

УДК 681.3.053

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗУЮЩИХ МАТРИЦ

Шеремет И.А., д.т.н., профессор, e-mail: sheremet_ia@apr.gov.ru;

Рукин А.П., старший преподаватель Института иностранных языков им. М. Тореза, e-mail: nto@mniti.ru;

Лебедев В.Д., к.т.н., ведущий инженер ЗАО «МНИТИ», e-mail: @mniti.ru.

Ключевые слова: обработка изображений, ортогональные преобразующие матрицы, целочисленные, матрицы Уолша-Адамара, преобразование Хаара.

В настоящей статье рассмотрены подходы к решению задачи обработки цифровых изображений с предварительным преобразованием и последующем восстановлением изображения с использованием нового класса целочисленных ортогональных преобразующих матриц.

Введение

В ЗАО «МНИТИ» были разработаны методы и алгоритмы устранения пространственной корреляционной избыточности цифровых изображений, использующие целочисленные преобразования, которые возможно применять к изображениям произвольного формата. Эти преобразования имеют единообразную форму генерации преобразующих матриц, предполагающую их многовариантность при сохранении декоррелирующих свойств, и как следствие, эффективное использование параллельной обработки при аппаратной реализации. Данные семейства матриц являются новыми и, следовательно, требующими апробации по самым разным направлениям [1-3].

Упомянутые матричные методы апробированы, в частности, по критерию степени сжатия без последующего квантования на цифровых монохромных тестовых изображениях, различающихся по размеру и структурной сложности. Ряд новых матричных методов, по степени сжатия после преобразования без последующего квантования, показал результаты не хуже, а по отдельным параметрам и лучше, чем у классических методов (ДКП, преобразования из стандарта H.264 и т.п.) [4].

В настоящей статье рассматривается возможность применения новых методов обработки (улучшения) цифровых изображений путём переноса их в область преобразования, а после проведения обработки – восстановление с применением операции обратного преобразования.

В работе [3] было показано, что генерация больших (по размеру) целочисленных ортогональных декоррелирующих матриц (ЦОДМ) из малых может производиться двумя способами, которые различаются объединяющей матричной операцией.

Если такой объединительной операцией является тензорное произведение, тогда имеем целочисленные ортогональные декоррелирующие матрицы, являющиеся обобщением матриц Уолша-Адамара. Обобщение касается размерности декоррелирующей матрицы, которая будет являться произвольной, а не натуральной степенью числа два, как для матриц Адамара.

Если же объединяющей является кратно-масштабная операция, то в качестве результата получаем обобщение матриц преобразований Хаара для случая, когда

размерность декоррелирующей матрицы произвольна и не равна исключительно натуральной степени числа два, что характерно для матриц Хаара [3, 5].

Ещё недавно популярные методы Адамара и Хаара перестают использоваться из-за их низкой эффективности. Из созданных на их структурах девяти матриц применяется лишь одна [6]. Эффективность преобразования обычно сравнивают с преобразованием Кархунена-Лозва [7], которым достаточно точно аппроксимируют собственные векторы матрицы Тёплица, что и приводит к использованию чётного косинусного преобразования при обработке фотографических изображений.

Это действительно так. Но, с другой стороны, метод и его обобщения – не тождественны и последние, как раз и создаются, чтобы исправить недостатки их прототипа, сохранив по возможности его положительные свойства. Основными положительными свойствами методов Адамара и Хаара являются их целочисленное представление и возможность генерации больших по размеру матриц из меньших.

Оценка любого метода может быть только многопараметрической. Близкий к идеальному метод устранения пространственной корреляции Кархунена-Лозва практически не реализуем, благодаря его сверхвысокой вычислительной сложности, которая сводит на нет все его достоинства [7]. Требуется компромисс.

Одним из таких компромиссов являются методы на основе ДКП [6]. Эти методы, в основном, вещественные, работающие в плавающей арифметике. Методы декорреляции, основанные на ЦОДМ, являются другим вариантом компромисса.

Дискуссии о преимуществах целочисленной арифметики перед вещественной, являются беспредметными, если не оговаривается вопрос аппаратной реализации алгоритма. Ещё недавно преимущества целочисленной арифметики казались очевидными. Считалось, что одна элементарная операция (сложение или умножение) в плавающей арифметике равнозначна, примерно, 10-ти таким же операциям в арифметике целочисленной. И для целочисленных процессоров, в которых вещественные операции реализованы программно в качестве эму-

ляции, это действительно так. [8] Но сегодня мы имеем резкий рост мощности современных процессоров, что постепенно сглаживает антагонизм арифметик – целочисленной и плавающей [9].

Проблема перерастает в иную плоскость: мощные, универсальные, почти не зависящие от сложности алгоритма, и, следовательно, дорогие, и простые процессоры, дешёвые, не универсальные, направленные на решение какой-то одной конкретной задачи (например, мобильный мониторинг какой-либо местности или объекта) и требующие максимального упрощения алгоритма, что приводит к использованию целочисленной арифметики. Такова цена вопроса. В рамках указанной ситуации можно предполагать, что целочисленные матричные алгоритмы декорреляции цифровых изображений найдут свою нишу и обретут право на жизнь [10].

Всё выше сказанное касалось в большей степени матричных преобразований декорреляции цифрового изображения с целью его последующего квантования и энтропийного сжатия.

Обработка изображения с целью его улучшения – это другая задача. Она может решаться, как без переноса изображения в другую область представления, так и с переносом и последующим восстановлением. При этом для такого переноса иногда достаточны самые простые методы преобразования.

Как показано в работах Е.И. Травиной (ЗАО «МНИТИ») [11], использование для декомпозиции исходного изображения нескольких модифицированных преобразований Хаара с последующей реконструкцией после обработки (улучшения) преобразованного изображения, даёт значительный положительный результат.

Возникает интерес с точки зрения определения возможности обработки (улучшения) цифрового изображения при использовании матриц ЦОДМ.

Ниже приводятся простейшие примеры генерации ЦОДМ по первому и второму указанным направлениям.

Пусть заданы элементарные матрицы ЦОДМ, размерами 2x2 и 3x3.

$$H2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \text{ и } H3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

которые являются ортогональными и декоррелирующими [3, 12]. Ни тензорное произведение, ни кратно-масштабное объединение не являются коммутативными операциями. Поэтому на основании приведённых двух элементарных матриц ЦОДМ, можно построить две пары декоррелирующих матриц размерами 6x6, одна пара по «адамаровскому» типу, а вторая – по «хааровскому».

Приведём пример построения больших (по размеру) матриц из малых по первому, «адамаровскому», направлению.

$$Hd6_1' = H2 \otimes H3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix},$$

$$Hd6_2' = H3 \otimes H2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 & -2 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -2 & 2 & 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

После переупорядочения строк полученных матриц по критерию возрастания их частот [13], получаем:

$$Hd6_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$Hd6_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 & -2 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -2 & 2 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Генерация двух матриц «хааровского» типа выглядит так [5]:

$$H6_1 = \begin{bmatrix} H2 & \otimes & [1 & 1 & 1] \\ I2 & \otimes & [1 & 0 & -1] \\ I2 & \otimes & [1 & -2 & 1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$H6_2 = \begin{bmatrix} H3 & \otimes & [1 & 1] \\ I3 & \otimes & [1 & -1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 & -2 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $I2$ – единичная матрица размером 2x2, а $I3$ – единичная матрица размером 3x3.

Рассмотрим следующие графические сопоставления.

Ниже на рис. 1 сравниваются три ортогональные преобразующие (декоррелирующие) матрицы. Две матрицы ЦОДМ: $H6_1$, $H6_2$ и вещественная матрица ДКП размером 6x6. На рис. 1 соответственно приведены 3 группы функций конечного дискретного ортогонального базиса, каковыми являются строки преобразующих матриц.

Сопоставляемые матрицы имеют вид:

$$Hd6_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix};$$

$$Hd6_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 & -2 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -2 & 2 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$DKP_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.965 & 0.707 & 0.258 & -0.258 & -0.707 & -0.965 \\ 0.866 & 0 & -0.866 & -0.866 & 0 & 0.866 \\ 0.707 & -0.707 & -0.707 & 0.707 & 0.707 & -0.707 \\ 0.5 & -1 & 0.5 & 0.5 & -1 & 0.5 \\ 0.258 & -0.707 & 0.965 & -0.965 & 0.707 & -0.258 \end{bmatrix}$$

Строки расположены по возрастанию частот от 0 до 5-ти [13]. Из рисунка видно, что все три системы близки, и между их соответствующими строками существует ярко выраженная корреляция. Отличие первых двух систем от третьей заключается в их целочисленном представлении.

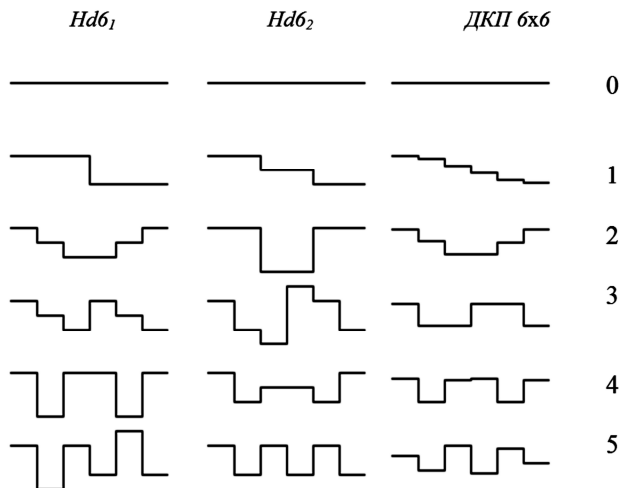


Рис. 1. Графическое сопоставление ортогональных систем ЦОДМ и ДКП размером 6x6

На рис. 2 показаны зависимости строк двух ортогональных преобразующих матриц. (Матрица ЦОДМ $H5$ размером 5x5 и классическая матрица ДКП размером 5x5).

Сопоставляемые матрицы имеют вид:

$$H5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -4 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$DKP_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.951 & 0.587 & 0 & -0.587 & -0.951 \\ 0.809 & -0.309 & -1 & -0.309 & 0.809 \\ 0.587 & -0.951 & 0 & 0.951 & -0.587 \\ 0.309 & -0.809 & 1 & -0.809 & 0.309 \end{bmatrix}$$

О генерации матрицы типа $Hd5$ подробно излагается в работе [1].

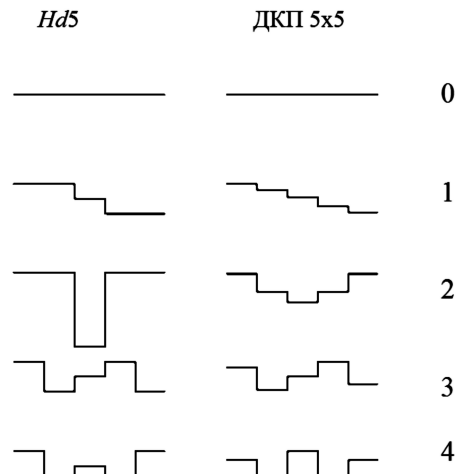


Рис. 2. Графическое сопоставление ортогональных систем ЦОДМ и ДКП размером 5x5

Из графиков (рис. 2) видно, что общая тенденция в поведении строк соответствующей частоты сохраняется.

Если провести непрерывные огибающие для дискретных функций, представленных на рис 1-2, то получатся зависимости, напоминающие полиномы Чебышева (рис. 3) с поправкой на знак и коэффициент усиления по оси Y или же тригонометрические функции тех же частот на том же участке, хотя и с большими поправками. При этом, для графиков одинаковых по частоте чётко прослеживается соответствие между экстремумами и точками перегибов.

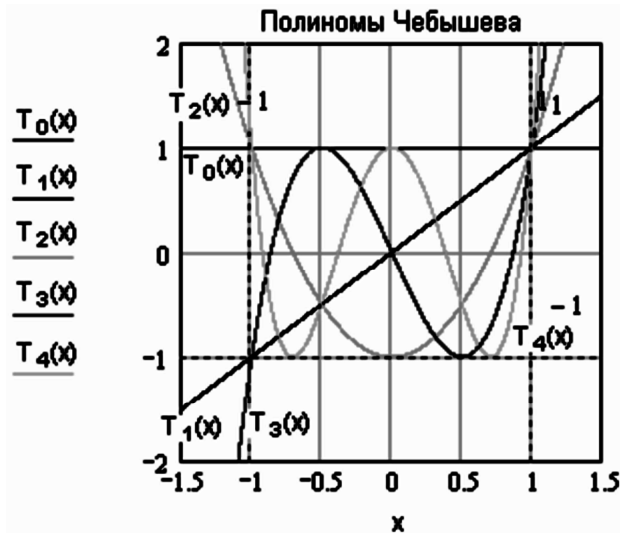


Рис.3. Полиномы Чебышева. Полином Чебышева на интервале $(-1, 1)$ ограничен значениями $(-1, 1)$, а за пределами этого интервала он растет по абсолютной величине быстрее любого другого полинома той же степени, ограниченного тем же условием [14]

К сожалению, в рамках одной статьи трудно привести примеры улучшения цифровых изображений с помощью всего семейства новых матриц или даже нескольких из них. Остановимся на одной. Выбор преобразующей матрицы $Hd6_2$ в каком-то смысле субъективен.

С одной стороны, метод декорреляции на основе этой матрицы показал один из лучших результатов по критерию степени сжатия без квантования, оставив позади даже вещественную декоррелирующую матрицу ДКП, размером 8x8 [4]. Это, как было сказано, относится к другой задаче, но поскольку проводится апробация новых матричных методов, то и этот результат на этапе первоначального поиска необходимо учитывать.

С другой стороны, хотелось бы полнее раскрыть такое свойство нового семейства матриц, как универсальность по отношению к формату изображения. Исходное тестируемое изображение (см. ниже) – это цифровое монохромное изображение размерами 246x246 пикселей. Число 246 не делится ни на 8, ни на 4, следовательно, его невозможно, без изменения формата изображения точно преобразовать методами, основанными на матрицах указанных размерностей, но оно легко преобразуется матрицей размером 6x6. С этой точки зрения было бы нежелательно использовать такие «классические» размеры, как 8x8 или 4x4, внося неизбежные искажения в исходное изображение, а применить именно матрицу размерами 6x6.

И ещё, матрицы $H2$ и $H3$, на основе которых генерируются ЦОДМ размером 6x6, в определённом смысле являются целочисленными представлениями матриц ДКП тех же размеров.

Матрица ДКП, размером 2x2 (назовём её $DCT_{2 \times 2}$) имеет следующий вид:

$$DCT_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos 0 \\ \cos \frac{\pi}{4} & -\cos \frac{\pi}{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}; \quad (8)$$

Матрица ДКП, размером 3x3 (назовём её $DCT_{3 \times 3}$), имеет вид:

$$DCT_3 = \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos 0 & \cos 0 \\ \cos \frac{\pi}{6} & \cos \frac{\pi}{2} & -\cos \frac{\pi}{6} \\ \cos \frac{\pi}{3} & \cos \pi & \cos \frac{\pi}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Если разделить величины элементов второй строки сверху матрицы ДКП размером 2x2 на величину $\sqrt{2}/2$, а значения элементов второй строки сверху матрицы ДКП размером 3x3 на величину $\sqrt{3}/2$, а третью строку этой же матрицы умножить на 2, то мы получим следующие ортогональные декоррелирующие матрицы, которые можно считать целочисленным представлением матриц ДКП:

$$H2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \text{ и } H3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Объединение декоррелирующих матриц ДКП (в том числе и в целочисленном представлении) с помощью тензорного произведения в большую по размерам декоррелирующую ортогональную матрицу с целью изучения её свойств – это ещё одно направление для исследования. Таковы основания, почему для последующего тести-

рования была всё-таки выбрана матрица $Hd6_2$.

Ортогональное матричное преобразование является разложением конечной дискретной функции по конечному ортогональному дискретному базису. Функция в данном случае – это участок строки равный по длине (в пикселях) размерности декоррелирующей матрицы. Отсюда необходимое требование: размерность преобразующей ЦОДМ должна являться делителем длины строки преобразуемого изображения. Поскольку допустима генерация ЦОДМ произвольной размерности [3], декоррелирующую матрицу необходимой величины всегда можно подобрать.

Механизм разложения дискретной функции по ортогональному базису кратко можно представить следующим образом [15]:

Пусть R -преобразующая матрица, размерностью $n \times n$. Каждая i -я строка матрицы R обозначается как $r(i)$, где $i=0, \dots, n-1$. Пусть дискретная преобразуемая функция (участок строки или столбца) представлена в виде вектора:

$$f = (f_0, f_1, f_2, \dots, f_{n-1}). \quad (11)$$

Разложение функции f по базису R будет иметь вид:

$$f = \lambda_0 r(0) + \lambda_1 r(1) + \lambda_2 r(2) + \dots + \lambda_{n-1} r(n-1). \quad (12)$$

Задача преобразования, таким образом, сводится к нахождению вектора

$$\lambda = (\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}). \quad (13)$$

Для нахождения λ_i вычислим скалярное произведение вектора $r(i)$ и вектора f .

Из уравнения (12) имеем следующее:

$$(r(i), f) = \lambda_0 (r(i), r(0)) + \lambda_1 (r(i), r(1)) + \lambda_2 (r(i), r(2)) + \dots + \lambda_{n-1} (r(i), r(n-1)). \quad (14)$$

Поскольку матрица R – ортогональна, то для неё характерно свойство:

$$(r_{(i)}, r_{(j)}) = \begin{cases} |r_{(i)}|^2, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, \quad (15)$$

на основе которого, уравнение (14) сведётся к равенству

$$(r(i), f) = \lambda_i |r(i)|^2, \quad (16)$$

откуда $\lambda_i = (r(i), f) / |r(i)|^2$.

В уравнении (16) $(r(i), f)$ – скалярное произведение i -й строки матрицы R , а f – участок строки (столбца) величиной в n пикселей, а $|r(i)|^2$ – скалярный квадрат i -й строки матрицы R . Поскольку матрица R не вырождена, скалярный квадрат любой её строки – величина больше нуля, поэтому деление в уравнении всегда осуществимо. Очевидно, что обратное преобразование осуществляется с помощью уравнения (12). Операция деления при обратном преобразовании не применяется.

Первоначальный результат одномерного преобразования (по строке или столбцу) представляет собой совокупность подмножеств коэффициентов преобразования, количество которых в подмножестве равно размерности декоррелирующей матрицы. Первый элемент подмножества – коэффициент нулевой частотности, его яркост-

ная величина примерно соответствует пикселю в пространственном представлении, остальные коэффициенты – это более высокие гармоники частотного преобразования.

После матричного преобразования гармоники одинаковых частот группируются в отдельные частотные подблоки. Число таких подблоков будет, очевидно, равно количеству строк декоррелирующей матрицы. Процесс перегруппировки коэффициентов преобразования показан на рис. 4.

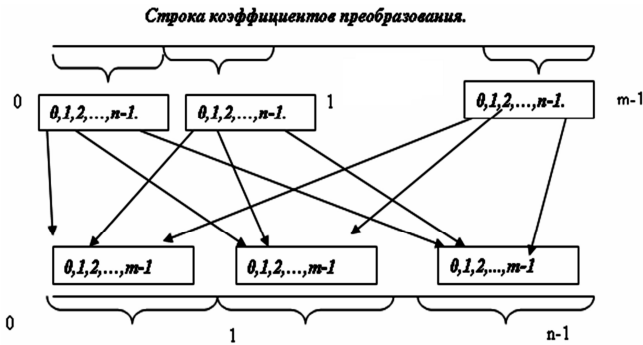


Рис. 4. Перегруппировка коэффициентов преобразования по частотным подблокам

Вслед за преобразованиями по строкам производится преобразование по столбцам, которое полностью аналогично. Единственное возможное отличие – декоррелирующая матрица может быть других размеров в зависимости от высоты столбца изображения в пикселях. В частном случае преобразующие матрицы для декорреляции по строкам и по столбцам могут совпадать.

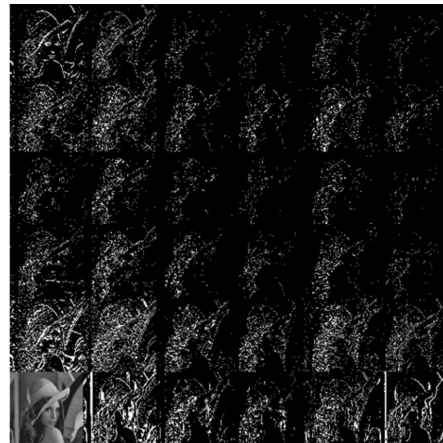
Результат полного (двумерного) преобразования представляет собой набор блоков, количество которых по строкам равно размерности декоррелирующей матрицы по строкам, а количество по столбцам равно размерности декоррелирующей матрицы по столбцам. Если обе матрицы совпадают, то количество блоков одинаково как по строкам, так и по столбцам, и равно размерности декоррелирующей матрицы. Данные блоки располагаются в двумерной частотной системе координат (двумерный спектр), а коэффициенты преобразования внутри каждого блока располагаются в пространственной двумерной системе координат. Подробно алгоритм двумерного матричного преобразования изображения изложен в [1, 4].

Результат действия матричного преобразования приведён на рис. 5. Исходное изображение – цифровое монохромное размерами 246x246 пикселей. Внизу от него на рисунке представлено преобразованное изображение. В левом нижнем углу отчётливо различается блок нулевой частотности, являющийся уменьшенной копией исходного изображения.

Ниже в виде матрицы размером 6x6 показана система двумерных частотных координат, согласно которой располагаются частотные блоки изображения на рис. 5, размером 41x41 пикселей (41x6=246), полученные в результате преобразования исходного изображения с помощью ЦОДМ $Hd6_2$.



Исходное изображение



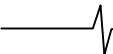
Результат преобразования

Рис. 5. Преобразование с помощью ЦОДМ $Hd6_2$

(5, 0)	(5, 1)	(5, 2)	(5, 3)	(5, 4)	(5, 5)
(4, 0)	(4, 1)	(4, 2)	(4, 3)	(4, 4)	(4, 5)
(3, 0)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)	(3, 4)	(3, 5)
(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)	(2, 4)	(2, 5)
(1, 0)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(1, 4)	(1, 5)
(0, 0)	(0, 1)	(0, 2)	(0, 3)	(0, 4)	(0, 5)

Первая координата – номер строки, вторая – номер столбца этой матрицы.

Обработка изображения заключается в умножении всех коэффициентов преобразования каждого частотного блока на соответствующий каждой двумерной частотной области множитель. При этом, множитель при нулевой частотной области (с координатами 0,0) отвечает за увеличение или снижение яркости, а множители при высокочастотных областях отвечают за детальность и шум, причём, чем выше частота, тем более мелкие детали и элементы шума может усиливать или подавлять соответствующий множитель. Всю систему множителей, необходимых для обработки изображений, можно представить в виде матрицы размером 6x6. Если пространство, в котором расположено изображение, анизотропно, то есть направления по осям OX и OY неравноправны, множители указанной матрицы будут ассиметричны относительно диагонали (0,0)-(5,5), в противном случае они будут симметричны.



Помимо этого следует иметь в виду, что пиксельная система сама по себе анизотропна. Прямые или отрезки, не являющиеся параллельными осям OX и/или OY , а также прямым, расположенным под 45° к последним, представлены ломаными линиями, что при обработке изображения часто приводит к нежелательным артефактам («ступенчатости»). Природа этих артефактов заключается как раз в анизотропности пиксельной системы – в её привязанности к прямоугольной (декартовой) сетке координат.

Обработка в частотной области (особенно, когда она затрагивает высокочастотные гармоники) связана прежде всего с детальностью. Размеры деталей, качество видимости которых регулируется усилением или подавлением коэффициентов соответствующей гармоники, обратно пропорциональны частоте гармоники. Чем выше частота (которая, разумеется, не должна превышать частоты Найквиста), тем более мелкие детали могут стать различимыми при работе с данной гармоникой. Это для одномерного случая. Двумерная система частотных координат отчасти позволяет бороться с анизотропностью деталей. Частота по горизонтали обратно пропорциональна длине, а частота по вертикали высоте детали. Подбирая нужные двумерные частотные координаты и усиливая соответствующие им гармоники, мы повышаем различимость деталей с заданной ориентацией в пространстве, избегая, при правильном подборе коэффициентов усиления, нежелательных геометрических искажений.

Вычислительная сложность обработки преобразованного изображения добавляет всего одну целочисленную операцию. То есть, если мы имеем дело с усилением (яркости, детальности), эта целочисленная операция – умножение, которую можно отнести к элементарным, дополнительные затраты вычислений будут минимальными. Если речь идёт о подавлении коэффициентов преобразования, расположенных в подблоке с одними и теми же двумерными частотными координатами, то эта операция будет делением нацело с округлением. Хотя она и не элементарна, но её часто можно свести к совокупности элементарных операций (умножение, побитовый сдвиг). После усиления или подавления коэффициентов преобразования соответствующих двумерных частотных областей (блоков) производится операция обратного преобразования (восстановления, реконструкции), в результате чего формируется обработанное исходное изображение, яркость и различные уровни детальности которого изменены согласно целям поставленной задачи.

Иногда операцию контрастирования более целесообразно осуществлять после восстановления изображения с изменёнными яркостью и детальностью различных частотных уровней. При этом значение каждого пикселя вычисляется по известной несложной формуле:

$$y'_{ij} = k \cdot (y_{ij} - mid) + mid, \quad (17)$$

где y_{ij} – значение яркости исходного пикселя, mid – среднее значение яркостей всех пикселей изображения, k – коэффициент контрастирования, y'_{ij} – значение яркости пикселя после контрастирования. При этом необ-

ходимо следить, чтобы полученные значения пикселей обработанного изображения не выходили за границы шкалы яркостей (0-255).

Ниже на рис. 6 показан пример обработки изображения указанной матрицей ЦОДМ $Hd6_2$.



Исходное изображение



Обработанное изображение

Рис. 6. Обработка изображения, преобразованного матрицей ЦОДМ Hb_2

Матрица множителей при частотных блоках (см. рис. 5) для обработки изображения, показанной на рис. 6, имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

Коэффициент контрастирования равен двум. На рис. 6. (внизу) показано обработанное изображение (исходное расположено сверху). Явно визуально наблюдается повышение контрастности и детальности (по всем высокочастотным блокам).

Кроме того наблюдаются некоторые слегка заметные артефакты: «ступенчатость» на линиях, не являющихся параллельными осям OX и/или OY , а также прямым, расположенным к ним под 45° . Природа этих артефактов заключается в анизотропности пиксельной системы – в её привязанности к прямоугольной (декартовой) сетке координат.

Для устранения этих артефактов следует уменьшать

величины ряда высокочастотных элементов матрицы множителей и одновременно частично жертвовать полученным усилением детальности.

Пример обработки того же исходного изображения, но при другой матрице множителей показан на рис.7. Новая матрица множителей при частотных блоках (рис. 5), показанной на рис. 7 обработки изображения, следует сразу же за рисунком.



Исходное изображение



Обработанное изображение

Рис. 7. Обработка изображения при другой матрице множителей

$$\begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}$$

Коэффициент контрастирования остаётся прежним равным двум. На рис. 7. (внизу) показано обработанное изображение, а сверху, как и в предыдущем случае, исходное. Наблюдается повышение контрастности и детальности (по всем высокочастотным блокам), хотя и несколько меньше, чем на рис. 6, но артефакты практически отсутствуют. Следовательно, матрица множителей подобрана правильно.

На практике обработка изображений необходима прежде всего в тех случаях, когда исходное изображение визуально трудно воспринимается. Например, пейзаж в тумане или слишком затемнённые изображения и т.п.

Пример такого изображения представлен на рис. 8.



Исходное изображение



Преобразованное изображение

Рис. 8. Преобразование слабо различимого изображения с помощью ЦОДМ $Hd62$

На рис. 9 показано обработанное в частотной области с помощью ЦОДМ $Hd6_2$ изображение, представленное на рис. 8. Матрица множителей для усиления (подавления) коэффициентов преобразования на рис. 8 имеет вид:

$$\begin{bmatrix} 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$



Исходное изображение



Обработанное изображение

Рис. 9. Обработка изображения с плохой видимостью

Необходимо отметить: то, что не вполне подходит для обработки изображений одного типа, вполне приемлемо для обработки изображений другого. Коэффициент контрастирования равен трём.

Кроме обработки в частотной области, усиливающей детальность и контрастирование после восстановления, обработка изображения, показанная на рис. 8, включает в себя повышение яркости. Поэтому яркость обработанного изображения в таком случае следует уменьшить. Это достигается двукратным уменьшением последнего слагаемого в уравнении (17).

$$y'_{ij} = k \cdot (y_{ij} - mid) + mid / 2, \quad (18)$$

Деление на два, как правило, реализуется побитовым сдвигом вправо на 1 бит, то есть эта процедура является элементарной операцией и требует минимума вычислительных затрат.

Заключение

Разработанная в ЗАО «МНИТИ» система генерации ряда семейств целочисленных декоррелирующих матриц произвольных размеров как неортогональных (ЦНОДМ) [12], так и ортогональных (ЦОДМ), показала хорошие результаты при решении задачи сжатия цифровых изображений [1, 4].

Показано, что преобразования целочисленными матрицами действительно позволяют изменять яркость, контрастность и детальность цифрового монохромного изображения.

Подбор основных параметров обработки – матрицы множителей, коэффициента контрастирования и яркостной составляющей производится эмпирически.

Выбор преобразующей матрицы – «полуэмпирический». Проведено графическое сопоставление дискретных конечных функций разложения по ортогональному базису, которыми являются строки матрицы ЦОДМ, с другими известными методами, на основании чего, сделан выбор в пользу матрицы $Hd6_2$.

Большой спектр полученных после преобразования гармоник открывает широкие возможности для дальнейших исследований, которые вероятно помогут установить точные взаимосвязи между структурой изображения и параметрами его матричной обработки.

Литература

1. Евстигнеев В.Г., Бондаренко А.В., Кошарновский А.Н., Лебедев В.Д., «Дихотомические и недихотомические методы де-

корреляции цифровых изображений», «Системы и средства связи, телевидения и радиовещания», М., 2010, выпуск 1, 2, 6 с.

2. Вилкова Н.Н., Евстигнеев В.Г., Лебедев В.Д., Устройство для декорреляции цифровых изображений с использованием целочисленных ортогональных декоррелирующих матриц в системах компрессии видеоизображений, Патент РФ на изобретение № 2430419, Приоритет 10 июня 2010 г, Бюл. № 27., 12 с.

3. Бондаренко А.А., Евстигнеева О.В., Кошарновский А.Н., Лебедев В.Д., Способ формирования целочисленных ортогональных декоррелирующих матриц и устройство для его осуществления, Патент РФ на изобретение № 2509364, Приоритет 15 мая 2012 г., Бюл. № 17, – 9 с.

4. Евстигнеев В.Г., Лебедев В.Д., Куликова Е.И., НИР «Кедр», «Исследование и разработка новых принципов и алгоритмов декорреляции и восстановления цифровых телевизионных изображений произвольных форматов на основе нового класса целочисленных ортогональных декоррелирующих матриц произвольных размеров, новых методов и алгоритмов их генерации», М, ЗАО «МНИТИ», 2010 г., – 64 с.

5. Дагман Э.Е., Кухарев Г.А. «Быстрые дискретные ортогональные преобразования», издательство «Наука», Новосибирск, 1983 г., – 230 с.

6. Дворкович В.П., Дворкович А.В., «Цифровые видеоинформационные системы (Теория и практика)», Техносфера, 2012, – 1008 с.

7. Сэломон Д. «Сжатие данных, изображений и звука», ТЕХНОСФЕРА, Москва, 2004 г., – 365 с.

8. Поспелов Д.А. «Арифметические основы вычислительных машин дискретного действия», «Высшая Школа», М.: – 1970.

9. Папернов А.А. «Логические основы цифровых машин и программирования», «НАУКА», М., 1968., – 591 с.

10. Вилкова Н.Н., Евстигнеев В.Г., Сухачев А.Б., Шапиро Б.Л., Лебедев В.Д., «Некоторые вопросы повышения эффективности передачи видовой информации в комплексах управления беспилотными летательными аппаратами», М., «ВЕГА», 2012 г., – 13 с.

11. Травина Е.И. «Учшение ситуационной осведомленности оператора в бортовых системах наблюдения», М.: ФНПЦ ОАО «Концерн радиостроения «Вега», 2011, – С.53.

12. Лебедев В.Д. О неортогональных преобразованиях цифрового изображения, Техника средств связи, Серия Техника телевидения, М., 2013, – С. 98-108.

13. Хармут Х.Ф. «Передача информации ортогональными функциями», М., издательство «Связь», 1975., – 272 с.

14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974., – 720 с.

15. Головина Л.И. Линейная алгебра и некоторые её приложения», М., «Наука», 1979., – 392 с.

IMAGES IMPROVEMENT WITH INTEGER ORTHOGONAL TRANSFORMING MATRICES

Sheremet I.A., Full D., Rykin A.P., Lebedev V.D.

In this paper are described approaches for solving the task of improvement of digital images by transforming and reconstruction them with new class of integer orthogonal transforming matrices.