

КОМБИНИРОВАННОЕ ЭНТРОПИЙНОЕ КОДИРОВАНИЕ БИТОВЫХ ПЛОСКОСТЕЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Б.Дж. Садик, В.Ю. Цветков, М.Н. Бобов

Разработаны метод, алгоритмы и структуры кодеров сжатия мультиспектральных изображений, основанные на комбинированном энтропийном кодировании их битовых плоскостей. Показана эффективность предложенных решений по сравнению с обычным энтропийным кодированием.

Введение

Современные тенденции развития бортовой аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) связаны с повышением ее пространственного и спектрального разрешения, а также увеличением битовой глубины изображений. Перспективные разработки ориентированы на формирование с частотой около 1 Гц мультиспектральных изображений (МСИ), включающих несколько сотен спектральных каналов, каждый из которых содержит 16-ти разрядное изображение размером около 2000x4000 пикселей. В таких условиях скорость формирования данных ДЗЗ может достигать 40 Гбит/с. Это является серьезной проблемой, как для передачи, так и для хранения МСИ, т.к. требует согласования скорости формирования МСИ с пропускной способностью радиоканала «борт-Земля» (ограничен в настоящее время 10 Гбит/с) и емкостью бортовой памяти (10 минут записи МСИ требуют около 3 Тбайт памяти). Еще одна серьезная проблема состоит в сжатии МСИ. С одной стороны необходимо, как правило, сжатие МСИ без потерь. С другой стороны скорость сжатия должна быть согласована со скоростью формирования МСИ, что требует использования быстродействующих алгоритмов эффективного кодирования.

Целью работы является разработка метода, алгоритма и структуры кодера сжатия МСИ, ориентированных на бортовую реализацию.

Методы энтропийного кодирования

Широко используются несколько основных алгоритмов сжатия изображений без потерь: RLE, Хаффмана, LZ, LZW.

1) Сжатие способом кодирования серий (RLE) – Настоящий алгоритмов сжатия изображений представляет собой кодирование серий последовательностей (Run Length Encoding-RLE). Сжатие способом кодирования серий представляет собой замену серий (цепочек) повторяющихся байтов (их последовательностей) на один кодирующий байт и счетчик числа их повторений [1, 2, 6]. Решение проблемы достигается обычно простановкой меток вначале кодированных цепочек. Такими метками могут быть, например, характерные значения битов в первом байте кодированной серии, значения первого байта кодированной серии и т.п. Лучший, средний и худший коэффициенты сжатия - 1/32, 1/2, 2/1 [3].

2) Сжатие по методу Хаффмана – сжатие изображений, заключающееся в том, что символы текста заменяются цепочками бит разной длины. Эта

кодировка чаще других употребляется для текстовых файлов. Этот метод гарантирует однозначное построение кода с наименьшим для данного распределения вероятностей средним числом символов на букву [4]. В основе метода лежит учет частоты появления одинаковых байт в изображении (применительно к сжатию изображений). При этом пикселям исходного изображения, которые встречаются большее число раз, сопоставляется код меньшей длины, а встречающимся редко – код большей длины (т.е. формируется префиксный код переменной длины). Для сбора статистики требуется два прохода по файлу – один для просмотра и сбора статистической информации, второй – для кодирования. Коэффициенты сжатия: 1/8, 2/3, 1 [1].

3) Алгоритм Лемпеля-Зива (LZ-compression) – Суть данного алгоритма состоит в следующем: упаковщик постоянно хранит некоторое количество последних обработанных символов в буфере. По мере обработки входного потока вновь поступившие символы попадают в конец буфера, сдвигая предшествующие символы и вытесняя самые старые. Размеры этого буфера, называемого также скользящим словарем, варьируются в разных реализациях кодирующих систем. Затем, после построения хеш-таблиц, выделяют (путем поиска в словаре) самую длинную начальную подстроку входного потока, совпадающую с одной из подстрок в словаре, и выдают на выход пару (length, distance), где length – длина найденной в словаре подстроки, а distance – расстояние от нее до входной подстроки (то есть фактически индекс подстроки в буфере, вычтенный из его размера). Если такая подстрока не найдена, в выходной поток просто копируется очередной символ входного потока [1, 5].

4) Алгоритм Лемпеля-Зива-Велча (Lempel-Ziv-Welch-LZW) – Алгоритм Лемпеля-Зива-Велча объединяет довольно большое семейство LZW – подобных алгоритмов, которые различаются, например, методом поиска повторяющихся цепочек [2]. Коэффициенты сжатия: 1/1000, 1/4, 7/5. Коэффициент 1/1000 достигается только на одноцветных изображениях размером больше 4 Мб. Ситуация, когда алгоритм увеличивает изображение, встречается крайне редко. Сжатие обеспечивается за счет одинаковых подцепочек в потоке. При условии оптимальной реализации операции поиска строки в таблице настоящий метод является почти симметричным. Алгоритм преобразует поток символов на входе в поток индексов ячеек словаря на выходе. Он реализован в форматах GIF, TIFF и TGA.

Структура и характеристики мультиспектральных изображений

МСИ $P = \{P(i)\}_{(i=0, N_C-1)}$ представляет собой совокупность N_C спектральных каналов $P(i) = \|p(y, x, i)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ размером $Y \times X$ пикселей и битовой глубиной D_B . Каждый спектральный канал соответствует определенному участку спектра и формируется из Фурье-интерферограммы.

Проведены исследования пиксельной и поразрядной межканальной корреляции МСИ, 24-й и 64-й спектральные каналы которого представлены на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1 – Спектральные каналы МСИ:
а – 24-й; б – 64-й;

В качестве критериев пиксельной корреляции i -го $P(i)$ и j -го $P(j)$ каналов МСИ использованы значения средней ошибки $ME_p(i, j)$, вычисляемой с помощью выражения

$$ME_p(i, j) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |p(y, x, i) - p(y, x, j)|}{YX},$$

где $||$ – операция по модулю.

В качестве примера на рис. 2,а приведена зависимость $ME_p(i, j)$ от номера спектрального канала при $i = 24$ и $j = \overline{0, N_c - 1}$, $N_c = 68$.

В качестве критериев поразрядной корреляции b -х битовых плоскостей i -го $P(i)$ и j -го $P(j)$ каналов МСИ использованы значения средней ошибки $ME_B(b, i, j)$, вычисляемой с помощью выражения

$$ME_B(b, i, j) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (p(y, x, b, i) \oplus p(y, x, b, j))}{YX},$$

где \oplus – операция «Исключающее ИЛИ».

В качестве примера на рис. 2,б – г приведены зависимости $ME_B(b, i, j)$ от номера спектрально канала при $i = 24$, $b = \{1, 5, 0\}$ и $j = \overline{0, N_c - 1}$, $N_c = 68$.

Как следует из рис. 2, битовые плоскости МСИ имеют различные корреляционные свойства. Причем, старшие плоскости определяют общий вид функции распределения ошибки, в то время как младшие плоскости

практически не коррелируют, но мало влияют на общий вид функции распределения ошибки.

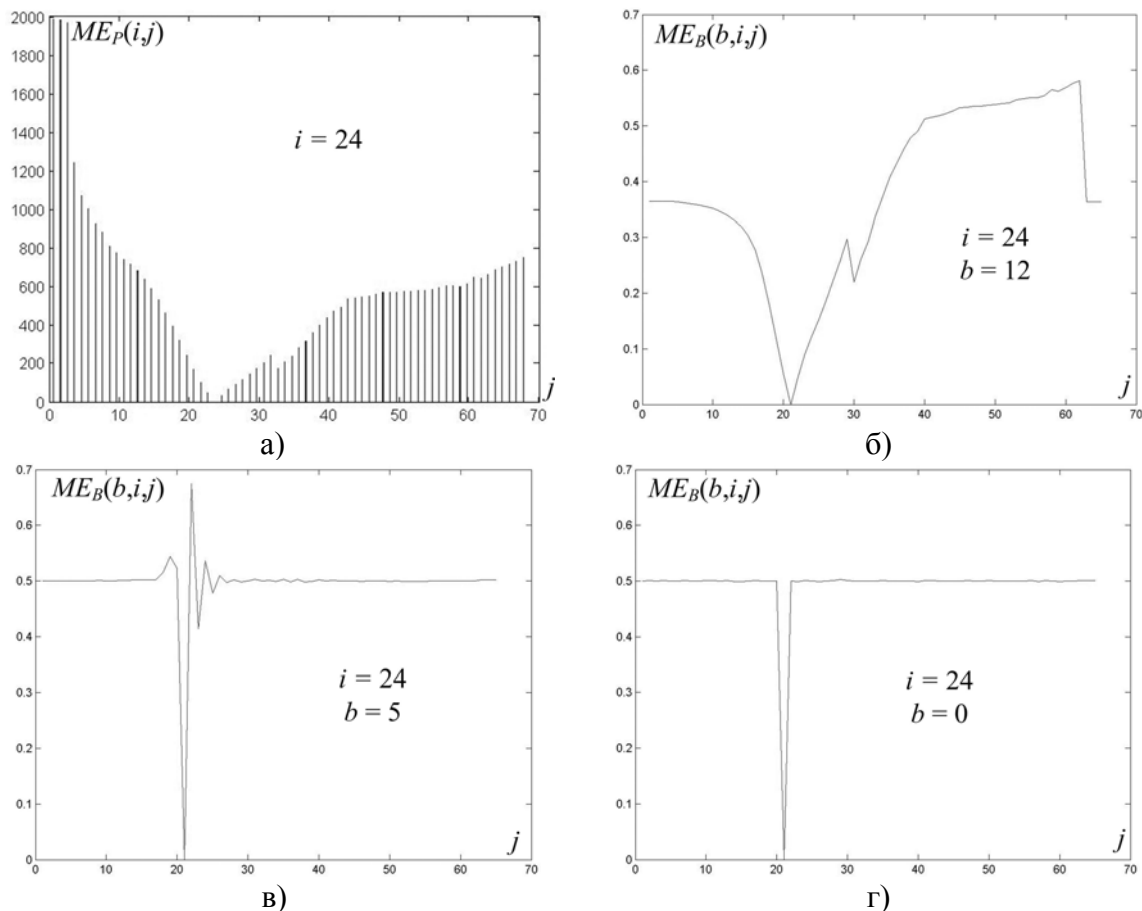


Рис. 2 – Зависимости средней ошибки от номера спектрального канала:
 а – для пиксельной межканальной корреляции;
 б – для поразрядной межканальной корреляции (11-я битовая плоскость);
 в – для поразрядной межканальной корреляции (5-я битовая плоскость);
 г – для поразрядной межканальной корреляции (0-я битовая плоскость)

Оценка эффективности энтропийного кодирования МСИ

Произведена оценка эффективности пиксельного поканального, поразрядного поканального, пиксельного межканального и поразрядного межканального энтропийного кодирования МСИ с использованием кодеров Раg и Zip.

При пиксельном поканальном энтропийном кодировании каждый спектральный канал МСИ сжимается независимо от других спектральных каналов. При пиксельном межканальном кодировании один из спектральных каналов сжимается независимо от других. Затем кодируются разности соседних спектральных каналов (1-2, 2-3 и т.д.), между которыми корреляция наибольшая. Характеристики сжатия МСИ при канальном и межканальном энтропийном кодировании приведены в табл. 1 (исходный размер каждого канала МСИ составляет 2200576 байт).

При поразрядном поканальном энтропийном кодировании каждый спектральный канал МСИ сжимается независимо от других спектральных каналов, но старшие и младшие битовые плоскости спектральных каналов

кодируются отдельно. Для 24-го спектрального канала 14-ти разрядного МСИ размером 2048x614 пикселей в табл. 2 приведены коэффициенты сжатия при поразрядном поканальном энтропийном кодировании старших и младших битовых плоскостей.

Табл. 1

Коэффициенты сжатия МСИ при поканальном и межканальном энтропийном кодировании

Изображения	Размер после кодирования		Коэффициент сжатия	
	Кодек Rar	Кодек Zip	Кодек Rar	Кодек Zip
Спектральный канал 24	1400929	2130049	1,57	1,03
Спектральный канал 25	1318890	2030822	1,67	1,08
Разность спектральных каналов 24 и 25	861920	1111005	2,55	1,98

Табл. 2

Коэффициенты сжатия МСИ при поразрядном поканальном энтропийном кодировании

Битовые плоскости 24-го спектрального канала	Исходный размер битовых плоскостей, байт	Размер битовых плоскостей после кодирования, байт		Коэффициент сжатия	
		Кодек Rar	Кодек Zip	Кодек Rar	Кодек Zip
13/12-0	157184/2043392	156/1477313	2613/1845902	1007,59/1,11	60,16/1,11
13-12/11-0	314368/1886208	2897/1478610	4018/1845825	108,52/1,28	78,24/1,02
13-11/10-0	471552/1729024	88324/1522992	94916/1840134	5,34/1,13	4,97/0,94
13-10/9-0	628736/1571840	77784/1514023	103587/1805397	8,08/1,04	6,07/0,84
13-9/8-0	785920/1414656	109650/1455225	156527/1728834	7,17/0,97	5,02/0,82
13-8/7-0	943104/1257472	208258/1414317	272372/1576027	4,53/0,89	3,46/0,80
13-7/6-0	1100288/1100288	371921/1114806	431957/1352720	2,96/0,99	2,55/0,81
13-6/5-0	1257472/943104	521875/973036	631105/1190445	2,41/0,97	1,99/0,79
13-5/4-0	1414656/785920	676824/810029	856226/1010382	2,09/0,97	1,65/0,78
13-4/3-0	1571840/628736	752435/653864	1089250/807126	2,09/0,96	1,44/0,78
13-3/2-0	1729024/471552	996499/486924	1326499/612922	1,73/0,97	1,30/0,77
13-2/1-0	1886208/314368	1160619/318726	1538508/412791	1,62/0,99	1,23/0,76
13-1/0	2043392/157184	1330527/193363	1710289/217607	1,54/0,81	1,19/0,72

При поразрядном межканальном энтропийном кодировании один из спектральных каналов сжимается независимо от других, например первый. Затем вычисляются разности битовых плоскостей соседних спектральных каналов (1-2, 2-3 и т.д.). Полученные битовые плоскости разностей группируются на старшие и младшие битовые плоскости и к каждой группе применяется энтропийный кодек независимо от других групп битовых плоскостей. Для разности 24-го и 25-го спектральных каналов 14-ти разрядного МСИ размером 2048x614 пикселей в табл. 3 приведены коэффициенты сжатия при поразрядном межканальном энтропийном кодировании старших и младших битовых плоскостей.

В табл. 4 приведены суммарные объемы кода и общие коэффициенты сжатия при раздельном энтропийном кодировании старших и младших битовых плоскостей для представленных в табл. 2 и 3 вариантов кодирования (суммарный исходный размер битовых плоскостей составляет 2200576 байт).

Табл. 3

Коэффициенты сжатия МСИ при поразрядном межканальном энтропийном кодировании

Битовые плоскости разностей спектральных каналов 24 и 25	Исходный размер битовых плоскостей, байт	Размер битовых плоскостей после кодирования, байт		Коэффициент сжатия	
		Кодер Rar	Кодер Zip	Кодер Rar	Кодер Zip
13/12-0	157184/2043392	3855/862319	3504/1111130	40,77/2,37	44,86/1,84
13-12/11-0	314368/1886208	3855/862242	3505/1111130	81,55/2,19	89,69/1,70
13-11/10-0	471552/1729024	3856/862076	3506/1111111	122,29/2,01	134,50/2,01
13-10/9-0	628736/1571840	3857/862096	3506/1111089	163,01/1,82	179,33/1,41
13-9/8-0	785920/1414656	3854/861973	3502/1111050	203,92/1,64	224,42/1,27
13-8/7-0	943104/1257472	3855/859370	3502/1110566	244,64/1,46	269,30/1,13
13-7/6-0	1100288/1100288	4244/863552	3697/1110259	259,26/1,27	297,62/0,99
13-6/5-0	1257472/943104	34485/887633	37623/1098073	36,46/1,06	33,42/0,86
13-5/4-0	1414656/785920	135166/805397	194642/1003502	10,47/0,98	7,27/0,78
13-4/3-0	1571840/628736	231703/654048	315507/807505	6,78/0,96	4,98/0,78
13-3/2-0	1729024/471552	438046/487246	496748/613161	3,95/0,97	3,48/0,77
13-2/1-0	1886208/314368	631543/318875	699469/412700	2,99/0,99	2,70/0,76
13-1/0	2043392/157184	703825/190914	902114/217556	2,90/0,82	2,27/0,72

Табл. 4

Общие коэффициенты сжатия МСИ при поразрядном поканальном и межканальном энтропийном кодировании

Битовые плоскости	Суммарный размер битовых плоскостей после кодирования, байт				Общий коэффициент сжатия битовых плоскостей			
	Поканальное кодирование		Межканальное кодирование		Поканальное кодирование		Межканальное кодирование	
	Кодер Rar	Кодер Zip	Кодер Rar	Кодер Zip	Кодер Rar	Кодер Zip	Кодер Rar	Кодер Zip
13/12-0	1477469	1848515	866174	1114634	1,49	1,19	2,54	1,97
13-12/11-0	1481507	1849843	866097	1114635	1,49	1,19	2,54	1,97
13-11/10-0	1611316	1935050	865932	1114617	1,37	1,14	2,54	1,97
13-10/9-0	1591807	1908984	865953	1114595	1,38	1,15	2,54	1,97
13-9/8-0	1564875	1885361	865827	1114552	1,41	1,15	2,54	1,97
13-8/7-0	1622575	1848399	863225	1114068	1,36	1,19	2,549	1,98
13-7/6-0	1486727	1784677	867796	1113956	1,48	1,23	2,54	1,98
13-6/5-0	1494911	1821550	922118	1135696	1,47	1,21	2,39	1,94
13-5/4-0	1486853	1866608	940563	1198144	1,48	1,18	2,34	1,84
13-4/3-0	1406299	1896376	885751	1123012	1,57	1,16	2,48	1,96
13-3/2-0	1483423	1939421	925292	1109909	1,48	1,14	2,38	1,98
13-2/1-0	1479345	1951299	950418	1112169	1,49	1,13	2,32	1,98
13-1/0	1523890	1927896	894739	1119670	1,44	1,14	2,46	1,97

Из табл. 1 – 4 следует, что пиксельное и поразрядное межканальное энтропийное кодирование МСИ обеспечивает практически одинаковые коэффициенты сжатия. Однако, поразрядное кодирование позволяет повысить коэффициент сжатия за счет 1) отсечения младших битовых плоскостей (не эффективно энтропийное кодирование битовых плоскостей 4-0 и 6-0 при использовании кодиров Rar и Zip соответственно); 2) комбинации различных кодиров

для сжатия старших и средних битовых плоскостей (при кодировании битовых плоскостей 13–7 кодер Zip превосходит в коэффициенте сжатия кодер Rar).

Синтез метода, алгоритмов и структур кодеков сжатия МСИ

Предлагается метод сжатия МСИ на основе комбинированного энтропийного поразрядного кодирования межканальных разностей. Сущность метода состоит в вычислении поразрядных разностей (логического «Исключающего ИЛИ») соседних спектральных каналов МСИ, исключения из процесса кодирования младших битовых плоскостей, группирования старших и средних битовых плоскостей и их отдельного энтропийного кодирования с использованием различных методов.

Предложенный метод может быть реализован с помощью алгоритмов трехуровневого последовательного или блочного поразрядного кодирования межканальных разностей.

Алгоритм трехуровневого последовательного поразрядного кодирования межканальных разностей предполагает независимое кодирование одного из спектральных каналов (опорного, например, 1-го канала), вычисление поразрядных межканальных разностей для соседних спектральных каналов, исключение из процесса кодирования младших битовых плоскостей полученных разностей (плоскости 4–0 для рассматриваемых типов МСИ), выделение группы старших битовых плоскостей (плоскости 13–7 для рассматриваемых типов МСИ), выделение группы средних битовых плоскостей (плоскости 6–5 для рассматриваемых типов МСИ), кодирование старших битовых плоскостей с помощью метода Zip, кодирование средних битовых плоскостей с помощью метода Rar. На рис. 3,а представлена структура последовательного трехуровневого энтропийного кодера. Достоинством данного кодера является получение наибольших коэффициентов сжатия МСИ за счет использования корреляции соседних спектральных каналов. Основные недостатки: отсутствие возможности произвольного доступа к спектральным каналам (для декодирования любого канала необходимо декодировать все предыдущие каналы); размножение ошибки (в случае искажения любого бита при передаче теряется возможность восстановления всей последующей информации).

Алгоритм трехуровневого блочного поразрядного кодирования межканальных разностей предполагает независимое кодирование одного из спектральных каналов (опорного, например, 1-го канала), вычисление поразрядных межканальных разностей для некоторого числа спектральных каналов, отстоящих друг от друга на заданный интервал (например, 10), формирование блоков спектральных каналов с выбранным интервалом (равным 10-ти в рассматриваемом примере), вычисление поразрядных межканальных разностей для спектральных каналов в пределах каждого блока относительно первого спектрального канала блока, исключение в каждом блоке из процесса кодирования младших битовых плоскостей полученных разностей (плоскости 4–0 для рассматриваемых типов МСИ), выделение в каждом блоке группы старших битовых плоскостей (плоскости 13–7 для рассматриваемых типов МСИ), выделение в каждом блоке группы средних битовых плоскостей

(плоскости 6–5 для рассматриваемых типов МСИ), кодирование старших битовых плоскостей каждого блока с помощью метода Zip, кодирование средних битовых плоскостей каждого блока с помощью метода Rar. На рис. 3,б представлена структура блочного трехуровневого энтропийного кодера. Достоинствами данного кодера является уменьшение времени произвольного доступа за счет последовательного декодирования только в пределах блока, размножение ошибки в пределах блока. Основной недостаток: уменьшение коэффициента сжатия МСИ из-за использования корреляции не соседних, у удаленных друг от друга спектральных каналов при формировании блоков.

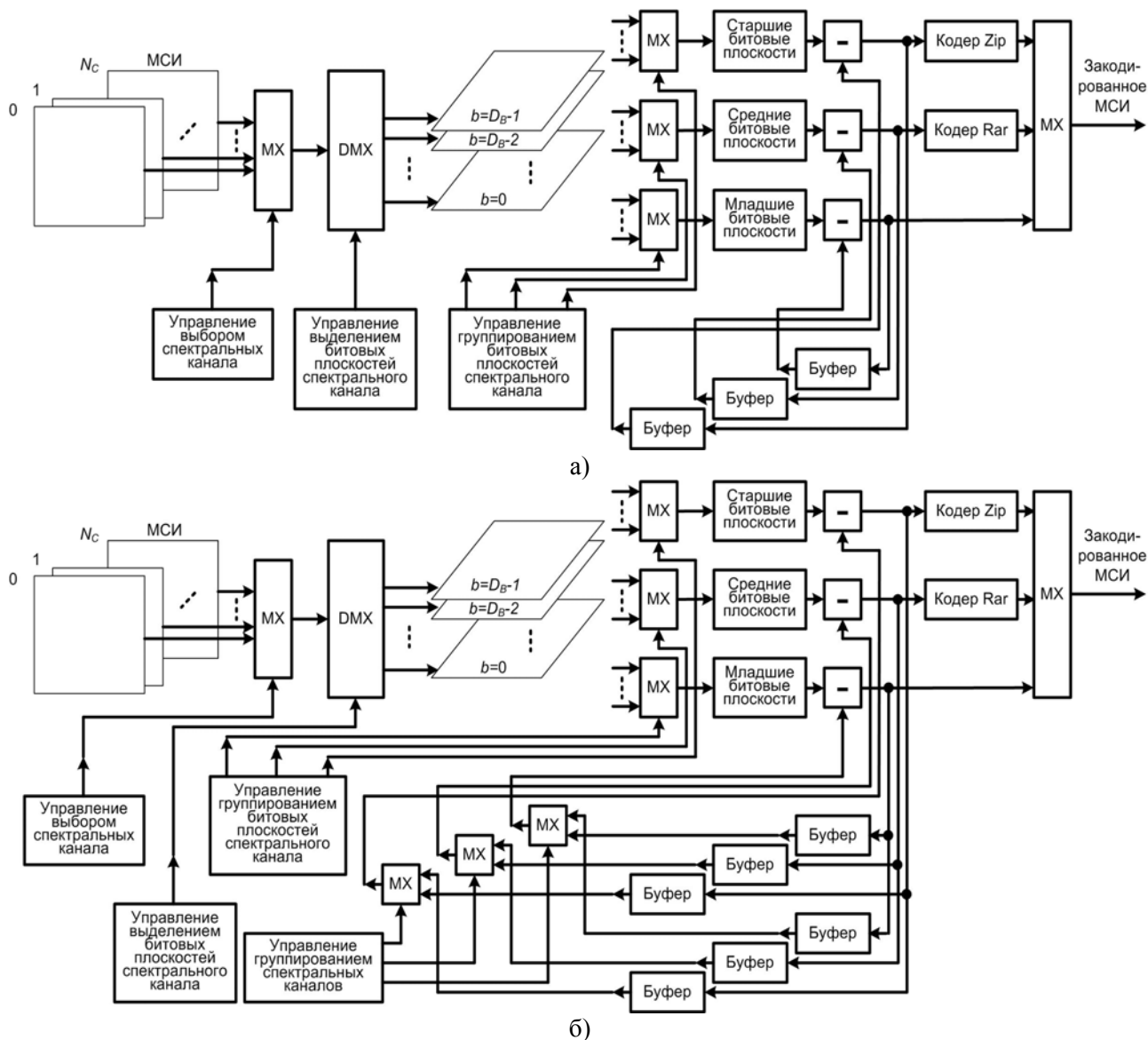


Рис. 3 – Структуры поразрядных энтропийных кодеров межканальных разностей МСИ:
а – последовательного; б – блочного

Оба алгоритма предполагают возможность прогрессивной передачи и декодирования, когда кодируются, передаются и декодируются сначала старшие битовые плоскости, затем – средние, а затем – младшие. При этом обеспечивается возможность предварительного просмотра содержимого спектральных каналов МСИ в низком разрешении.

Оценка эффективности комбинированного энтропийного кодирования битовых плоскостей мультиспектральных изображений

Для оценки эффективности комбинированного энтропийного кодирования одного спектрального канала определены коэффициенты сжатия средних битовых плоскостей (табл. 5, 6). Из табл. 2, 3, 5, 6 следует, что для кодирования средних битовых плоскостей более эффективен кодер Rar.

Суммарный объем кода при поразрядном поканальном кодировании опорного спектрального канала составляет: 109650 байт (разряды 13–9 кодер Rar) + 1414656 (разряды 8–0) = 1524306 байт. Это обеспечивает коэффициент сжатия $2200576/1524306 = 1,44$. Для сравнения объем кода при попиксельном поканальном эффективном кодировании с использованием алгоритма Rar составляет 1400929 байт, что обеспечивает коэффициент сжатия 1,57 (см. табл. 1). Таким образом, поразрядное поканальное кодирование неэффективно и лучше использовать попиксельное поканальное эффективное кодирование.

Табл. 5

Коэффициенты сжатия МСИ при поразрядном поканальном энтропийном кодировании

Битовые плоскости 24-го спектрального канала	Исходный размер битовых плоскостей, байт	Размер битовых плоскостей после кодирования, байт		Коэффициент сжатия	
		Кодер Rar	Кодер Zip	Кодер Rar	Кодер Zip
12-9/12-11	1257472	154/-	-/2609	8165/-	-/482
11-9/11	1100288	154/-	-/2609	7145/-	-/422
10-9/-	943104	154/-	-	6124/-	-
9/-	785920	154/-	-	5103/-	-

Табл. 6

Коэффициенты сжатия МСИ при поразрядном межканальном энтропийном кодировании

Битовые плоскости разностей спектральных каналов 24 и 25	Исходный размер битовых плоскостей, байт	Размер битовых плоскостей после кодирования, байт		Коэффициент сжатия	
		Кодер Rar	Кодер Zip	Кодер Rar	Кодер Zip
12-5/12-7	1257472	135165/-	-/3698	93/-	-/340
11-5/11-7	1100288	135168/-	-/3698	8,14/-	-/297,53
10-5/10-7	943104	135167/-	-/3698	6,8/-	-/255
9-5/9-7	785920	135177/-	-/3698	5,8/-	-/212,52
8-5/8-7	628736	135166/-	-/3697	4,65/-	-/170
7-5/7	471552	135161/-	-/3681	3,9/-	-/128
6-5/-	314368	135179/-	-	2,32/-	-
5/-	157184	177444/-	-	0,9/-	-

Суммарный объем кода при трехуровневом поразрядном межканальном энтропийном кодировании одного спектрального канала составляет: 3697 байт (разряды 13–7 кодер Zip) + 135179 байт (разряды 6–5 кодер Rar) + 785920 байт (разряды 4–0) = 924796 байт. Это обеспечивает коэффициент сжатия $2200576/924796 = 2,38$. Для сравнения объем кода при двухуровневом поразрядном межканальном энтропийном кодировании одного спектрального канала составляет: 3502 байт (разряды 13–8 кодер Zip) + 859370 байт (разряды

7–0 кодер Rar) = 862872 байт, что обеспечивает коэффициент сжатия 2,551 (см. табл. 3) и несколько лучше по сравнению с двухуровневым поразрядным межканальным энтропийным кодированием одного спектрального канала с использованием алгоритма Rar (см. табл. 4). Выигрыш в коэффициенте сжатия по сравнению с попиксельным поканальным эффективным кодированием составляет $2,551/1,57 = 1,62$.

Заключение

Разработаны метод, алгоритмы и структуры кодеров сжатия мультиспектральных изображений, основанные на двух и трех-уровневом комбинированном энтропийном кодировании их битовых плоскостей. Показано, что двухуровневое поразрядное межканальное энтропийное кодирование обеспечивает увеличение коэффициента сжатия МСИ в 1,62 раза по сравнению с попиксельным поканальным эффективным кодированием.

Список литературы

1. Ватолин, Д.: Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео/ Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин /М: Диалог-МИФИ, -2003. - 384 с.
2. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука/М: Техносфера, -2004. – 368 с.
3. тропченко, А.ю. Методы сжатия изображений, Аудиосигналов и видео: учеб. пособие / А.ю. тропченко, а.а. тропченко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 108 с.
4. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Пер. с англ.-Москва. – Техносфера, – 2006. -1072 с.
5. J. Ziv and A. Lempel. A universal algorithm for sequential data compression. IEEE Transactions on Information Theory, IT-23:337–343, 1977.
6. S. Golomb. Runlength encodings. IEEE Transactions on Information Theory, IT-12(3):399–401, July 1966

Садик Бакир Джафар, аспирант кафедры сетей и устройств телекоммуникаций факультета телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, baqir.alsadiq@gmail.com

Цветков Виктор Юрьевич, доцент кафедры сетей и устройств телекоммуникаций факультета телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, кандидат технических наук, доцент, vtsvet@bsuir.by

Бобов Михаил Никитич, профессор кафедры сетей и устройств телекоммуникаций факультета телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, доктор технических наук, профессор, nikitich.b@tut.by