно описывающую во времени процесс буферизации видеoinформации, обрабатываемой поблочно. Пусть буферное запоминающее устройство имеет объем V_0 бит, к началу обработки K -го блока заполненный на $V(K-1)$ бит. За квант времени формируется с постоянной скоростью блок изображения объемом $DV = L M b^0$ бит, который кодируется с задаваемой максимальной ошибкой $\epsilon(K)$, обеспечивающей реальное сжатие блока $B(K)$ (бит/отсчет). За это же время в канал связи

передается информация объемом $\frac{B_0 \Delta V}{b^0}$ бит,

где B_0 - степень сжатия, соответствующая пропускной способности канала, b^0 - разрядность отсчетов несжатого изображения (бит/отсчет). К началу следующего кванта времени относительная заполненность буфера составит:

$$\begin{aligned} \bar{V}(K) &= \frac{V(K)}{V_0} = \\ &= \frac{1}{V_0} \left(V(K-1) + \frac{B(K)\Delta V}{b^0} - \frac{B_0\Delta V}{b^0} \right) = \\ &= \bar{V}(K-1) + \frac{B(K) - B_0}{k_v b^0} \end{aligned} \quad (4)$$

где $k_v = \frac{V_0}{\Delta V}$ - параметр буфера (отношение объема буфера к объему блока до сжатия).

Основная проблема заключается в определении при сжатии каждого блока управляющего параметра - ошибки $\epsilon(K)$. Задаваемая ошибка должна обеспечивать такую степень сжатия, при которой гарантируется условие отсутствия переполнения буфера $\bar{V}(K) < 1$. Рассмотрим несколько подходов к определению $\epsilon(K)$.

Метод I. Для всех кодируемых блоков изображения задается фиксированная ошибка

$$\epsilon(K) = \epsilon_{max}$$

Поскольку при постоянной ошибке различные блоки изображения сжимаются с различной степенью сжатия, то при ее выборе можно ориентироваться на наихудшую (в смысле сжатия) ситуацию на изображении. Другими словами, ошибка должна гарантировать для произвольного фрагмента степень сжатия не менее требуемой. При этом отпадает потребность в буферной памяти для хранения сжатых блоков, т.к. любой блок сжимается сильнее, чем это необходимо для передачи в канал связи.

Метод II. Ошибка на каждом шаге корректируется непосредственно в зависимости от заполненности буфера к моменту начала обработки K -го блока, например,

$$\epsilon(K) = \epsilon(K-1) + [(\bar{V}(K-1) - \bar{V}_p) a] \quad (5)$$

где $0 < \bar{V}_p < 1$ - пороговое значение, при превышении которого ошибка увеличивается, а степень сжатия уменьшается; a - экспериментально подбираемый параметр.

Метод III. Задаваемая максимальная

ошибка сжатия K -го блока определяется с учетом вычисляемых статистических характеристик блока изображения (например, дисперсии D_x и коэффициента корреляции ρ) и требуемой степени сжатия $\hat{B}(K)$:

$$\varepsilon(K) = f(D_x, \rho, \hat{B}(K)),$$

где $\hat{B}(K)$ определяется исходя из наличия свободной памяти в буфере:

$$\hat{B}(K) = B_0 + (\bar{V}_p - \bar{V}(K-1)) b^0 \frac{k_v}{k_s}, \quad (6)$$

$\bar{V}_p \approx 1$ - пороговое значение, обеспечивающее «запас прочности» по заполненности буфера,

$k_s \geq 1$ - коэффициент стабилизации, обеспечивающий более плавное изменение всех параметров при поблочном кодировании изображения.

Ниже предлагается конкретный метод расчета максимальной ошибки ε_{max} по требуемой степени сжатия \hat{B} , построенный в предположении изотропной экспоненциальной модели АКФ входного сигнала.

Предполагая достаточную эффективность метода статистического кодирования, в качестве оценки степени сжатия \hat{B} будем использовать величину \hat{H}_q энтропии квантованного разностного сигнала, предсказанную на основании коэффициента корреляции изображения ρ , дисперсии изображения D_x и ошибки ε_{max} . Исходя из (2), можно записать:

$$\hat{H}_q = \left(\hat{H}^{(R)} + 3 \sum_{r=1}^R 4^{r-1} \hat{H}^{(R-r)} \right) / 4^R$$

где $\hat{H}^{(r)}$ - предсказанное значение энтропии квантованного разностного сигнала на r -м ИУ. По определению энтропии:

$$\hat{H}^{(r)} = - \sum_{i=0}^{N_q-1} p_q^{(r)}(i) \log(p_q^{(r)}(i)),$$

где $p_q^{(r)}(i)$ - вероятность i -го уровня квантования разностного сигнала, а N_q - количество уровней квантования. В соответствии с известными рекомендациями [4] будем полагать, что распределение вероятностей неквантованного разностного сигнала на каждом ИУ является экспоненциальным. Тогда при использовании квантователя (3), вероятность i -го уровня квантования разностного сигнала может быть записана в виде:

где p_r - параметр упомянутого экспоненциального распределения, который связан с дисперсией $D^{(r)}$ разностного сигнала на r -м ИУ следующим образом:

$$p_q^{(r)}(i) = \sum_{k=i-(2\varepsilon_{max}+1)-\varepsilon_{max}}^{i-(2\varepsilon_{max}+1)+\varepsilon_{max}} ((1-p_r)/(1+p_r)) p_r^{|i|},$$

где p_r - параметр упомянутого экспоненциального распределения, который связан с дисперсией $D^{(r)}$ разностного сигнала на r -м ИУ следующим образом:

$$p_r = \left(2 \cdot D^{(r)} + 1 - \sqrt{2 \cdot D^{(r)} + 1} \right) / D^{(r)}.$$

В свою очередь можно доказать, что:

$$D^{(r)} = a_1 \cdot 2^r \ln(1/\rho) D_x + a_2 \varepsilon_{max}^2,$$

где a_1, a_2 - коэффициенты, которые определяются схемой предсказания.

Таким образом, получена зависимость $\hat{H}_q = \hat{H}_q(\rho, D_x, \varepsilon_{max})$, которая может быть заранее табулирована. В процессе кодирования в качестве искомого значения ошибки используется наименьшее значение ε_{max} , которое удовлетворяет неравенству:

$$\hat{H}_q(\rho, D_x, \varepsilon_{max}) < \hat{B}. \quad (7)$$

Итак, предлагаемый метод стабилизации с определением значения управляющего параметра (максимальной ошибки) алгоритма сжатия $\varepsilon(K)$ в K -ый квант времени требует:

- 1) вычисления статистических характеристик $D_x(K), \rho(K)$ для K -го блока изображения;
- 2) определения требуемой степени сжатия $\hat{B}(K)$ согласно (6);
- 3) подбор (по таблице) значения $\varepsilon(K)$, удовлетворяющего условию (7).

Данный метод является ключевым в разработанной информационной технологии компрессии изображений, общая схема которой представлена на рис.1. Применение метода стабилизации в сочетании с методом сжатия на основе иерархического сеточного интерполятора обеспечивает выполнение основных требований систем реального вре-

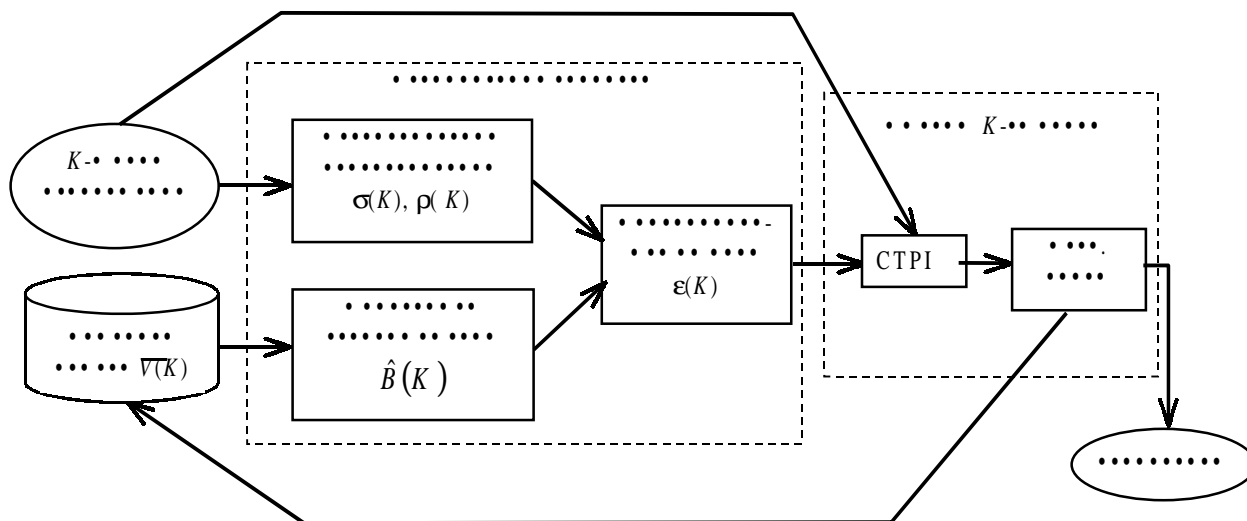


Рис. 1. Общая схема информационной технологии компрессии изображений

мени, что подтверждают экспериментальные исследования, результаты которых приведены ниже.

Экспериментальные исследования

Для имитационного моделирования процесса сжатия изображения со стабилизацией скорости выдачи кодированной видеoinформации были использованы крупноформатные аэрокосмические изображения земной поверхности. На рис.2а показан пример такого изображения (размером 10000×512 отсчетов), хорошо отражающего динамику изменения локальной информативности изображения на маршруте съемки. Измеренные по блокам размером 33×512 статистические характеристики ρ и $\sigma = \sqrt{D_x}$ приведены на рис. 2б.

При проведении экспериментальных исследований разработанной информационной технологии сжатия видеoinформации были поставлены и решены следующие задачи.

1) Сравнительный анализ различных методов сжатия.

С целью исследования эффективности сжатия видеoinформации методом на основе сеточной интерполяции были проведены исследования различных алгоритмов компрессии. Ниже представлены результаты сравнения предлагаемого метода с популярным методом JPEG. Для модулей разностей декодированных и исходных изображений были построены гистограммы распределения яркостей (рис. 3в), оценены максимальные (рис. 3а) и среднеквадратичные (рис. 3б) ошибки восстановления. Результаты исследований показали полное превосходство алгоритма STPI не только по критерию максимальной, но и по критерию среднеквадратичной ошибки.

Приведенные гистограммы наглядно демонстрируют принципиальное отличие предлагаемого алгоритма STPI, гарантирующего заданную максимальную ошибку, от алгоритмов с преобразованием, для которых

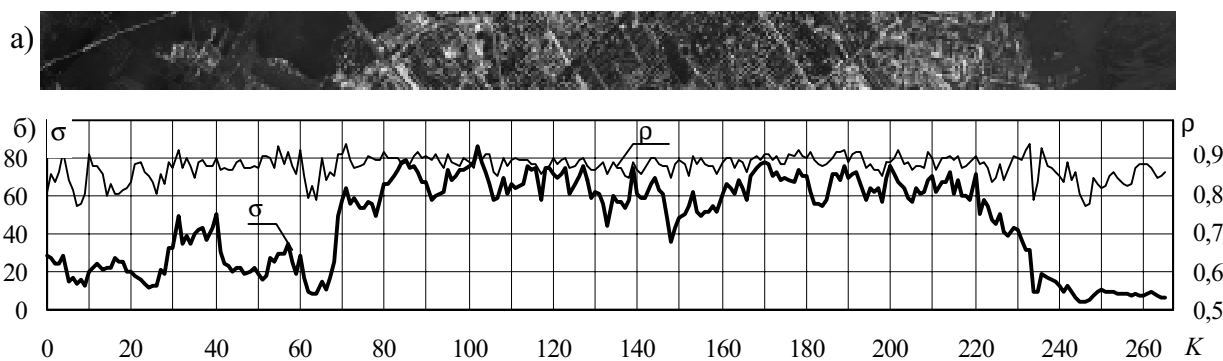


Рис. 2. Тестовое изображение и его статистические характеристики

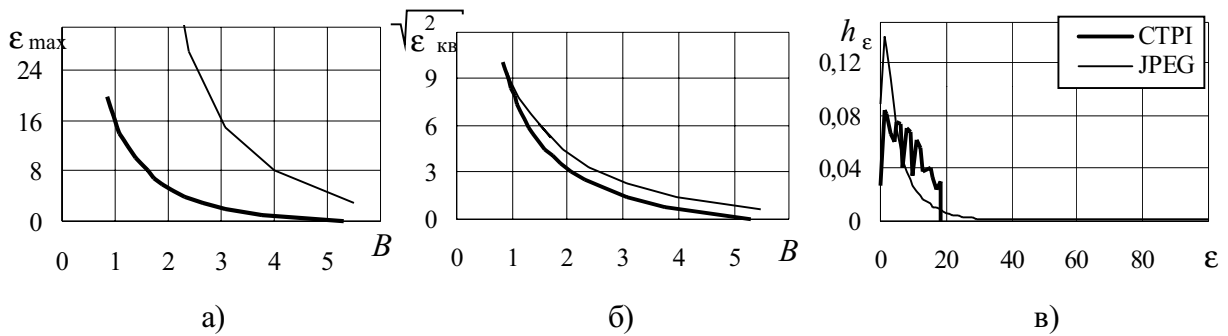


Рис.3. Зависимости ошибок от степени сжатия (бит/отсчет) и гистограммы распределений ошибок

впрямую не контролируются выходные показатели (степень сжатия и ошибка восстановления). Для разностных изображений (модулей разностей декодированных и исходных изображений) для алгоритма СТPI распределения яркости близки к равномерным, а для алгоритмов с преобразованием подобны экспоненциальным. Длинные «хвосты» распределений ошибок JPEG означают возможность сильных искажений и даже потерь на декодированном изображении мелких деталей размером до нескольких десятков пикселей.

2) *Исследование эффективности алгоритмов стабилизации скорости сжатия.*

С целью выбора оптимального алгоритма стабилизации скорости сжатия изображения были проведены экспериментальные исследования рассмотренных выше методов формирования управляющего параметра (максимальной ошибки восстановления (1)) алгоритмом сжатия СТPI. При исследовании контролировалось заполнение буферной памяти согласно математической модели (4). В качестве критериев качества использовалась усредненная (по блокам) максимальная ошибка $E\{\epsilon(K)\}$ восстановления. Все эксперименты выполнены для наиболее типичных требуемых степеней сжатия $B_0 = 1$ бит/отсчет, 2 бит/отсчет.

Метод I. Вычислительный эксперимент показал, что при данном подходе нера-

ционально эксплуатируются технические ресурсы (буферная память, канал связи), велика опасность переполнения буфера при неверном прогнозе допустимой максимальной ошибки, чрезмерна чувствительность к малым изменениям задаваемой ошибки (см. рис.4). При этом качество восстановления (по критерию $E\{\epsilon(K)\}$) является плохим в сравнении с другими алгоритмами стабилизации. Реальное применение данного способа задания управляющего параметра возможно только при большом объеме буферной памяти, а также при точном прогнозе управляющего параметра, что делает алгоритм практически непригодным для сжатия непрерывно поступающих видеоданных в системе реального времени.

Метод II. Большой интерес представляет формирование управляющего параметра в зависимости от относительной заполненности буфера согласно (5). Проведенные экспериментальные исследования (при варьировании коэффициента в пределах $2,5 \leq a \leq 20$, параметре буфера $k_v = 2$, $\bar{V}_p = 0,5$) показали, что хотя параметр сжатия адаптивно настраивается в зависимости от состояния буфера, метод в целом можно охарактеризовать как недостаточно стабильный. Главной причиной, по которой метод не может быть рекомендован для реальной эксплуатации, явля-

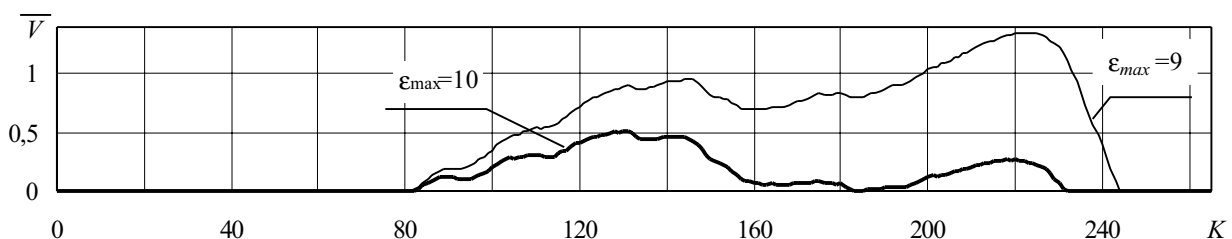


Рис. 4. Результаты моделирования метода I стабилизации ($B_0 = 2$)

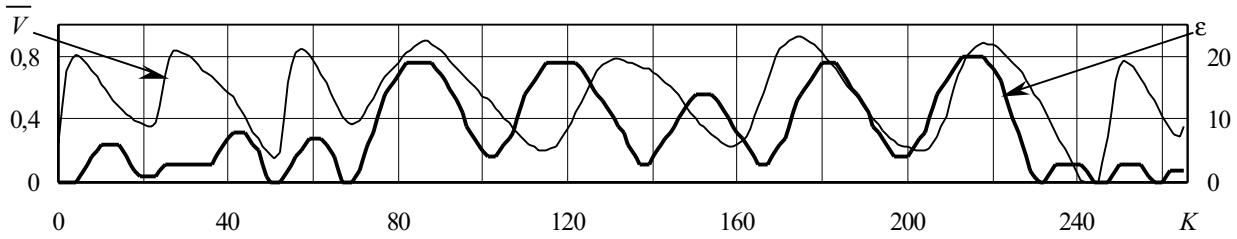


Рис. 5. Результаты моделирования метода II стабилизации ($B_0=2, a=10$)

ется пульсирующий характер зависимостей $\bar{V}(K), \epsilon(K)$ (см. рис.5), приводящий к неприемлемому качеству выходной видеoinформации, резко и многократно изменяющемуся в пределах одного маршрута съемки.

Метод III. Наиболее перспективным представляется метод формирования заданной ошибки на основе анализа статистических характеристик кодируемого блока. Результаты моделирования метода показывают достаточно высокую эффективность и устойчивость. Большую роль при моделировании по формулам (4, 6) играет коэффициент стабилизации k_s , позволяющий смягчить последствия прохождения высокоинформативных участков изображения и получить лучшие показатели качества (см. рис. 6, 7а). Влияние параметра буфера k_v (при $L=33$ и оптимальном k_s) и числа строк в блоке L (при $k_v=1$) на качество восстановления отражено на рис.7б, 7в. Рост значения k_v , соответствующий

увеличению размеров памяти, приводит к некоторому улучшению качества (см. рис. 7б). Однако, наращивание памяти, если оно возможно, оказывается более целесообразным использовать на увеличение размера кодируемых блоков (см. рис. 7в).

Поставленные вычислительные эксперименты не дают окончательных рекомендаций по выбору конкретных значений параметров метода стабилизации. Они возможны лишь при выполнении следующих условий:

- 1) точного задания ограничений, обусловленных техническими ресурсами;
- 2) решению весьма трудоемкой задачи оптимизации в многомерном пространстве параметров (k_s, k_v, L, \bar{V}_p) с использованием большого набора реальных сюжетов.

Однако изложенные выше результаты проведенных экспериментов позволяют провести сравнительный анализ различных алгоритмов стабилизации и наметить пути до-

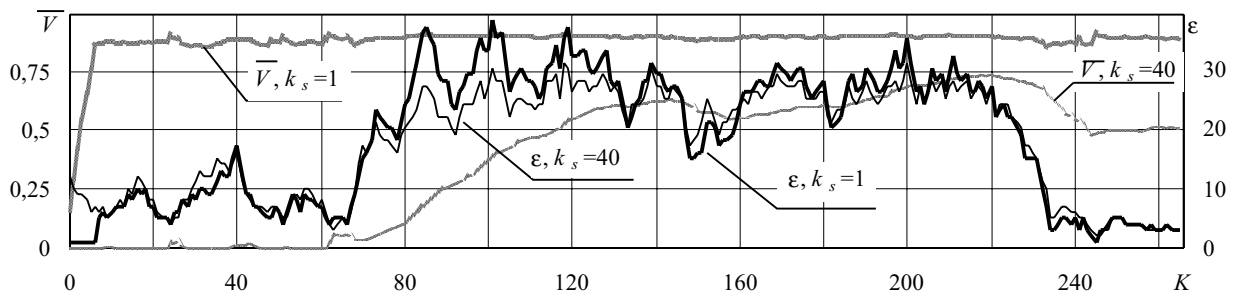


Рис. 6. Результаты моделирования метода IV стабилизации ($B_0=1$ бит/отсчет)

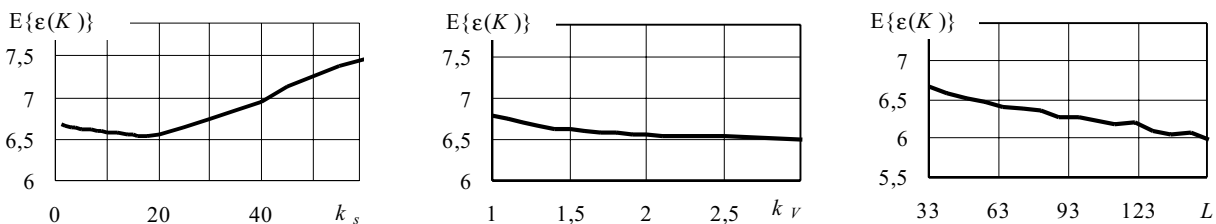


Рис. 7. Результаты исследования влияния параметров стабилизации

стижения наилучших показателей их качества.

Итак, результаты проведенного моделирования показывают, что для достаточно точного прогноза ошибки $\varepsilon(K)$, обеспечивающей требуемую степень сжатия на текущем блоке и стабильную скорость формирования сжатой видеоинформации в целом, нельзя опираться лишь на текущее состояние буфера и значения параметров сжатия на предыдущих шагах. Необходимо учитывать статистические свойства самого кодируемого в данный момент блока изображения. Только в этом случае алгоритм сжатия данных будет легко адаптироваться к любой, самой неблагоприятной (в смысле возможной степени сжатия при приемлемом качестве) ситуации на маршруте съемки, не выходя при этом из ограничений, обусловленных техническими ресурсами.

Заключение

Несмотря на существование большого числа методов сжатия, наиболее перспективным для применения в высокопроизводительных оптико-цифровых системах оперативного дистанционного зондирования представляется рассмотренный в данной работе метод на основе иерархической сеточной интерполяции. Разработанная информационная технология компрессии видеоинформации, центральное место в которой занимает алгоритм СТPI, удовлетворяет всем требованиям систем реального времени, обеспечивает высокую степень сжатия и стабильную скорость потока выходной инфор-

мации, невысокую и, что наиболее важно, контролируемую погрешность восстановления изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блох Э.Л. О передаче бинарной последовательности равномерным кодом // Проблемы передачи информации. - Вып. 5, 1960. - С. 12-22.
2. Ефимов В. М., Колесников А. Н. Оценка эффективности иерархических и построчных алгоритмов сжатия полутоновых изображений без потерь // Тезисы докладов III конференции «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии». - Нижний Новгород, 1997. - Часть I. - С. 157-161.
3. Новик Д. А. Эффективное кодирование. - М.: Энергия, 1965. - 236 с.
4. Прэнт У.К. Цифровая обработка изображений. - М.: Мир, 1982. - Кн.1. - 312 с.
5. Прэнт У.К. Цифровая обработка изображений. - М.: Мир, 1982. - Кн.2. - 480 с.
6. Barnsley M., Fractals everywhere.- Academic Press, Boston, MA, 1988, 396 p.
7. Bockstein I. M. A method of lossless image compression // Pattern Recognition and image analysis. - Vol. 3, №2, 1993. - pp. 92-98.
8. Mallat S.G. A Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell. - Vol. 11, №7, 1989. - pp. 674-693.
9. Skarbek. Methods of digital image archivization. Part three: Compressing images // Machine Graphics & Vision. - Vol. 2, №1, 1993. - pp. 53-86.

IMAGE COMPRESSION METHOD IN THE REAL-TIME SYSTEMS OF REMOTE SENSING

© 1999 M.V. Gashnikov¹, N.I. Glumov², V.V. Sergeyev³

¹ Samara State Aerospace University

² Image Processing System Institute of Russian Academy of Sciences, Samara

³ Samara Branch of JSC «Sovinformsputnik»

This paper proposes image compression method, which is intended for image processing in the real-time systems of remote sensing. The most important part of this method is a compression algorithm, which is based on hierarchical grid interpolation, and an algorithm for stabilization of coding image formation speed. These algorithms guarantee high compression rate and stable speed of the output information stream, and small controlled error during image recovering.