

УДК 621.327:681.5

В.В. Баранник, С.А. Сидченко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПОДХОДА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*Обосновывается выбор подхода для построения технологии цифровой обработки изображений. Показано, что мультиадическое кодирование обладает потенциальными возможностями для построения на его основе предварительного представления данных для выполнения ортогональных преобразований в процессе цифровой обработки изображений.*

*мультиадические коды, ортогональное преобразование, цифровая обработка изображений*

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

Возможности существующих подходов относительно цифровой обработки изображений (ЦОИ) не адекватны современным требованиям процессов функционирования информационных систем [1 – 4]:

- существующие быстрые алгоритмы выполнения ортогональных преобразований (ОП) для изображений с размерами, начиная с 10 Мпикселей, затрачивают на универсальных средствах время обработки порядка десятков секунд;

- использования свойств трансформант ОП для уменьшения количества обрабатываемых данных приводит к неконтролируемым потерям информации;

- предварительная обработка на основе учета аппертурных свойств изображений снижает эффективность всего процесса цифровой обработки (увеличивается исходный объем изображения, снижаются достоинства трансформации изображений, уменьшается помехоустойчивость данных);

- существует несоответствие кратности размеров изображения и размеров трансформант, что приводит к увеличению времени обработки и повышению исходного объема изображения.

Поэтому **актуальной научной задачей** является сокращение времени обработки и передачи видеоданных в информационных системах при обеспечении заданных значений среднеквадратической погрешности восстановления.

**Целью статьи** является обоснование выбора подхода для построения технологии ЦОИ.

### Изложение основного материала

При построении технологии, лежащей в основе ЦОИ, необходимо учитывать требования, состоящие в обеспечении заданных значений среднеквадратической погрешности восстановления, времени обработки изображений и не превышения исходного объема оцифрованного изображения (в противном случае увеличивается время обработки и время пе-

редачи в каналах связи).

Одним из значимых этапов процесса ЦОИ является выполнение ОП (вейвлет-преобразования). Данный этап связан с: большими удельными временными затратами на обработку (до 70%), внесением погрешностей; получением предпочтительных форматов представления данных для последующей обработки и анализа. Характер и значения данных показателей ЦОИ зависят от структуры базисных функций и процесса нормировки коэффициентов преобразования. Структура базисных функций ОП определяется параметрами:

- размерность базисных функций;
- тип арифметических операций, используемых для выполнения ОП.

Базисные функции ОП могут быть одномерными и двумерными. Если ОП осуществляется на основе одномерной базисной функции, то возможны два варианта его реализации.

**Первый вариант** заключается в развертке двумерного массива видеоданных в одномерную последовательность. После чего для одномерного вектора исходных данных выполняется одномерное ОП [2, 3]:

$$Y(n) = \frac{1}{N} F(n) X(n); \quad X(n) = F^T(n) Y(n),$$

где  $N$  – количество элементов вектора отсчетов;  $1/N$  – нормирующий коэффициент (для некоторых преобразований может отсутствовать);  $X(n)$  – вектор-столбец отсчетов изображения;  $F(n)$  – матрица дискретных значений базисных функций ОП ( $n = \log_2 N$ );  $F^T(n)$  – транспонированная матрица дискретных значений базисных функций ОП;  $Y(n)$  – вектор коэффициентов преобразования.

Данному способу свойственны недостатки:

- не учитывается двумерная структура изображения. Разрушаются важные характеристики фрагментов изображения: наличие корреляционных зависимостей по строкам и по столбцам, наличие двумерной природы когерентности;

- увеличивается корреляция и статистическая зависимость между компонентами трансформанты;
- отсутствует возможность выявлять двумерные характеристики в трансформантах и проводить двумерный спектральный анализ.

Для исключения данных недостатков осуществляется **второй вариант** выполнения ОП. В основе данного способа лежит свойство разделимости ортогональных базисов. Благодаря такому свойству существует возможность обрабатывать двумерные массивы видеоданных. Преобразование выполняется в два этапа. На первом этапе базисные функции применяются к строкам массива, а на втором этапе – к столбцам промежуточного массива обработанных данных. В то же время второй вариант имеет следующие недостатки:

- увеличивается значение среднеквадратического показателя погрешности (СКПП) восстанавливаемых изображений. Это происходит из-за двухэтапности вносимых погрешностей. Погрешности второго этапа преобразования накладываются на погрешности в промежуточных данных, полученных после первого этапа обработки;
- с ростом размеров обрабатываемых массивов видеоданных повышается значение СКПП;
- повышаются затраты ресурса памяти на хранение результатов промежуточных вычислений;
- невозможность выполнения второго этапа обработки до завершения первого этапа преобразования.

Снижение влияния данных недостатков на эффективность ЦОИ возможно на основе следующих подходов.

1. Использование нормировки коэффициентов преобразования на приемной стороне и выполнение ОП на основе целочисленных базисных функций. Для данного подхода, с одной стороны, величина СКПП стремится к 0 и сокращается время на обработку за счет использования целочисленных арифметических операций. С другой стороны, количество операций на ОП не уменьшается, а цифровой объем получаемых данных увеличивается по сравнению с первоначальным объемом оцифрованного изображения в 1,5 – 2 раза. Кроме того, сокращается количество компонент трансформант, имеющих значения близкие к 0. Такие недостатки резко ограничивают сферы приложения данного подхода.

2. Проведение двумерного ОП за один этап. Для этого используется двумерные базисные функции [2]. Дискретные значения двумерных функций организуем в виде матриц. Структура матрицы для прямого  $F^{(2)}$  и обратного  $F_{обр}^{(2)}$  преобразований имеет клеточную форму. Каждая клетка представляет собой подматрицу  $F_{k,\ell}^{(1)}$  размерности  $n \times n$ ,

( $k, \ell = \overline{1, n}$ ), где  $n \times n$  – размерность обрабатываемого массива видеоданных;  $k, \ell$  – координаты подматрицы  $F_{k,\ell}^{(1)}$  в матрице  $F^{(2)}$ . Вычисление коэффициентов  $u_{k,\ell}$  ортогональных преобразований задается выражением [2]:

$$u_{k,\ell} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j} f_{k,\ell}^{(1)}(i, j), \quad (1)$$

где  $f_{k,\ell}^{(1)}(i, j)$  – ( $i, j$ )-й элемент подматрицы  $F_{k,\ell}^{(1)}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ;  $x_{i,j}$  – ( $i, j$ )-й элемент массива изображения.

За счет одноэтапности преобразования исключается двойное накопление ошибок округления. В среднем на 30% снижается значение СКПП. Также не требуется отводить ресурс на хранение результатов промежуточных вычислений. Такой подход сопровождается рядом недостатков, состоящих в:

- увеличении количества операций на прямое и обратное преобразования. Количество операций сложения/вычитания и умножения/деления увеличивается по сравнению с двухэтапной схемой в  $n/2$  раза. Диаграмма зависимости величины увеличения времени обработки от размера изображений приведена на рис. 1. Из анализа диаграммы следует, что время обработки для одноэтапного выполнения двумерного преобразования относительно двухэтапной схемы при размере массива видеоданных  $8 \times 8$  элементов составляет 75 % от общего времени обработки изображения;

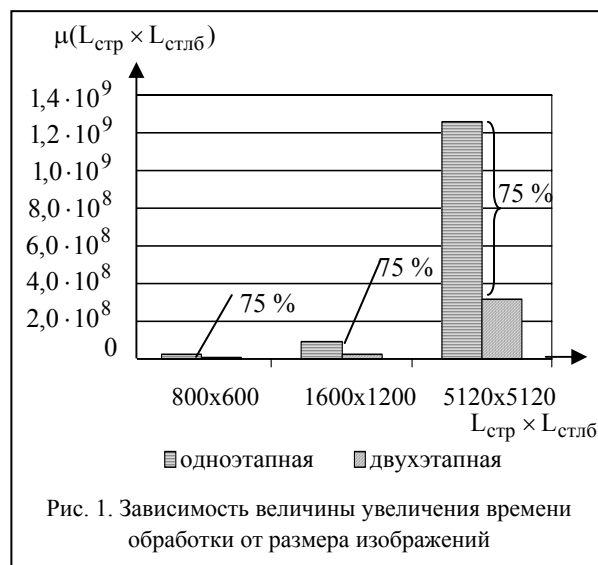


Рис. 1. Зависимость величины увеличения времени обработки от размера изображений

- росте количества двумерных матриц, входящих в матрицу двумерного базиса, различного содержания. Это приводит к повышению затрат информационного ресурса на их хранение или на их формирование порядка в  $n^2$  раз;

- матрицы прямого и обратного преобразований в зависимости от вида ОП могут иметь различ-

ное содержание. Значит дополнительно повышаются затраты вычислительного или запоминающего ресурсов.

Следовательно, организация одноэтапного двумерного ОП не обеспечивает требуемого повышения эффективности ЦОИ.

3. Разработка подходов, основанных на уменьшении количества компонент трансформант, не снижает влияние недостатков предыдущих этапов обработки. Кроме того, отбор компонент сопровождается потерей части информации.

4. Организация обработки данных перед выполнением ОП. Этот подход заключается в создании такого представления данных, при котором:

– не снижалась бы эффективность применения ОП. Для этого: корреляция на выходе процесса предобработки не должна быть меньше, чем корреляция исходных данных; должна сохраняться двухмерность организации данных

$$\rho' \approx \rho_a, \quad (2)$$

где  $\rho_a$ ,  $\rho'$  – значения коэффициентов корреляции соответственно до и после предобработки;

– представление данных должно организовываться на базе целочисленных операций. В этом случае не будет происходить накопления ошибок после выполнения ОП

$$\delta' = 0, \quad (3)$$

где  $\delta'$  – значение среднеквадратического показателя погрешности на выходе этапа предварительной обработки;

– суммарное количество операций  $(\mu(Q) + \mu(Q')_{\text{оп}})$  (суммарное время обработки) на предобработку и ОП должно быть меньше, чем количество операций  $\mu(Q)_{\text{оп}}$  (время обработки) на ОП для исходных массивов видеоданных

$$(\mu(Q) + \mu(Q')_{\text{оп}}) < \mu(Q)_{\text{оп}}, \quad (4)$$

где  $\mu(Q)$ ,  $\mu(Q')_{\text{оп}}$  – количество операций соответственно на предобработку и последующее ОП;

– формируемый цифровой объем  $V(Q')$  данных не должен превосходить значения объема  $V(Q)$  исходного оцифрованного изображения

$$V(Q') < V(Q); \quad (5)$$

– должна обеспечиваться устойчивость структуры предварительного представления данных к погрешностям, вызванным округлением результатов вычислений при выполнении ОП

$$h \geq h_{\text{тр}}, \quad (6)$$

где  $h$ ,  $h_{\text{тр}}$  – значения пикового отношения сигнал/шум соответственно, обеспечиваемое созданным процессом цифровой обработки и требуемое значение.

Рассмотрим варианты организации предвари-

тельного представления данных.

**Первый вариант** – на базе формирования статистических кодовых конструкций. Реализация статистического кодирования возможна на базе методов Хаффмана и арифметического кодирования [5]. Статистическое кодирование организуется на базе целочисленных арифметических операций (выполняется условие (3)) и позволяет сократить количество разрядов на представление элементов исходного изображения (выполняется условие (5)). Кроме того, арифметическое кодирование формирует двоичную кодограмму, несущую информацию о нескольких элементах изображения. Данное условие создает возможность для организации выполнения условия (2). В то же время процессу кодирования данных в результате сокращения статистической избыточности присущи следующие недостатки:

– резкое снижение коэффициента сжатия при обработке реалистических изображений (степень сжатия изображений не превышает 10%). Следовательно, не выполняется условие (5);

– на реализацию арифметического кодирования затрачивается количество операций, превышающее количество операций на двумерное ОП (не выполняется условие (4));

– при ошибке в одном разряде кодограммы происходит распространение искажений на все последующие восстанавливаемые элементы изображения. Так для канала связи с вероятностью ошибки в одном символе  $p_0 = 10^{-4}$  отношение сигнал-шум на выходе не превышает 10 дБ [4]. Значит, условие (6) не выполняется;

– формирование кодограмм за счет сокращения статистической избыточности приводит к уменьшению степени корреляции между формируемыми элементами. Это снижает эффективность спектрально-частотного представления данных. Не выполняется условие (2).

Отсюда следует, что предварительное представление данных на основе статистического кодирования снижает эффективность ЦОИ с использованием ОП.

Для исключения данных недостатков **необходимо** организовывать предварительную обработку на основе представления данных, обладающего следующими свойствами:

– сжатие данных за счет сокращения избыточности, природа которой отлична от статистической и психовизуальной. В этом случае обеспечится выполнение условия (2). Кроме того, при обработке статистически не стационарных фрагментов изображений повысится степень их компрессии, что обеспечит выполнение условия (5);

– кодограммы должны формироваться на основе интегрирования структурных особенностей

фрагментов изображений. Это создает потенциальную возможность для выполнения условий (2) и (6).

В соответствии с полученными требованиями предлагается предварительную обработку организовывать **вторым вариантом** – на основе мультиадического представления. Для этого исходное изображение структурируется на отдельные двумерные массивы, размерностью  $m_M \times n$  элементов. Кодирование и декодирование мультиадических конструкций задается соответственно следующими выражениями [6]:

$$N_j = \sum_{i=1}^{m_M} a_{ij} V_i, \quad V_i = \prod_{k=i+1}^{m_M} r_k, \quad (7)$$

$$a_{ij} = \left\lfloor \frac{N_j}{V_i} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{N_j}{V_i \times r_i} \right\rfloor \times r_i, \quad (8)$$

где  $i$  – номер строки массива видеоданных;  $j$  – номер столбца;  $a_{ij}$  –  $i$ -й элемент  $j$ -го столбца исходного массива видеоданных;  $N_j$  – значение мультиадического кода (МК), полученного в результате обработки  $j$ -го столбца массива видеоданных;  $V_i$  – весовой коэффициент для элементов  $i$ -й строки массива видеоданных;  $m_M$ ,  $n$  – соответственно количество строк и столбцов в массиве видеоданных;  $r_i$  – максимальный элемент  $i$ -й строки исходного массива, увеличенный на 1:

$$r_i = \max_i(a_{ij}) + 1. \quad (9)$$

Анализ выражений (7) и (8) показывает, что:

1. Значение МК формируется на основе учета интегрированных структурных закономерностей не статистической природы. Сравнительная оценка коэффициентов корреляции  $\rho_N$  и  $\rho_a$  соответственно для величин  $N_j$  и  $a_{ij}$  приведена на рис. 2.

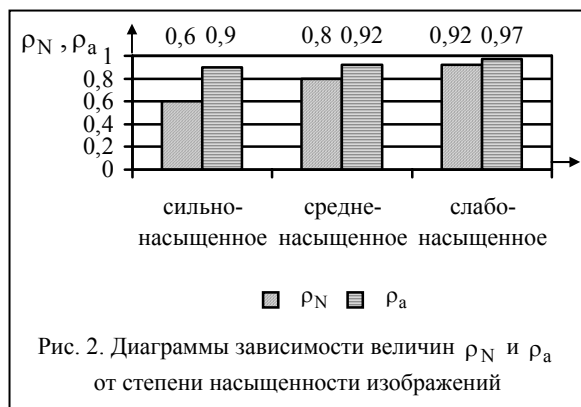


Рис. 2. Диаграммы зависимости величин  $\rho_N$  и  $\rho_a$  от степени насыщенности изображений

Из анализа диаграмм на рис. 2 вытекает, что значение коэффициента корреляции между величинами МК превышает значение коэффициента корреляции для исходных элементов реалистических изображений в среднем на 20%. Следовательно, выпол-

няется условие (2).

2. Кодирование и декодирование мультиадических кодовых конструкций выполняется на основе целочисленных арифметических операций (выполняется условие (3)). На мультиадическое представление отводится количество операций сложения и умножения порядка  $n^2$ . Это в несколько раз меньше, чем количество операций на выполнение ОП. Данная особенность создает возможность для выполнения условия (4).

3. Максимальное значение МК ограничено величиной  $V_j = \prod_{k=1}^{m_M} r_k$ , т.е.  $N_j < V_j = \prod_{i=1}^{m_M} r_i$ .

С другой стороны величины  $r_i$  образуются для каждого массива видеоданных с учетом особенностей динамических диапазонов в их строках. При этом выполняется условие

$$r_i \leq 2^b,$$

где  $2^b$  – величина, равная количеству уровней квантования, используемых для оцифровки изображения. Для полноцветных изображений  $b=8$ ,  $2^b = 256$ .

С учетом условия выполняется неравенство

$$[\log_2(N_j)] + 1 < [\log_2(V_j)] + 1 \leq m_M b, \quad (10)$$

где  $[\log_2(V_j)] + 1$  и  $m_M b$  – оценка количества разрядов, отводимого на представление соответственно максимально возможного для текущих динамических диапазонов значения МК и на представление элементов столбца исходного массива видеоданных.

На основе выполнения неравенства (10) следует, что количество разрядов на мультиадическое представление будет меньше, чем количество разрядов на представление исходного изображения. Значит, выполняется условие (5).

4. Весовые коэффициенты для каждого элемента изображения в процессе мультиадического кодирования формируются независимо от значений остальных элементов изображения. Поэтому в процессе декодирования восстановление текущего элемента не зависит от правильности восстановления предыдущих и последующих элементов.

Эта особенность создает потенциальные возможности для самокоррекции ошибок, возникающих в значении МК.

Самокоррекция означает то, что если после выполнения ОП будет получена величина  $N_j^*$ , для ко-

торой выполняется неравенство  $N_j^* \neq N_j$ , то при мультиадическом декодировании некоторое количество  $\phi$  элементов видеоданных будет восстановлено без погрешностей [6]:

$$a_{\xi j} = a_{\xi j}^{\bullet}; \quad a_{\xi j} \in \Omega_j, \quad (11)$$

где  $\Omega_j$  – множество элементов  $j$ -го столбца, которое восстанавливается без погрешности.

Длина множества  $\Omega_j$  равна  $\varphi$ , где  $\varphi = \overline{1, m_M - 1}$ .

На основе условия (9) следует выполнение неравенства

$$a_{ij} < \tau_i, \quad i = \overline{1, m_M}. \quad (12)$$

Тогда, если в результате ошибки в коде  $N_j$  будет восстановлен элемент  $a_{ij}^{\bullet}$  ( $a_{ij}^{\bullet} \neq a_{ij}$ ), то абсолютная величина погрешности  $e_{ij}$  ограничивается уровнем  $\tau_i$ :

$$e_{ij} = |a_{ij}^{\bullet} - a_{ij}| < \tau_i. \quad (13)$$

Условия, заданные соотношениями (11) и (13), создают потенциальные возможности для обеспечения построения кодовых конструкций, устойчивых к ошибкам, возникающим на этапе выполнения ОП. Выполняется условие (6).

5. На выбор величин  $m_M$  и  $n$  не накладываются жесткие ограничения. Это дает возможность обеспечить соответствие между произвольными размерами  $L_{\text{стр}} \times L_{\text{стлб}}$  изображения и размерами блоков видеоданных, для которых выполняется ОП.

### Выводы

1. На основе исследования различных подходов для повышения эффективности ЦОИ с использованием ОП обосновано, что:

а) необходимо организовывать предварительную обработку массивов видеоданных. При этом сформулированы следующие требования относительно предобработки:

- сохранение структурной двухмерности организации данных для последующего выполнения ОП;
- выполнение обработки на основе целочисленных арифметических операций;
- уменьшение суммарного времени обработки;
- сокращение количества обрабатываемых данных и уменьшение количества разрядов на их представление;

– устойчивость структуры предварительного представления данных к погрешностям, вызванным выполнением ОП;

б) обосновано, что предобработку необходимо организовывать на основе мультиадического представления массивов видеоданных.

2. Обосновано наличие свойств мультиадического представления, состоящих в том, что:

– мультиадическое кодирование проводится на основе учета интегрированных структурных закономерностей не статистической природы. При этом величина коэффициента корреляции повышается относительно коэффициента корреляции элементов изображения в среднем на 20%;

– кодирование и декодирование мультиадических кодовых конструкций выполняется на основе целочисленных арифметических операций (выполняется условие (3)). На мультиадическое представление отводится количество операций в несколько раз меньшее, чем количество операций на выполнение ОП;

– количество разрядов на мультиадическое представление будет меньше, чем количество разрядов на представление исходного изображения;

– наличие потенциальных возможностей (самокоррекция и локализация ошибок) для обеспечения построения кодовых конструкций, устойчивых к ошибкам, возникающим на этапе выполнения ОП;

– на выбор размерности массивов для мультиадического кодирования не накладываются жесткие ограничения. Это дает возможность обеспечить соответствие между размерами изображения и размерами блоков видеоданных, для которых выполняется ОП.

Мультиадическое кодирование обладает потенциальными возможностями для построения на его основе предварительного представления данных для выполнения ОП в процессе ЦОИ.

### Список литературы

1. Баранник В.В., Сідченко С.О. Аналіз підходів для зниження часу цифрової обробки зображень // Системи озброєння і військова техніка – 2007. – № 4 (12). – С. 57-60.
2. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Под ред. И.Б. Фоменко. – М.: Связь, 1980. – 248 с.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Том 1, 2. – М.: Мир, 1985. – 736 с.
4. Свириденко В.А. Анализ систем со сжатием данных. – М.: Связь, 1978. – 183 с.
5. Ватолин В.И., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2002. – 384 с.
6. Баранник В.В., Корольова Н.А. Определение отношения сигнал/шум при декодировании полиадических кодов длин серий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. – № 3. – С. 31-38.

Поступила в редколлегию 26.12.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. П.Ф. Поляков, Киевский университет управления транспортом, Киев.