

МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА ПЕРФОРИРОВАННЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПОЗИЦИОННЫХ ЧИСЕЛ

*БАРАННИК В.В., ОСТРОУМОВ Б.В.,
ШИНКАРЕВ В.В.*

Показывается, что неравновесное позиционное кодирование обладает потенциальными возможностями для обеспечения степени сжатия дифференциального представления данных в случаях произвольного значения статистических характеристик изображений. Обосновывается, что дифференциальное представление изображения позволяет сформировать перфорированные неравновесные позиционные числа. Излагается подход относительно преобразования источника дифференцированных изображений в источник генерирования перфорированных неравновесных позиционных чисел.

1. Введение

Развитие информационно-интеллектуальных систем (ИИС) связано с вопросами сбора, обработки, передачи и анализа видеoinформационных моделей. От того, насколько оперативно и насколько достоверно обеспечивается получение наиболее полной видеoinформации, зависит процесс анализа и принятия решений [1, 2]. Требуется учитывать, что большинство функций, связанных с данными этапами преобразования информации, осуществляются автоматически, т.е. без участия человека. Это делает ключевым не только оперативность получения информации, но и ее достоверность [2 – 4]. Отсюда *цель исследований* заключается в обосновании и разработке подходов для повышения эффективности функционирования ИИС.

Для обеспечения данных условий интегрируются технологии компрессии изображений [1 – 4]. Однако их возможности не соответствуют требованиям современных процессов обработки видеоданных.

Эффективный подход относительно сокращения избыточности в реалистических изображениях без потери их качества базируется на построении дифференциального описания [5, 6]. В то же время данное направление наиболее эффективно при обработке высокоизбыточных изображений. Наоборот, его эффективность резко снижается при обработке насыщенных высокоинформативных в статистическом смысле изображений. Отсюда следует, что *научная задача* заключается в разработке модели источника видеoinформации, обеспечивающего повышение потенциальных возможностей относительно сокращения избыточности в низкорелированных изображениях за счет учета дополнительных закономерностей.

2. Построение модели источника неравномерных кодовых конструкций

Ключевым этапом обработки дифференцированного представления (ДП) является процесс кодирования. Компактное представление дифференциального описания видеоданных связано с построением методов кодирования, обеспечивающих сокращение избыточности в массивах (МДП). Особенность процесса устранения избыточности в МДП изображений состоит в учете неравномерности законов распределения вероятностей появления значений величин разностей.

Данная особенность учитывает наличие декорреляции между элементами МДП. Это позволяет организовывать обработку в режиме сжатия без потерь на основе устранения статистической избыточности. В этом случае требуется не искажая информации, содержащейся в МДП, найти способ закодировать его меньшим

числом бит. Для исключения избыточности в массивах дифференциального представления на основе использования такой их особенности предлагается осуществлять неравномерное кодирование элементов $h'_{k\ell}$. За счет неравномерных затрат количества разрядов на элементы МДП обеспечивается сокращение первоначального w цифрового объема массива дифференциального представления:

$$\eta_c^{(1)} = \frac{w}{w_c} = q_\ell q_c q_{bp} / \sum_{k=1}^{q_\ell} \sum_{\psi=1}^{q_c} q(h'_{k,\psi})_{bp} > 1,$$

где $\eta_c^{(1)}$ – коэффициент сжатия МДП за счет неравномерного распределения ее элементов; w, w_c – суммарное количество разрядов, отводимое на представление массива ДП до и после учета вероятностей их появления;

$$w = q_\ell q_c q_{bp}; \quad w_c = \sum_{k=1}^{q_\ell} \sum_{\psi=1}^{q_c} q(h'_{k,\psi})_{bp}, \quad (1)$$

q_{bp} – количество разрядов на элемент МДП без учета вероятности их появления; $q(h'_{k,\psi})_{bp}$ – количество разрядов на элемент $h'_{k,\psi}$ с учетом вероятности их появления в массиве ДП.

Условие (1) выполняется, поскольку $q(h'_{k,\psi})_{bp} \leq q_{bp}$.

Существуют различные подходы относительно реализации неравномерного распределения двоичных разрядов для элементов МДП, а именно кодирование методом Хаффмена и арифметическим кодированием [2, 4]. В этом случае на массивах дифференциального представления выявляются статистические характеристики, позволяющие оценить закон распределения частот появления значений элементов МДП.

С учетом затрат количества разрядов w' на представление таблиц частот появления элементов значение коэффициента сжатия $\eta_c^{(2)}$ оценивается по формуле

$$\eta_c^{(2)} = w / w_c^{(2)} = q_\ell q_c q_{bp} / (w_{ct} + w'),$$

где $\eta_c^{(2)}$ – коэффициент сжатия МДП за счет арифметического кодирования элементов массива ДП; w_{ct} – суммарное количество разрядов в арифметических кодовых конструкциях, сформированных для элементов МДП.

Нижней границей величины w_{ct} как длин арифметических кодов будет количество информации для соответствующей статистической модели. В качестве статистической модели выбирается модель Маркова первого порядка. Учитываются зависимости между двумя элементами. Энтропия такого источника (количество информации в одном элементе) для элементов МДП H_{ct} определяется по формуле [2]:

$$H_{ct} = - \sum_{\alpha_1=1}^{m_c} \sum_{\alpha_2=1}^{m_c} P(h'_{\alpha_1}; h'_{\alpha_2}) \log_2 P(h'_{\alpha_1} | h'_{\alpha_2}); \quad (2)$$

где m_c – мощность алфавита, составленного из элементов МДП, $m_c \leq n_\alpha$; $P(h'_{\alpha_1}; h'_{\alpha_2})$ – вероятность появления пары $(h'_{\alpha_1}; h'_{\alpha_2})$, вычисляется как произведение вероятностей $P(h'_{\alpha_1})$ появления элемента h'_{α_1} и $P(h'_{\alpha_2} | h'_{\alpha_1})$ появления элемента h'_{α_2} после h'_{α_1} .

С учетом нижней границы величины w_{ct} , задаваемой соотношением (2), максимальное значение коэффициента сжатия будет равно $\eta(\max)_c^{(2)}$:

$$\eta(\max)_c^{(2)} = q_{bp} / H_{ct}.$$

Рассмотрим оценку количества информации $H_{tr}^{(B)}$, приходящуюся на элемент массива дифференциального представления (ДП), в зависимости от закона распределения вероятностей появления элементов. В качестве такого закона предлагается выбрать нормальный закон распределения.

Рассмотрим последовательность $H^{(\ell)}$, состоящую из элементов $h'(k; \ell)$ массива дифференциального представления $H^{(\ell)} = \{h'(1; \ell), \dots, h'(n; \ell)\}$. Формула для нахождения величины энтропии $H_{tr}^{(B)}$ источника Бернулли, построенного на основе дифференцирования компонент одномерных трансформант, имеет вид

$$H_{tr}^{(B)} = 1,43 \ell \log_2 \sqrt{(2\pi e)^n} \prod_{k=1}^n \sigma(h')_{k\ell}^2 \Delta_n, \quad (3)$$

где Δ_n – нормированный корреляционный определитель матрицы $\|R(h'_{k\ell}; h'_{u\ell})\|$ порядка n ; D_{ku} – его алгебраическое дополнение; $R(h'_{k\ell}; h'_{u\ell})$ – нормированная ковариационная функция; σ_x^2 – величина дисперсии значений элементов исходных фрагментов изображений; $\sigma(h')_{k\ell}^2$ – дисперсия величины $h'_{k\ell}$.

Взаимосвязями между элементами дифференциального представления можно пренебречь. Это допустимо при обработке насыщенных реалистических изображений. Тогда для совместного распределения элементов МДП выполняется условие $\Delta_n = 1$. Выражение (3) примет вид

$$H_{tr}^{(B)} = \sum_{k=1}^n H_{k\ell}^{(B)} = \sum_{k=1}^n 1,43 \ell \log_2 \sigma(h')_{k\ell}^2 \sqrt{(2\pi e)},$$

где $H_{k\ell}^{(B)}$ – количество информации, приходящееся в среднем на $(k; \ell)$ -ю компоненту вектора $H^{(\ell)}$:

$$H_{k\ell}^{(B)} = 1,43 \ell \log_2 \sigma(h')_{k\ell}^2 \sqrt{(2\pi e)}.$$

С помощью полученного выражения для оценки количества информации, содержащийся в среднем на один элемент, можно определить верхнюю границу коэффициента сжатия $\eta(\max)_c^{(2)}$. Для этого используется следующее выражение:

$$\eta(\max)_c^{(2)} = \frac{Q_{bp}}{1,43 \log_2 \sigma(h')_{k\ell}^2 \sqrt{(2\pi e)}} \quad (4)$$

Проведем анализ недостатков рассмотренной технологии кодирования элементов массивов дифференциального представления, используя выражение (4).

Величина коэффициента сжатия $\eta(\max)_c^{(2)}$ зависит от:

1) степени неравномерности распределения вероятностей появления элементов МДП. Чем больше степень неравномерности, тем меньше количество разрядов, отводимое на представление арифметического кода. В то же время при обработке средне – и сильнонасыщенных реалистических изображений повышаются значения элементов в правой области МДП. Это приводит к уменьшению степени неравномерности распределения вероятностей, вплоть до появления мультимодальности и равномерности распределения. Следовательно, снижается коэффициент сжатия вплоть до увеличения объема исходного изображения;

2) статистических характеристик последовательностей элементов МДП. Однако в результате декорреляции снижается статистическая зависимость. Это приводит к тому, что энтропия H_{ct} оценивается не для источника Маркова, а для источника Бернулли. Статистическое кодирование (методы Хаффмана и арифметические коды) не обеспечивают дополнительного сжатия массива дифференциального представления. Следовательно, сокращаются потенциальные возможности для обеспечения степени сжатия данных;

3) точности выбора статистической модели элементов МДП. Нарушение статистической модели приводит к тому, что часто встречаемым данным будет присваиваться более длинные кодовые комбинации. Построение более точных адаптивных вероятностно-статистических моделей элементов МДП приводит к:

– увеличению времени на обработку и к росту количества разрядов на представление служебной информации. На данный момент эффективность статистических методов по степени сжатия практически достигла своего максимального уровня. Избыточность статистических кодов относительно энтропии Марковского источника не превышает в среднем 10 – 20%;

4) особенностей статистических кодов. Однако адаптивный код Хаффмана и арифметические коды для неравномерного представления элементов МДП вызывают:

– повышение сложности программной и технической реализации в связи с необходимостью синхронизации и маркировки неравномерных кодовых комбинаций;

– в случае адаптивного кодирования Хаффмана для каждого массива ДП вычисление статистики, построение кодовых таблиц и организацию двойного прохода по обрабатываемым данным, а весь фрагмент будет восстановлен только после перекодировки всех неравномерных кодовых слов. Это приводит к повыше-

нию времени обработки в особенности для средне- и сильнонасыщенных изображений;

– необходимость хранения кодовых таблиц и разделяющих маркеров, снижающих степень сжатия статистическими кодами;

– низкую помехоустойчивость кодов длин серий и статистических кодов к ошибкам в каналах связи.

Поэтому можно заключить, что данный подход наиболее эффективен при обработке слабонасыщенных (высокоизбыточных) изображений.

Отсюда следует:

– неэффективность рассмотренной технологии кодирования элементов МДП в случае обеспечения необходимой степени достоверности восстанавливаемых изображений;

– степень сжатия сильно зависит от класса изображений (степени насыщенности изображения мелкими деталями различного цвета).

Для выхода из такой ситуации необходимо организовать обработку массивов дифференциального представления на основе выявления комплексных закономерностей как статистической, так и комбинаторной природы.

3. Создание модели источника неравновесных позиционных чисел

Возможны следующие подходы относительно распределения количества разрядов для кодового представления элементов массивов ДП, которые не связаны с оценкой вероятности их появления.

Первый подход состоит в осуществлении выделения количества разрядов исходя из максимального значения $d_{дп}$ динамического диапазона элементов массива ДП. В этом случае для кодового представления элементов МДП выделяется фиксированное количество разрядов (такой режим называется равномерным), а именно, равно $\log_2 d_{дп}$. Суммарное количество разрядов $w_\ell^{(1)}$ на представление столбца МДП будет равно $w_\ell^{(1)} = m \log_2 d_{дп}$.

Недостатком такого подхода является то, что перепад между минимальным и максимальным значениями элементов МДП может оказаться на уровне динамического диапазона $d_{фи}$ исходного фрагмента изображения, т.е. $d_{дп} \approx d_{фи}$. Это приведет к снижению степени.

Для выхода из такой ситуации предлагается учитывать неравномерность значений элементов массива дифференциального представления.

Поэтому второй подход заключается в отведении количества разрядов с учетом ограничений на динамический диапазон элементов МДП. В соответствии с комбинаторной моделью массивов ДП существуют ограничения на динамический диапазон $d_{k\ell}$ их элементов $h'_{k,\ell}$, т.е. $h'_{k,\ell} \leq d_{k\ell} - 1$. Тогда количество

двоичных разрядов под кодовое представление каждого элемента будет определяться из формулы $w_{k\ell}^{(2)} = \lceil \log_2 d_{k\ell} \rceil + 1$, суммарное количество разрядов $w_\ell^{(2)}$ на представление столбца МДП будет равно $w_\ell^{(2)} = m \lceil \log_2 d_{k\ell} \rceil + m$.

Основные недостатки такого распределения разрядов вызваны неравномерностью длин кодов элементов МДП. Для выхода из такой ситуации необходимо либо использовать разделители для выравнивания кодовых слов, либо передавать информацию о значениях динамического диапазона. Кроме того, формирование кодовых слов для отдельных элементов является менее эффективным относительно формирования кодов для последовательности элементов.

Отсюда предлагается строить третий подход относительно распределения разрядов, базирующийся на возможности описания последовательности элементов МДП в виде позиционного числа.

При отсутствии ограничений на элементы столбца $H^{(\ell)}$ его можно рассматривать как позиционное число $H^{(\ell)} = \{h'_{1\ell}, h'_{2\ell}, \dots, h'_{k\ell}, \dots, h'_{m\ell}\}$ с основанием, равным величине $d_{\text{дп}}$ – динамического диапазона массива дифференциального представления. В этом случае отображение позиционного числа на натуральную ось, т.е. его код-номер N_ℓ будет задаваться следующей записью:

$$N_\ell = h'_{1\ell} d_{\text{дп}}^{m-1} + \dots + h'_{k\ell} d_{\text{дп}}^{m-k} + \dots + h'_{m\ell}, \quad (5)$$

где $h'_{k\ell}$ – элемент, расположенный на k -й позиции в ℓ -м столбце массива ДП; $d_{\text{дп}}^{m-k}$ – весовой коэффициент элемента $h'_{k\ell}$; m – количество элементов в столбце МДП.

В этом случае количество разрядов $\log_2 \{H_m^{(\ell)}\}$, затрачиваемое на представление элементов столбца $H^{(\ell)}$, на основе выражения (5) определяется из условия $N_\ell \leq d_{\text{дп}}^m$. Данное условие задает ограничение на значения кодов-номеров последовательности элементов МДП при заданных величинах m и $d_{\text{дп}}$. Отсюда величина $\log_2 \{H_m^{(\ell)}\}$ будет равна

$$\log_2 \{H_m^{(\ell)}\} \leq m \log_2 d_{\text{дп}}.$$

Учитывая ограничения на динамический диапазон элементов МДП, т.е. $h'_{k\ell} < d_{k\ell}$, величина $\log_2 \{H_m^{(\ell)}\}$ будет определяться как:

$$\log_2 \{H_m^{(\ell)}\} \leq \log_2 \prod_{k=1}^m d_{k\ell}. \quad (6)$$

Без нарушения условия распределения разрядов правую часть соотношения (6) можно заменить выражением по следующей схеме:

$$\begin{aligned} \prod_{k=1}^m d_{k\ell} &= d_{m\ell} \prod_{k=1}^{m-1} d_{k\ell} \leq (d_{m\ell} + 1) \prod_{k=1}^{m-1} d_{k\ell} \leq \\ &\leq d_{m\ell} \prod_{k=1}^{m-1} d_{k\ell} + d_{m-1,\ell} \prod_{k=1}^{m-2} d_{k\ell} + \dots + d_{2\ell} d_{1\ell} + (d_{1,\ell} + 1). \end{aligned}$$

Понятно, что выполняется равенство

$$(d_{m\ell} - 1) \prod_{k=1}^{m-1} d_{k\ell} + \dots + ((d_{1,\ell} - 1) + 1) = \prod_{k=1}^m d_{k\ell}.$$

Но поскольку по условию комбинаторной модели описания дифференциального представления выполняется условие $h'_{k\ell} \leq (d_{k\ell} - 1)$, то будет верно неравенство

$$\prod_{k=1}^m d_{k\ell} - 1 \geq h'_{m\ell} \prod_{k=1}^{m-1} d_{k\ell} + \dots + h'_{2\ell} d_{1\ell} + h'_{1,\ell}. \quad (7)$$

Выражение в правой части неравенства (7) представляет собой взвешенную сумму значений элементов $h'_{k,\ell}$ массива дифференциального представления. Кроме того, выполняется неравенство

$$\log_2 \{h'_{m\ell} \prod_{k=1}^{m-1} d_{k\ell} + \dots + h'_{2\ell} d_{1\ell} + h'_{1,\ell}\} \leq \log_2 \prod_{k=1}^m d_{k\ell}. \quad (8)$$

Отсюда на основе сравнения выражений (6) и (8) можно заключить, что

$$\{H_m^{(\ell)}\} = h'_{m\ell} \prod_{k=1}^{m-1} d_{k\ell} + h'_{m-1,\ell} \prod_{k=1}^{m-2} d_{k\ell} + \dots + h'_{1,\ell}. \quad (9)$$

Отличие выражения (9) от формулы (5) состоит в том, что между отношениями весовых коэффициентов, соответствующих двум соседним элементам, не выполняется равенства, т.е.

$$\frac{\prod_{k=1}^{m-\xi} d_{k\ell}}{\prod_{k=1}^{m-\xi-1} d_{k\ell}} = d_{m-\xi,\ell} \neq \frac{\prod_{k=1}^{m-\gamma} d_{k\ell}}{\prod_{k=1}^{m-\gamma-1} d_{k\ell}} = d_{m-\gamma,\ell}, \quad (10)$$

где $\prod_{k=1}^{m-\xi} d_{k\ell}$, $\prod_{k=1}^{m-\xi-1} d_{k\ell}$ – весовые коэффициенты соответственно для $(m-\xi+1)$ -го и $(m-\xi)$ -го элемента МДП; $\prod_{k=1}^{m-\gamma} d_{k\ell}$, $\prod_{k=1}^{m-\gamma-1} d_{k\ell}$ – весовые коэффициенты соответственно для $(m-\gamma+1)$ -го и $(m-\gamma)$ -го элемента МДП; $d_{m-\xi,\ell}$, $d_{m-\gamma,\ell}$ – основания соответственно $(m-\xi)$ -го и $(m-\gamma)$ -го элемента МДП.

Неравенство (10) указывает на:

- неравновесность оснований элементов МДП;
- зависимость значений весовых коэффициентов от позиции, соответствующей элементу в массиве дифференциального представления.

Отсюда *неравновесным позиционным числом* называется последовательность элементов $\{h'_{1\ell}, \dots, h'_{m\ell}\}$, на значения которых наложены ограничения на дина-

мический диапазон, и отображаемых на натуральную ось по формуле (9).

Значит, для формирования кодового представления сразу всей последовательности $H^{(\ell)}$ элементов массива ДП с учетом ограничений на динамический диапазон необходимо рассматривать ее как неравновесное позиционное число.

Отсюда можно сформулировать следующую интерпретацию.

Определение. 1. Массив дифференциального представления является неравновесным позиционным числом, на элементы которого наложены ограничения на динамический диапазон.

Массив ДП, размером $m \times n$ элементов, записывается в виде двумерной матрицы H .

Если задана смешанная система оснований $D_h^{(2)}$ размерностью $m \times n$, так, что выполняется условие $h'_{k\ell} \leq d_{k\ell} - 1$, $k=1, m$ и $\ell=1, n$, то массив ДП представляет собой *двумерное* неравновесное позиционное число. Согласно соотношению (10) основание $d_{k\ell}$ двумерного НП числа для предложенной интерпретации равно величине ограничения на динамический диапазон элемента МДП. Формирование кода-номера $N^{(2)}$ для двумерного НП числа H с учетом заданной системы оснований $D_h^{(2)}$ определяется соотношением [4]:

$$N^{(2)} = \sum_{k=1}^m \sum_{\ell=1}^n h'_{k\ell} V_{k\ell}^{(2)},$$

где $V_{k\ell}^{(2)}$ – весовой коэффициент элемента $h'_{k\ell}$.

С учетом сформулированной интерпретации компактное представление изображений организовывается на основе неравновесного позиционного кодирования массивов дифференциального представления. Количество разрядов, отводимое на кодовое представление столбца $H^{(\ell)}$ элементов МДП кодом $N^{(\ell)}$ неравновесного позиционного числа, вычисляется на основе формулы

$$\log_2 N^{(\ell)} = \log_2 \sum_{k=1}^m h'_{k\ell} \left(\prod_{\xi=k+1}^m d_{\xi\ell} \right),$$

где $\log_2 N^{(\ell)}$ – количество разрядов, необходимое для кодового представления столбца $H^{(\ell)}$, рассматриваемого как неравновесное позиционное (НП) число.

При этом с учетом неравенства (6) максимальной границей величины $\log_2 N^{(\ell)}$ будет значение $\prod_{\xi=1}^m d_{\xi\ell}$:

$$\log_2 N^{(\ell)} \leq \log_2 \prod_{\xi=1}^m d_{\xi\ell}. \quad (11)$$

Отсюда величина в правой части неравенства (11) является максимальным количеством разрядов

$W^{(\ell)}_{\max}^{(1)}$, затрачиваемых на представление одного

кода-номера столбца массива дифференциального представления с учетом его представления в виде НП числа:

$$W^{(\ell)}_{\max}^{(1)} = \log_2 \prod_{\xi=1}^m d_{\xi\ell}.$$

Из неравенства (11) следует, что в результате представления последовательности элементов МДП в виде неравновесного позиционного числа осуществляется сокращение комбинаторной избыточности, обусловленной ограничениями на динамический диапазон.

Поскольку неравновесное позиционное число формируется для массивов дифференциального представления видеоданных, то значение его кода-номера будет зависеть от следующих свойств изображений:

– степени коррелированности между элементами изображения;

– размеров областей когерентности;

– степени насыщенности изображения перепадами, мелкими объектами и импульсными всплесками.

Для изображений с большим числом деталей код характеризует степень насыщенности фрагмента мелкими объектами. Значение кода будет тем меньше, чем больше отношение площади, имеющей слабонасыщенную яркость, к площади изображения передаваемого объекта, и наоборот.

При обработке областей реалистических изображений заранее неизвестно их структурное содержание. Значит, для разных фрагментов изображений будут различные значения кодов-номеров. Поэтому массивам дифференциального представления изображений в зависимости от их содержания соответствуют различные значения кодов-номеров.

В случае обработки насыщенных изображений будут образовываться массивы ДП, содержащие одновременно фрагменты как с большим динамическим диапазоном, так и с ограниченным. Поэтому для выхода из такой ситуации предлагается учитывать двухградационность динамических диапазонов массивов дифференциального представления реалистических изображений.

4. Разработка модели источника неравновесных перфорированных позиционных чисел

Насыщенность реалистических изображений определяется степенью корреляции между соседними элементами и количеством перепадов, мелких объектов и импульсных всплесков динамических диапазонов. Данные структурные особенности влияют на значения динамических диапазонов дифференциального представления изображений. Поэтому нестационарность структурных свойств изображений приводит к неоднородности динамических диапазонов дифференциального представления фрагмента. Реальный динамический диапазон МДП будет характеризоваться в основном двумя уровнями. Отсюда возникает свойство перфорированности динамического диапазона

МДП. Перфорированность означает, что потенциально существует два уровня значений элементов МДП, у которых существенно отличаются значения динамических диапазонов.

Однако общий динамический диапазон массива дифференциального представления рассчитывается по формулам

$$d_{k\ell} = \min(d_k; d_\ell);$$

$$d_k = (h'_{k,\max} - h'_{k,\min}) + 1; \quad d_\ell = (h'_{\ell,\max} - h'_{\ell,\min}) + 1,$$

где $h'_{k,\max}$ и $h'_{k,\min}$ – максимальное и минимальное значения элементов в k -й строке; $h'_{\ell,\max}$ и $h'_{\ell,\min}$ – максимальное и минимальное значения компонент ℓ -го столбца

С одной стороны, это позволяет сократить количество оснований. Но с другой – такой подход к определению динамического диапазона не позволяет учесть потенциальных свойств перфорированности элементов массивов ДП. Это приводит к тому, что:

1. Во-первых происходит выравнивание динамических диапазонов вследствие того, что не учитываются неоднородности динамических диапазонов в разных частях фрагмента ДП, откуда в независимости от значений элементов $\{h'_{1\ell}, \dots, h'_{k\ell}, \dots, h'_{m\ell}\}$ для величины кода-номера N_ℓ будет выполняться неравенство $d(\ell)^{m-1} \leq N_\ell \leq d(\ell)^m$.

Тогда количество разрядов на представление кода-номера будет изменяться в пределах

$$(m-1) \log_2 d(\ell) \leq \log_2 N_\ell \leq m \log_2 d(\ell).$$

В свою очередь, количество информации H_d будет стремиться к величине $H_{\text{тр}} = \log_2 d_{\text{дп}}$.

2. Во-вторых, поскольку динамический диапазон в строке и в столбце массива ДП определяется по максимальному значению элемента, то общий динамический диапазон будет увеличиваться, т.е. выполняется условие $d(\ell)^m \approx d_{\text{дп}}$.

Данное условие указывает на то, что значение динамического диапазона в строке будет стремиться к значению динамического диапазона всего массива дифференциального представления.

Данные условия неизбежно влекут за собой увеличение количества разрядов на кодовое представление неравновесных позиционных чисел. Следовательно, снижается коэффициент сжатия.

Для повышения неравновесности элементов МДП необходимо повысить степень неоднородности и ограниченности их динамических диапазонов. Поэтому предлагается классифицировать дифференциальное представление на два вида. Первый – относится к случаю, когда дифференциальное представление формируется для высококоррелированных фрагментов изображения. Наоборот, второй класс образуется для фрагмента изображения, содержащего большое ко-

личество резких перепадов между соседними элементами. Такая обработка позволит выделить два перфорационных уровня динамического диапазона. Это достигается в результате отбора элементов ДП, имеющих наибольшие динамические диапазоны, которые формируются для фрагментов изображения, насыщенных резкими перепадами. После этого динамический диапазон оставшихся элементов ДП будет характеризоваться ограниченностью своих значений. Такие элементы формируются на основе высококоррелированных фрагментов изображения.

Предложенный подход позволяет учесть потенциальные свойства перфорированности динамических диапазонов в результате выделения элементов с наибольшими динамическими диапазонами. Действительно, возможны следующие варианты:

1) когда элемент $h'_{k\ell}$ будет иметь наибольшее значение в строке или в столбце, т.е.

$$h'_{k\ell} = \max_{1 \leq \xi \leq n} \{h'_{k\xi}\} = d_k - 1$$

или
$$h'_{\gamma\ell} = \max_{1 \leq u \leq m} \{h'_{u\ell}\} = d_\ell - 1,$$

тогда его значение будет определяющим для динамических диапазонов остальных элементов строки или столбца;

2) когда элемент $h'_{k\ell}$ будет иметь наибольшее значение одновременно в строке и в столбце, т.е.

$$h'_{k\ell} = \max_{1 \leq \xi \leq n} \{h'_{k\xi}\} = d_k - 1$$

и
$$h'_{k\ell} = \max_{1 \leq u \leq m} \{h'_{u\ell}\} = d_\ell - 1, \quad (12)$$

тогда его значение будет определяющим для динамических диапазонов элементов в строке и столбце, на пересечении которых он расположен.

Понятно, что удаление таких элементов может повлиять на динамические диапазоны оставшихся элементов в стороны их понижения. В противном случае, когда динамический диапазон оставшихся элементов не понижается либо уменьшается, но незначительно (не более чем в два раза), то существуют еще элементы с динамическими диапазонами, соответствующему резкому перепаду. Поэтому процесс удаления элементов требуется продолжать.

Наибольшее понижение динамического диапазона в результате формирования перфорирования достигается для варианта, заданного условием (12). В этом случае в результате удаления одного элемента одновременно может быть достигнуто снижение динамического диапазона для элементов строки и столбца.

Если в результате перфорирования массива ДП будет достигнуто условие, когда максимальный динамический диапазон оставшихся элементов будет меньше исходного динамического диапазона в θ раз, то допустимо считать, что выявлены потенциальные свойства

перфорированности массивов дифференциального представления, т.е.

$$d_{k\ell} / d_{k\ell}^{(\chi)} = \theta, \theta > 2, \quad (13)$$

где $d_{k\ell}^{(\chi)}$ – динамический диапазон ($k; \ell$)-го элемента после удаления χ элементов верхнего перфорационного уровня.

При выполнении условия (13) количество разрядов, на которое сокращается длина кодового представления кода-номера, определяется по формуле

$$\log_2 N_{\max} - \log_2 N_{\max}^{(\chi)} = \chi \log_2 \theta, \text{ (бит)}$$

а количество устраняемой относительной избыточности – соответственно как

$$\frac{\log_2 N_{\max}}{\log_2 N_{\max}^{(\chi)}} 100\% \leq \frac{\chi \log_2 d_{k\ell}}{\chi \log_2 d_{k\ell}^{(\chi)}} 100\% = \left(1 + \frac{\log_2 \theta}{\log_2 d_{k\ell}^{(\chi)}}\right) 100\%$$

где $\log_2 N_{\max}$, $\log_2 N_{\max}^{(\chi)}$ – оценка количества разрядов на представление кода-номера соответственно до N_{\max} и после $N_{\max}^{(\chi)}$ перфорирования (выявления χ элементов верхнего перфорационного уровня).

Значит, можно сформулировать следующее определение, задающее интерпретацию массивов дифференциального представления фрагментов насыщенных изображений.

Определение 2. Массив дифференциального представления, рассматриваемый как неравновесное позиционное число, в случае выполнения условия (13), т.е. когда существуют такие элементы, удаление которых приводит к значительному сокращению динамического диапазона оставшихся элементов, называется двумерным перфорированным неравновесным позиционным числом (ПНПЧ).

В результате удаления элементов формируются два массива. Первый массив $H^{(1)}$ содержит элементы верхнего перфорационного уровня. Соответственно элементам второго массива $H^{(0)}$ отвечает нижний перфорационный уровень динамического диапазона. Такой процесс называется перфорированием, т.е. $H \rightarrow \{H^{(0)}; H^{(1)}\}$.

С позиций теории информации полученную форму представления дифференцированных изображений можно рассматривать как построение источника со-

общений, на построение которых влияют следующие характеристики:

– ограниченное количество мелких объектов и резких перепадов для фрагментов изображений;

– степень коррелированности между соседними элементами изображений;

– перфорированность динамических диапазонов элементов дифференциального представления изображений.

Структурно-функциональная схема модели преобразованного источника изображений представлена на рисунке.

Таким образом, обосновано необходимость формирования перфорированных неравновесных позиционных чисел для дифференциального представления изображений. Это позволит:

– выявить закономерности перфорированности динамических диапазонов дифференциального представления, насыщенных мелкими деталями изображения;

– обеспечить потенциальные возможности для дополнительного сокращения избыточности дифференциально-представленных изображений в случаях нестационарности структурных свойств изображений.

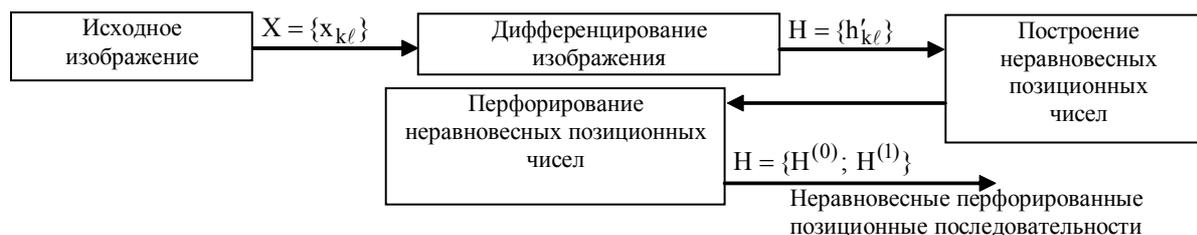
5. Выводы

1. Обосновано, что неравновесное позиционное кодирование обладает потенциальными возможностями для обеспечения степени сжатия дифференциального представления данных в случаях произвольного значения статистических характеристик изображений (законов распределения вероятностей появления элементов, степени корреляции между соседними элементами).

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что:

1) впервые разработан подход относительно сокращения избыточности в массивах дифференциального представления изображений на основе неравновесного позиционного кодирования, отличающийся от известных тем, что в процессе выявления закономерностей одновременно учитываются:

– степень корреляции между соседними элементами и количество мелких объектов в изображениях;



Источник перфорированных неравновесных чисел для дифференциально-представленных изображений
Структурно-функциональная схема модели генерирования перфорированных неравновесных позиционных чисел на основе дифференцированных изображений

– неравномерность и ограниченность динамических диапазонов массивов дифференциального представления изображений.

Это позволяет повысить степень сжатия данных для насыщенных реалистических изображений;

2) получила дальнейшее развитие технология компрессии дифференциального представления изображений, отличающаяся от известных тем, что:

– осуществляется выявление ограничений на динамические диапазоны МДП;

– массивы дифференциального представления описываются кодами-номерами неравновесных позиционных чисел.

Это позволяет исключить потери качества воспроизводимых изображений и обеспечить дополнительное повышение степени сжатия при минимизации временных затрат.

2. Обосновано, что дифференциальное представление изображения позволяет сформировать перфорированные неравновесные позиционные числа, т.е. источник дифференцированных изображений преобразуется в источник генерирования неравновесных позиционных чисел. В этом случае за счет выявления перфорированности динамических диапазонов дифференциального представления изображения обеспечиваются потенциальные возможности для дополнительного сокращения избыточности, в том числе для вариантов генерирования изображений, имеющих нестационарные структурные свойства.

Впервые построена модель оценки информативности изображений в дифференциальном виде на основе выявления перфорированных ограничений на динамический диапазон их элементов. В отличие от других подходов (моделей) учитываются неоднородности структурного содержания дифференциального представления изображений, обусловленные наличием всплесковых (значимых, резких) перепадов на границах контуров и мелких объектов. Это позволяет повысить количество сокращаемой комбинаторной избы-

точности в насыщенных реалистических и искусственных изображениях.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что на основе построенной модели источника генерирования перфорированных неравновесных позиционных чисел обосновано направление для разработки новых методов и технологий компрессии дифференцированных сильнонасыщенных реалистических изображений.

Литература: 1. *Олифер В. Г.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. СПб.: Питер, 2006. 958 с. 2. *Gonzales R.C.* Digital image processing / R.C. Gonzales, R.E. Woods. Prentice Inc. Upper Saddle River, New Jersey 2002. 779 p. 3. *Adams M.D.* The JPEG-2000 Still Image Compression 1 N 2412, Sept. 2001. 4. *Баранник В.В.* Структурно-комбинаторное представление данных в АСУ / В.В. Баранник, Ю.В. Стасев, Н.А. Королева. Монография, Харьков: ХУПС, 2009. 252 с. 5. *Красноруцкий А.А.* Дифференциальное кодирование низкочастотных составляющих // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. 2007. № 3(22). С. 19 – 22. 6. *Шинкарев В.В.* Методология формирования технологии компрессии дифференцированных изображений // Сучасна спеціальна техніка. 2009. №4. С. 45 – 54.

Поступила в редколлегию 17.12.2009

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Стасев Ю.В.

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научного центра Харьковского университета Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

Остроумов Борис Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Заслуженный машиностроитель Украины, начальник отдела ГНПП «Объединение Коммунар» – НТ СКБ «ПОЛИСВИТ», Харьков. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

Шинкарев Валерий Владимирович, инженер метрологического центра военных эталонов. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.