

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Вилкова Н.Н., Генеральный директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н.

Евстигнеев В.Г., начальник отдела ЗАО «МНИТИ», д.т.н., evstigneev_mniti@mail.ru, (495) 460-04-88

Зубарев Ю.Б., советник Генерального директора ЗАО «МНИТИ», д.т.н., член-корр. РАН

Минаев В.Н., директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, д.т.н.

Ключевые слова: декорреляция, матрица, стандарты H.261, H.263, MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, H.264, JPEG-2000

Большинство стандартов видеокодирования, реализованных после 1990 года, основаны на некоторой единой модели видеокodeка, которая включает оценку движения и компенсацию высоких частот (обозначается DPCM – дифференциальная кодово-импульсная модуляция), стадии преобразования, квантования и энтропийного сжатия. Такая конструкция называется гибридной моделью DPCM/DCT [1]. К стандартам, работающим по указанной схеме, относятся H.261, H.263, MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, H.264.

Таким образом, основные кодеки видеоданных состоят, как правило, из трёх самостоятельных этапов (стадий): межкадровая декорреляция (декорреляция во времени), внутрикадровая декорреляция (декорреляция в пространстве) и энтропийное сжатие. Причём, основополагающие принципы реализации каждого из указанных трёх этапов компрессии-декомпрессии могут быть самые разные, важно чтобы они давали соответствующий положительный результат. Причем различные варианты реализации каждого из этапов взаимозаменяемы. Последнее обстоятельство согласуется с утверждениями Яна Ричардсона [1].

Проблему хорошего энтропийного сжатия к настоящему времени можно считать практически решённой. Так, адаптивное побитовое контекстно-ориентированное арифметическое кодирование в стандарте JPEG-2000 позволяет сжимать данные до предельной величины, которая рассчитывается исходя из энтропии этих данных.

Этого нельзя сказать об этапе пространственной декорреляции, о путях реализации которого по настоящее время продолжают споры. На сегодняшний день существует множество самых разных методов и подходов к решению этой задачи. Наиболее распространённые основаны на преобразовании исходных данных, заключающемся в переводе их из пространственной области в пространственно-частотную. Первый подход к решению этой проблемы был применён в стандартах JPEG, MPEG-2, MPEG-4, H.264. Пространственная и частотная составляющие этапа преобразования в указанных стандартах осуществляются раздельно друг от друга: пространственная реализуется путём разбиения исходного

Представлен аналитический обзор классических и современных подходов к решению задачи декорреляции цифровых изображений, проведен сравнительный анализ методов декорреляции цифровых изображений, применяемых в стандартах H.261, H.263, MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, H.264, JPEG-2000: констатировано, что возможности ДКП в решении задачи декорреляции цифровых изображений практически исчерпаны и, что решение задачи декорреляции цифровых изображений любых размеров необходимо искать в применении новых технологий цифрового телевидения, основанных на использовании декоррелирующих ортогональных целочисленных матриц.

изображения на квадратные подобласти (блоки), а частотная – с помощью дискретного косинусного преобразования (ДКП) значений пикселей внутри этих блоков. Очевидно, что данный подход явно искусственный.

Появившийся позднее кратно-масштабный анализ (КМА) и тесно связанные с ним вейвлет-преобразования предложили свой подход к решению задачи декорреляции видеоизображений. Обе составляющие пространственно-частотного преобразования реализуются одновременно в рамках единой методологии. Данный подход, в частности, использовали создатели стандарта JPEG-2000. Этот подход уже можно считать естественным и органичным.

Стандарт JPEG-2000 отдал предпочтение второму подходу. Однако создатели стандартов сжатия видеоданных, таких как MPEG-2, MPEG-4, H.264, пошли путём улучшения и модернизации первого подхода, основанного на ДКП.

Преобразование ДКП – это частный случай дискретного преобразования Фурье (ДПФ). ДПФ – универсальный метод, который впервые был применён для перевода данных (изображение, звук) из пространственно-временной области в частотную. Его недостатками являются избыточность и высокая вычислительная сложность. Однако такая сложность обеспечивает резервы для его модернизации и упрощения.

При реализации пространственной составляющей преобразования, основанного на ДКП, имеются трудности. В частности, существует ограничение, налагаемое на размеры блоков разбиения. Увеличение числа пикселей в блоке приводит к уменьшению корреляционной зависимости между ними и, следовательно, ухудшению результатов декорреляции при кодировании. Из литературы [2] известно, что на практике верхней границей величины блоков разбиения является размерность 8×8 .

Именно такие размеры блоков можно видеть в большинстве методов, основанных на ДКП. Считается, что декорреляция блоков, превосходящих по размерам данную величину, уже не имеет смысла. Но в этом случае данная размерность - наихудшая из возможных. Наилучшей будет та, где корреляция между пикселями максимальна, то есть 2×2 .

Создатели стандарта H.264 подвергли метод, основанный на ДКП, значительной модернизации, достигнув в этом процессе действительно больших успехов. Они уменьшили вдвое (по длине и высоте) размеры блоков, внутри которых производится ДКП, что повысило корреляцию между преобразуемыми пикселями. Помимо этого, им удалось реализовать ряд вычислений над числами в целочисленном формате, которые ранее представлялись в форме с плавающей запятой. Некоторые целочисленные элементы матрицы ДКП были заменены ими на приближённые. Полученный новый метод уже нельзя назвать методом ДКП, хотя он работает по принципу ДКП, будучи его хорошей модернизацией. Положительные результаты, полученные создателями стандарта H.264 в смысле минимизации вычислительной сложности этапа пространственной декорреляции, основанном на принципе ДКП, очевидны. Однако, как отмечают многие, данный стандарт отличается отсутствием гибкости. И, вероятно, дальнейшая оптимизация этапа пространственной декорреляции на основе ДКП уже невозможна. Требуется искать новые подходы к решению данной проблемы. Несмотря на это, как считает Ян Ричардсон [1], реклама стандарта H.264 полна оптимизма и сулит ему долговременный успех в будущем.

Создателям будущих стандартов при реализации этапа декорреляции в кодеках видеоданных вероятно придётся уже полностью отказаться от попытки решить эту проблему на основе ДКП. Замена искусственного метода перевода исходных данных в пространственно-частотную область на естественный уже происходит. Вместо морально устаревающих ДКП всё больше используются дискретные вейвлет-преобразования (ДВП), возникшие на основе теории кратно-масштабного анализа. Преобразования ДВП успешно применены в стандарте JPEG-2000 и дали хороший результат как по степени сжатия, так и по качеству восстановленного изображения.

Достоинства методов пространственной декорреляции изображений, построенных на основе теории кратно-масштабного анализа (пирамидальные преобразования, субполосное кодирование, вейвлет-преобразования и т.д.), в настоящий момент широко известны и описаны в литературе.

К их недостаткам следует отнести, прежде всего, отсутствие универсальности. Большинство этих методов требуют обязательного равенства длины и высоты исходного изображения натуральной степени числа два (дихотомический принцип). На практике при обработке видеоизображений, размеры которых отличаются от натуральных степеней числа два, пользуются искусственными приёмами, приводящими к повышению затратности процесса декорреляции. Это – существенное ограничение в выборе формата исходного изображения. В малочисленной литературе можно найти примеры крат-

но-масштабного трёхполосного кодирования [3].

Решение же задачи декорреляции исходных изображений естественным методом любых заданных размеров в рамках единой идеологии необходимо искать в применении декоррелирующих ортогональных матриц произвольного размера. Теория субполосного кодирования допускает это, но на практике такой подход почему-то не находит применения. Большинство кратно-масштабных методов декорреляции строятся по дихотомическому принципу, редко по трихотомическому. В основе многих дихотомических методов явно или неявно лежит классическая матрица Адамара, размером 2×2 . Декоррелирующие матрицы больших размеров строятся, как правило, методом ДКП или близкими к нему методами, оперирующими трансцендентными (тригонометрическими) функциями. Помимо высокой вычислительной сложности это приводит ещё к существенному уменьшению пространственной корреляции пикселей по мере увеличения размеров декоррелирующей матрицы. Последнего можно избежать, если декоррелирующими матрицами переводить значения пикселей внутри блока разбиения не в частотную (как ДКП), а в пространственно-частотную область (как ДВП). Матрица Хаара произвольного размера, равного натуральной степени числа два, например, даёт хорошую степень декорреляции, несмотря на то, что её размеры многократно превосходят «предельно допустимое значение» 8×8 . Описаний простых в применении декоррелирующих систем многополосного кодирования, охватывающих произвольные размеры исходного изображения, и схем генерации таких систем, применяемых на практике при работе с реальными видеоданными, в современной литературе не встречается.

Так обстоят дела на практике. Теория же говорит об обратном, давно существуют обобщения методов Адамара и Хаара, являющиеся типичными дихотомическими преобразованиями, позволяющие строить ортогональные (или унитарные, если речь идёт о комплексной области) матрицы и не только дихотомическими методами.

Матрицей Адамара порядка $N=2^n$ называется квадратная матрица размером $N \times N$ с элементами ± 1 , так, что

$$H_N \times H_N^T = N \cdot I_N, \quad (1)$$

где I_N – единичная матрица, а T – знак транспонирования [4].

Матрицу Адамара порядка N можно построить рекурсивно по схеме [4]:

$$H_N = \begin{bmatrix} H_{N/2} & H_{N/2} \\ H_{N/2} & -H_{N/2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Приведённое выражение можно записать в терминах матричных операций [5]:

$$H_N = H_2 \otimes H_{N/2}, \quad (3)$$

где \otimes – символ так называемого кронеккерсовского (или тензорного) произведения, которое определяется следующим образом:

Если A и B – квадратные матрицы соответственно порядков m и n , то кронеккерсовское произведение матриц обозначается символом \otimes и записывается в виде

$A \otimes B$. Элементы матрицы, получившиеся в результате кронеккеровского умножения матриц A и B , равны $a_{ij}B$, то есть

$$A \otimes B = \{a_{ij}B\}. \quad (4)$$

Матрица H_2 в (3) – простейшая матрица Адамара, размером 2×2 , имеющая вид:

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Как видно из определения кронеккеровского произведения, матрицы-сомножители не обязательно должны быть квадратными, а могут иметь произвольные прямоугольные размеры.

Из приведённой схемы построения матриц Адамара больших порядков видно, что их размеры обязательно должны выражаться натуральными степенями числа два. Существуют теоретические обобщения, которые позволяют отойти от этого требования. Это – так называемые матрицы Виленкина. Последняя строка матрицы H_2 в (5) является множеством двух корней квадратных из единицы. Если вместо этого взять три корня кубических из единицы, можно построить матрицу H_3 , размерами 3×3 , имеющую вид:

$$H_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & j & j^2 \\ 1 & j^2 & j \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $j = \sqrt[3]{1}$ или по формуле Эйлера:

$$j = e^{2\pi/3i} = \cos 2\pi/3 + i \cdot \sin 2\pi/3, \quad (7)$$

Матрицы, указанного типа, именуется матрицами дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ) [5], и, объединяясь друг с другом с помощью операции кронеккеровского произведения, образуют систему матриц Виленкина, каждая из которых является ортогональной (для области комплексных чисел – унитарной).

Классические матрицы Хаара строятся также по рекуррентной схеме [5]:

$$A_{2N} = \begin{bmatrix} A_N & \otimes & \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \\ I_N & \otimes & \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

исходная матрица A_2 – это уже упомянутая матрица Адамара, размером 2×2 , имеющая вид (5). A_N в (8) – текущая матрица Хаара, размером $N \times N$, где $N=2^n$ (n – номер текущей итерации), A_{2N} в (8) – новая матрица Хаара, размером $2N \times 2N$, полученная на текущей итерации, I_N в (8) – единичная матрица размером $N \times N$.

Для $N=2$, например, матрица I_2 имеет следующий вид:

$$I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Из итерационной формулы (8) видно, что матрицы-строки, умножаемые справа кронеккеровским произведением на матрицы A_N и I_N , являются строками матрицы Адамара H_2 , которые следуют одна за другой в их естественном порядке.

Из указанной итерационной формулы (8) также видно, что размеры матриц Хаара могут равняться только

натуральной степени числа 2.

Итерационная формула (8) формирования матриц Хаара легко обобщается и на многомерный случай. В основе указанной итерационной формулы лежит матричная операция, известная в литературе [5], которую условно называют кратно-масштабным объединением (КМО). Эта операция определяется следующим образом.

Пусть даны две квадратные ортогональные (или унитарные) матрицы A – размером $p \times p$ и B – размером $q \times q$. Кратно-масштабным объединением этих матриц будем называть матрицу, полученную следующим образом:

$$A \circ B = \begin{bmatrix} A \otimes (B)_0 \\ I_p \otimes (B)_1 \\ I_p \otimes (B)_2 \\ - & - & - \\ I_p \otimes (B)_k \\ - & - & - \\ I_p \otimes (B)_{q-1} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где A – первая матрица кратно-масштабного объединения, $(B)_k$ – k -я строка второй матрицы кратно-масштабного объединения (то есть матрицы B), $k = 0, 1, 2, \dots, q-1$,

I_p – единичная матрица, размером $p \times p$,

\otimes – символ кронеккеровского произведения,

\circ – условный символ кратно-масштабного объединения двух ортогональных (или унитарных) матриц.

Размер матрицы-результата (10) будет равен произведению размеров объединяемых матриц (A и B), то есть $(pq) \times (pq)$.

Если матрицы A и B относятся к системе матриц ДЭФ, то их кратно-масштабное объединение будет одной из комплексных матриц Хаара (другими словами матриц Виленкина-Хаара).

Схема формирования матриц Виленкина (или матриц Виленкина-Хаара) состоит из многократно повторяющегося действия (кронеккеровского произведения или кратно-масштабного объединения) над множеством элементарных матриц (в данном случае – матриц ДЭФ).

Матрицы ДЭФ строятся из комплексных чисел. Работать с ними неудобно. Если заменить их на целочисленные ортогональные матрицы [6], размеры которых являются простыми числами натурального ряда, и известен алгоритм генерации всех целочисленных ортогональных матриц с указанными размерами, то пользуясь схемой построения матриц Виленкина и Виленкина-Хаара, заменив лишь базисные матрицы с комплексных на целочисленные, можно строить целочисленные ортогональные матрицы произвольных размеров.

Классические матрицы Адамара, размерами равными произвольной натуральной степени числа два, строятся по итерационной схеме (3), путём кронеккеровского (тензорного) умножения матрицы, полученной на предыдущей итерации, на элементарную матрицу Адамара, размером 2×2 (5), которая одновременно является исходной в итерационном процессе.

Классические матрицы Хаара строятся аналогично, только вместо кронеккеровского произведения используется операция КМО.

Обе эти операции обладают следующими свойствами:

1) объединение с их помощью двух ортогональных декоррелирующих матриц даёт в результате новую ортогональную декоррелирующую матрицу; если первые строки объединяемых матриц состоят из одних единиц, то и первая строка составной матрицы состоит из одних единиц;

2) обе операции некоммутативны, что открывает возможность генерации различных ортогональных декоррелирующих матриц одного и того же размера. Такая многовариантность создаёт возможность оптимального выбора наиболее подходящей для решения данной конкретной задачи матрицы.

3) размер ортогональной декоррелирующей матрицы-результата равен произведению размеров двух объединяемых более малых ортогональных декоррелирующих матриц.

Если размер исходного изображения по длине выражается целым составным числом, то, согласно «основной теореме арифметики», его можно представить в виде произведения простых меньших по величине чисел в целых неотрицательных степенях. Следовательно, согласно третьему свойству, декоррелирующая матрица, необходимая для одномерного преобразования исходного изображения по длине, может быть построена из набора элементарных матриц, размеры которых выражаются соответствующими простыми числами. Матрицы для вертикального преобразования строятся по аналогичной схеме. Для двумерного преобразования необходимы две матрицы, одна для преобразования по горизонтали, другая - по вертикали.

Второе свойство хорошо использовать для передачи конфиденциальной информации. Для правильного декодирования сжатого изображения необходимо знать порядок и структуру элементарных матриц, из которых построена декоррелирующая матрица. Это является как бы ключом, не зная которого затруднительно получить доступ к закодированной видеoinформации.

В середине прошлого века советскими учёными Н.Я. Виленкиным, Л.С. Понрягиным и др. была разработана чёткая система генерации ортогональных (унитарных) матриц произвольных размеров, элементы которых выражаются комплексными числами. Использование таких систем на практике – затруднительно. Для устранения этого недостатка необходима замена способа формирования элементарных матриц. Требования к этим матрицам должны быть следующими: они должны быть ортогональными и декоррелирующими; их элементы должны быть целочисленными; их размеры должны равняться простым числам (причём метод их генерации должен охватывать всю совокупность простых чисел их размеров); они должны переводить исходные данные в пространственно-частотную область, то есть быть «хааровскими», а не «адамаровскими» (следовательно, построение такой системы на основе ДКП и близких к нему методов неприемлемо); первая строка всех этих матриц должна состоять из одних единиц.

Методы формирования системы ортогональных матриц с заданными свойствами, разработанные в ЗАО «МНИТИ» [5], являясь первым этапом новых технологий цифрового телевидения, позволяют отказаться от традиционного ДКП – декорреляции видеоизображений и перейти к технологии матричной декорреляции. Новые технологии декорреляции цифровых видеоизображений просты и универсальны и могут заменить существующие методы реализации этапа пространственной декорреляции в кодеках всех стандартов цифрового телевидения. Положительные результаты такой замены очевидны: работа с целыми числами, обработка изображений произвольных размеров и форматов в рамках единой идеологии без искусственных приёмов, многовариантность как основа выбора оптимального способа преобразования изображений в соответствии с конкретно поставленной задачей.

В настоящее время в ЗАО «МНИТИ» ведётся работа по патентованию новых алгоритмов и способов декорреляции цифровых изображений для дальнейшего их использования при модернизации кодеков в стандартах MPEG-2, MPEG-4 и H.264. Это может обеспечить приоритет запатентованной российской системе при работе с цифровыми телевизионными изображениями произвольных форматов с использованием отечественной электронной компонентной базы, а также уменьшить требования к производительности БИС, реализующих кодеки стандартов MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, H.261, H.263 и H.264 на 24÷50 %.

Более детальное изложение результатов использования новых технологий в решении задачи декорреляции цифровых телевизионных изображений можно найти в публикациях [6, 7, 8].

Выводы

В исследованиях проводимых в ЗАО «МНИТИ» по проблеме новых технологий цифрового телевидения решаются следующие задачи:

- оценка сложности и затратности известных алгоритмов декорреляции цифровых телевизионных изображений;
 - разработка и анализ новых алгоритмов формирования целочисленных ортогональных декоррелирующих матриц;
 - разработка и анализ новых алгоритмов декорреляции цифровых телевизионных изображений на основе целочисленных ортогональных декоррелирующих матриц;
 - оценка сложности новых алгоритмов декорреляции цифровых телевизионных изображений;
 - программное моделирование новых методов и алгоритмов декорреляции цифровых телевизионных изображений;
 - патентование матричных способов декорреляции цифровых изображений и способов формирования целочисленных ортогональных матриц различного назначения, размеров и декоррелирующих качеств;
 - обеспечение конфиденциальности цифровых телевизионных изображений некриптографическими методами, передаваемых по незащищенным каналам связи.
- Сопоставление отечественных матричных способов декорреляции цифровых изображений со способами

декорреляции, применяемыми в стандарте H.264, защищенными патентами США, показывает преимущества разработок ЗАО «МНИТИ», требующих производительность процессорной БИС, по крайней мере, от 24 до 50 % меньше, чем в стандарте H.264.

Литература

1. Ян Ричардсон «Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения», ТЕХНОСФЕРА, Москва, 2005 год
2. Д. Сэломон. Сжатие данных, изображений и звука. – ТЕХНОСФЕРА, Москва, 2004.
3. А.В. Гельманшин, В.П. Дворкович «Новый подход к использованию вейвлет-фильтров при обработке изображений», Цифровая обработка сигналов № 1/2008, Москва, стр. 37-42.
4. Э.Е. Дагман, Г.А. Кухарев. Быстрые дискретные ортогональные преобразования. – Издательство «НАУКА», Сибирское отделение РАН Новосибирск, 1983.
5. В.Г. Евстигнеев, А.В. Бондаренко, В.Д. Лебедев. «Формирование ортогональной системы преобразования изображений с размерностью, отличной от натуральной степени числа два», журнал «Вопросы оборонной техники». Научно-технический сборник, серия 3, выпуск 6 (394), 2008 г., Москва, стр. 39-50.
6. В.Г. Евстигнеев, А.В. Бондаренко, А.Н. Кошарновский, В.Д. Лебедев «Современные подходы к решению задачи декорреляции цифровых изображений» «Техника средств связи», серия «Техника телевидения», юбилейный выпуск, 2010 г., Москва, стр. 26.
7. В.Г. Евстигнеев, А.В. Бондаренко, А.Н. Кошарновский, В.Д. Лебедев «Дихотомические и недихотомические методы декорреляции цифровых изображений». «Системы и средства связи, телевидения и радиовещания». ISSN 2079-6137 Выпуск 1,2 2010 г., Москва., стр. 44.
8. В.Г. Евстигнеев, А.В. Бондаренко, А.Н. Кошарновский, В.Д. Лебедев «Оценка вычислительной сложности решения задачи декорреляции цифровых монохромных изображений». «Системы и средства связи, телевидения и радиовещания». ISSN 2079-6137 Выпуск 1,2 2010 г., Москва, стр. 50.



TEXAS INSTRUMENTS INC. выпускает новый процессор платформы **DaVinci TMS320DM8168**. Процессор открывает новые горизонты вычислительных мощностей, обеспечивая 4-кратное увеличение производительности в формате HD, реализацию перспективных кодеков и видеоакселераторов, обладает высокой степенью интеграции при низком энергопотреблении.

Процессор строится на базе ядра общего назначения ARM Cortex A-8 с частотой 1 ГГц и DSP-ядра с плавающей точкой C674x+ с частотой 1 ГГц.

Подробнее: <http://www.ti.com>

TEXAS INSTRUMENTS INC. представляет новую линейку микроконтроллеров **TMS570** для систем безопасности транспортных средств. Контроллеры используют процессорное ядро ARM® Cortex™-R4F с плавающей точкой, работающее на частоте 160 МГц.

Подробнее: <http://www.ti.com/ww/en/mcu/tms570/index.shtml>



TEXAS INSTRUMENTS INC. предоставляет разработчику систем на базе DSP возможность использования нового бесплатного программного инструментального средства **C6EZFlo** графической разработки приложений для процессоров C6000™.

Подробнее: <http://www.ti.com/c6flo-etechtf>