

УДК 621.391

Б. Д. С. САДИК, В. Ю. ЦВЕТКОВ, М. Н. БОБОВ

КОМБИНИРОВАННОЕ КОДИРОВАНИЕ БИТОВЫХ ПЛОСКОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Целью работы является снижение вычислительной сложности сжатия полутоновых изображений без потерь в пространственной области за счет комбинированного кодирования арифметического и длин серий бит битовых плоскостей. Известные эффективные кодеры сжатия отдельно кодируют битовые плоскости изображения или коэффициентов преобразования, что приводит к росту вычислительной сложности из-за многократной обработки каждого пикселя. В работе предложены правила комбинированного кодирования и комбинированные кодеры битовых плоскостей разностей пикселей изображений с перестраиваемой и постоянной структурой, имеющие по сравнению с арифметическим кодером битовых плоскостей меньшую вычислительную сложность и такой же коэффициент сжатия.

Ключевые слова: комбинированное кодирование, сжатие изображений, битовые плоскости, арифметическое кодирование, кодирование длин серий, вычислительная сложность, кодеки сжатия.

Введение

Наиболее эффективные кодеры сжатия изображений [1–5] используют раздельное кодирование битовых плоскостей изображения или коэффициентов преобразования и фиксируют без кодирования младшие битовые плоскости (с примерно равной вероятностью нулей и единиц). Недостаток раздельного кодирования состоит в увеличении вычислительной сложности кодера в несколько раз из-за многократной обработки каждого пикселя. Проблема может быть решена применением к старшим битовым плоскостям простых и эффективных кодеров – т. е. в результате комбинированного кодирования, например, кодирования длин серий бит старших битовых плоскостей дополнительно к арифметическому кодированию бит младших битовых плоскостей. Такой подход практически не исследован [6]. Арифметическое кодирование (AC – Arithmetic Coding) [7] широко используется и позволяет достичь высоких коэффициентов сжатия изображений. Благодаря низкой вычислительной сложности кодирование длин серий (RLE – Run-Length Encoding) [8] применяется в составе кодеков сжатия изображений и архиваторов. Целью работы является снижение вычислительной сложности сжатия полутоновых изображений без потерь в про-

странственной области за счет комбинированного кодирования арифметического и длин серий бит битовых плоскостей.

Арифметическое кодирование битовых плоскостей

Битовые плоскости $B(r)$ формируются из одинаковых разрядов r пикселей $i(R, y, x)$ R -разрядного изображения

$$I(R) = \left\| i(R, y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$$

и представляют собой матрицу

$$B(r) = \left\| b(r, y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})},$$

состоящую из нулей и единиц ($b(r, y, x) = \{0, 1\}$), размер $Y \times X$ которой совпадает с размером изображения $I(R)$. Арифметическое кодирование $f_{AC}(I(R))$ изображения $I(R)$ в пространственной области приводит к объему кода $\langle f_{AC}(I(R)) \rangle$ большему, чем в области преобразования $f_T(I(R)) \langle f_{AC}(f_T(I(R))) \rangle$, но имеет меньшую вычислительную сложность, где $\langle \rangle$ – оператор вычисления объема кода.

Кодирование длин серий бит битовых плоскостей

Значения $i(R, y, x)$ и $b(r, y, x)$ связаны выражением $i(R, y, x) = \sum_{r=0}^{R-1} 2^r b(r, y, x)$ при $y = 0, \overline{Y-1}$,

$x = 0, X - 1$. Это позволяет применять кодирование длин серий f_{RLE} отдельно для каждой битовой плоскости ($f_{RLE}(B(r))$ при $r = 0, R - 1$), для которой $\langle f_{RLE}(B(r)) \rangle < YX$.

Комбинированное кодирование битовых плоскостей

Для повышения коэффициента сжатия изображений предлагаются следующие правила комбинированного кодирования битовых плоскостей $B(r)$ на основе AC и RLE.

1) Для кодирования $B(r)$ используется AC, если $\langle f_{AC}(B(r)) \rangle < YX$.

2) Для кодирования $B(r)$ используется RLE, если $\langle f_{RLE}(B(r)) \rangle < \langle f_{AC}(B(r)) \rangle \leq YX$.

3) $B(r)$ не кодируется (NC), если $(\langle f_{AC}(B(r)) \rangle \geq YX) \wedge (\langle f_{RLE}(B(r)) \rangle \geq YX)$.

На основе данных правил можно синтезировать комбинированный кодер с перестраиваемой структурой (DSB), включающий коммутатор для подбора кодеров (AC, RLE, NC) для каждой плоскости $B(r)$ по данным правилам. С целью упрощения предлагается комбинированный кодер с постоянной структурой (DHB), в котором коммутатор отсутствуют и кодеры AC, RLE, NC закреплены за определенными битовыми плоскостями так,

что на большинстве изображений определенного типа эффективность DHB близка к DSB.

Оценка эффективности комбинированного кодирования изображений

В табл. 1 приведены значения коэффициентов CR_X сжатия без потерь полутоновых изображений различных типов t (C – земной поверхности; P – портретных; M – медицинских; R – тепловизионных; G – разностей соседних каналов гиперспектральных снимков) для кодеров различного вида v : A – арифметического значений пикселей (CR_A); DA – арифметического разностей значений пикселей ($CR_{DA}(S)$); DAB – арифметического битовых плоскостей разностей значений пикселей ($CR_{DAB}(S)$); DRB – длин серий бит битовых плоскостей разностей значений пикселей ($CR_{DRB}(S)$); DSB – комбинированного с перестраиваемой структурой для кодирования бит битовых плоскостей разностей значений пикселей ($CR_{DSB}(S)$); DHB – комбинированного с постоянной структурой для кодирования бит битовых плоскостей разностей значений пикселей ($CR_{DHB}(S)$). Параметр S указывает на порядок вычисления разностей значений пикселей: H – по строкам; VH – по строкам и столбцам; G – по развертке Гильберта; M – по развертке Мортон.

Таблица 1. Значения коэффициентов сжатия без потерь полутоновых изображений

Изображение	CR_{AC}	$CR_{DA}(S)$	$CR_{DAB}(S)$	$CR_{DRB}(S)$	Комбинированное кодирование			
					с подбором кодеров		с закреплением кодеров	
					Комбинация	$CR_{DSB}(S)$	Комбинация	$CR_{DHB}(S)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
C1	1,19	1,14 (G)	1,62 (G)	1,48 (HV)	-RRAAAA--	1,63 (G)	-RRAAAA--	1,62 (HV)
C2	1,31	1,17 (H)	1,66 (H)	1,52 (H)	-RRRAAAA--	1,68 (H)	-RRAAAA--	1,60 (HV)
C3	1,15	1,04 (H)	1,47 (HV)	1,28 (HV)	-RRAAA----	1,48 (HV)	-RRAAAA--	1,48 (HV)
C4	1,14	1,01 (H)	1,42 (HV)	1,25 (HV)	-RRAAA----	1,43 (HV)	-RRAAAA--	1,43 (HV)
C5	1,43	1,20 (H)	1,70 (H)	1,57 (H)	-RRRAAAA--	1,74 (H)	-RRAAAA--	1,62 (HV)
C6	1,19	1,10 (G)	1,53 (HV)	1,36 (HV)	-RRAAAA--	1,55 (HV)	-RRAAAA--	1,55 (HV)
C7	1,17	1,05 (H)	1,47 (H)	1,29 (HV)	-RRAAAA--	1,49 (H)	-RRAAAA--	1,47 (HV)
C8	1,20	1,09 (H)	1,54 (HV)	1,38 (HV)	-RRAAA----	1,56 (HV)	-RRAAAA--	1,56 (HV)
P1	1,09	1,13 (H)	1,57 (HV)	1,30 (HV)	-RRAAAA--	1,59 (HV)	-RRAAA----	1,49 (H)
P2	1,10	0,99 (H)	1,33 (HV)	1,03 (H)	-AAAAAA--	1,33 (HV)	-RRAAA----	1,19 (H)
P3	1,45	1,16 (G)	1,58 (H)	1,28 (H)	-RAAAA-RA	1,60 (H)	-RRAAA----	1,24 (H)
P4	1,33	1,07 (H)	1,37 (H)	1,14 (H)	-RAAAAA--	1,38 (H)	-RRAAA----	1,33 (H)
P5	1,17	1,06 (H)	1,48 (HV)	1,29 (HV)	-RRAAA----	1,50 (HV)	-RRAAA----	1,40 (H)
P6	1,08	1,08 (G)	1,78 (G)	1,10 (H)	AAAAAAAA	1,78 (G)	-RRAAA----	1,04 (H)
P7	1,50	1,09 (H)	1,48 (H)	1,32 (H)	-RRAAA----	1,51 (H)	-RRAAA----	1,51 (H)
P8	1,35	0,99 (G)	1,38 (G)	1,27 (H)	-RRAAA----	1,39 (G)	-RRAAA----	1,39 (H)
M1	1,34	1,46 (H)	1,95 (HV)	1,50 (HV)	-RRRAAAA-	1,99 (HV)	ARRRRRAAAA	1,90 (HV)
M2	1,31	1,43 (H)	1,91 (HV)	1,50 (HV)	-RRRAAAA-	1,95 (HV)	ARRRRRAAAA	1,84 (HV)
M3	1,71	2,07 (H)	2,56 (HV)	1,73 (HV)	ARRRAAAA	2,65 (HV)	ARRRRRAAAA	2,64 (HV)

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
M4	1,81	2,17 (H)	2,61 (HV)	1,60 (HV)	ARRAAAAA	2,67 (HV)	ARRRRAAAA	2,52 (HV)
M5	1,78	3,15 (H)	3,41 (HV)	2,45 (H)	ARRARAAAA	3,58 (HV)	ARRRRAAAA	3,57 (HV)
M6	1,79	3,21 (H)	3,47 (HV)	2,38 (HV)	ARRARAAAA	3,64 (HV)	ARRRRAAAA	3,64 (HV)
M7	1,76	2,68 (H)	3,06 (HV)	2,36 (HV)	ARAARRAAA	3,13 (HV)	ARRRRAAAA	3,10 (HV)
M8	2,34	4,33 (H)	4,54 (HV)	3,11 (HV)	ARRRRRAAA	5,04 (HV)	ARRRRAAAA	4,93 (HV)
R1	0,88	1,09 (G)	1,41 (G)	1,08 (H)	-RAAAAAA-	1,41 (G)	-RRAAAA---	1,23 (HV)
R2	1,25	1,18 (H)	1,56 (HV)	1,54 (HV)	-RRRAA---	1,62 (HV)	-RRAAAA---	1,60 (HV)
R3	1,15	1,22 (H)	1,60 (HV)	1,53 (HV)	-RRRAA---	1,67 (HV)	-RRAAAA---	1,65 (HV)
R4	1,13	1,14 (H)	1,48 (HV)	1,43 (HV)	-RRAAAA---	1,51 (HV)	-RRAAAA---	1,51 (HV)
R5	1,15	1,16 (H)	1,50 (HV)	1,36 (HV)	-RRAAAA---	1,54 (HV)	-RRAAAA---	1,54 (HV)
R6	1,13	1,80 (H)	2,02 (H)	2,02 (H)	-RRRRRA--	2,19 (H)	-RRAAAA---	1,89 (HV)
R7	0,94	1,15 (H)	1,39 (G)	1,24 (H)	-RAAAA---	1,40 (G)	-RRAAAA---	1,35 (HV)
R8	0,90	1,15 (H)	1,45 (G)	1,07 (H)	-RAAAAAA-	1,45 (G)	-RRAAAA---	1,25 (HV)
G1	1,28	1,27 (H)	1,75 (H)	1,59 (H)	-RRRRAA--	1,81 (H)	-RRRA..A--	1,80 (H)
G2	1,27	1,21 (G)	1,66 (G)	1,57 (M)	-RRRAAA--	1,69 (G)	-RRRA..A--	1,67 (H)
G3	1,15	1,10 (H)	1,47 (M)	1,36 (M)	-RRRAA---	1,50 (M)	-RRRA..A--	1,48 (H)
G4	1,21	1,12 (H)	1,52 (M)	1,46 (M)	-RRRAA---	1,55 (M)	-RRRA..A--	1,52 (H)
G5	1,22	1,28 (H)	1,67 (H)	1,42 (H)	-RAAAAAA--	1,68 (H)	-RRRA..A--	1,61 (H)
G6	1,36	1,34 (G)	1,75 (G)	1,61 (H)	-RRRAA---	1,77 (G)	-RRRA..A--	1,78 (H)
G7	1,40	1,35 (G)	1,71 (H)	1,45 (H)	-RAAAAAA--	1,72 (H)	-RRRA..A--	1,64 (H)
G8	1,20	1,15 (G)	1,63 (G)	1,54 (G)	-RRRAA---	1,67 (G)	-RRRA..A--	1,63 (H)

Для $K(t)$ изображений $I(t, k)$ каждого типа t ($k = 1, K(t)$ – номер изображения) определены средние выигрыши $G_{DAB/A}(t)$ и $G_{DAB/DA}(t)$ в коэффициенте сжатия кодера DAB по отношению к кодерам A и DA (табл. 2) с помощью выражений:

$$G_{DAB/A}(t) = \frac{1}{K(t)} \sum_{k=1}^{K(t)} \frac{C_{DAB}(S(t, k), I(t, k))}{C_A(I(t, k))}, \quad (1)$$

$$G_{DAB/DA}(t) = \frac{1}{K(t)} \sum_{k=1}^{K(t)} \frac{C_{DAB}(S(t, k), I(t, k))}{C_{DA}(S(t, k), I(t, k))}. \quad (2)$$

Т а б л и ц а 2. Значения средних выигрышей в коэффициенте сжатия

Выигрыши в коэффициенте сжатия	Типы t изображений				
	C	P	M	R	G
$G_{DAB/A}(t)$	1,27	1,20	1,68	1,47	1,31
$G_{DAB/DA}(t)$	1,41	1,40	1,19	1,26	1,34
$G_{DSB/A}(t)$	1,26	1,22	1,75	1,51	1,33
$G_{DSB/DA}(t)$	1,40	1,40	1,23	1,30	1,37
$G_{DSB/DHB}(t)$	1,02	1,16	1,03	1,07	1,02

Из табл. 2 следует, что кодер DAB превосходит кодеры A и DA в среднем по типам изображений в 1,37 и 1,32 раза соответственно.

В комбинированном кодере с перестраиваемой структурой DSB используются порядок вычисления разности значений пикселей и комбинация кодеров (столбец 6 табл. 1), обеспечивающие максимальное сжатие каждой

битовой плоскости и изображения в целом (символы в столбце 6 имеют следующие значения: «-» – без кодирования; «R» – кодирование длин серий бит; «A» – арифметическое кодирование). Получаемы при этом средние выигрыши в коэффициенте сжатия $G_{DSB/A}(t)$ и $G_{DSB/DA}(t)$ по сравнению с кодерами A и DA вычисляются с помощью выражений

$$G_{DSB/A}(t) = \frac{1}{K(t)} \sum_{k=1}^{K(t)} \frac{C_{DSB}(S(t, k), I(t, k))}{C_A(I(t, k))}, \quad (3)$$

$$G_{DSB/DA}(t) = \frac{1}{K(t)} \sum_{k=1}^{K(t)} \frac{C_{DSB}(S(t, k), I(t, k))}{C_{DA}(S(t, k), I(t, k))}. \quad (4)$$

Из табл. 2 следует, что кодер DSB превосходит кодеры A и DA в среднем по типам изображений в 1,41 и 1,34 раза соответственно. Из табл. 1 и 2 также следует, что кодер DSB в большинстве случаев превосходит кодер DAP (в 1,02 раза в среднем по типам изображений).

Наиболее часто встречающиеся в кодере DSB порядок вычисления разностей и комбинация кодеров для изображений каждого типа используются в комбинированном кодере с постоянной структурой DHB (столбец 8 табл. 1). Для некоторых изображений это приводит к меньшему коэффициенту сжатия кодера DHB по сравнению с кодером DSB . В табл. 2 приведены средние значения выигрыша $G_{DSB/DHB}(t)$ в коэффициенте сжатия

DSB по сравнению с DHB , вычисляемые с помощью выражения

$$G_{DSB/DHB}(t) = \frac{1}{K(t)} \sum_{k=1}^{K(t)} \frac{C_{DSB}(S(t,k), I(t,k))}{C_{DHB}(S(t,k), I(t,k))}. \quad (5)$$

Из табл. 2 следует, что самую низкую эффективность кодер DHB показывает на портретных и тепловизионных изображениях (в 1,16 и 1,07 раза). Средние выигрыши в коэффициенте сжатия кодера DHB по сравнению с кодерами A и DA могут быть определены по табл. 2 с помощью выражений

$$G_{DHB/A}(t) = G_{DSB/A}(t) / G_{DSB/DHB}(t), \quad (6)$$

$$G_{DHB/DA}(t) = G_{DSB/DA}(t) / G_{DSB/DHB}(t). \quad (7)$$

Из табл. 2 и выражений (6), (7) следует, что комбинированный кодер с постоянной структурой DHB обеспечивает средние выигрыши в коэффициенте сжатия по сравнению с кодерами A / DA в 1,24/1,37, 1,05/1,21, 1,70/1,19, 1,41/1,22, 1,30/1,34 раз для изображений типов C, P, M, R, G соответственно (в 1,34/1,27 раз в среднем по типам изображений), что немного хуже (в 1,04 раза в среднем по типам изображений) по сравнению с DAB .

Выигрывая в коэффициенте сжатия по сравнению с кодерами A и DA , кодер DAB имеет существенно большую вычислительную сложность. Нормированный проигрыш $L_{DAB/A}(t)$ в вычислительной сложности (нормировка осуществляется относительно числа битовых $BD(I(t,k))$ плоскостей, т. к. изображения могут иметь различную битовую глубину) кодера DAB по сравнению с кодерами A и DA (кодеры имеют примерно одинаковую вычислительную сложность) обусловлен применением битового арифметического кодера, имеющего такую же вычислительную сложность как кодер A , на каждой битовой плоскости, для которой коэффициент сжатия больше единицы (число таких плоскостей определяется для каждой строки (t,k) табл. 1 числом $N_{A\&R}(I(t,k))$ символов A и R в столбце б), и вычисляется с помощью выражения

$$L_{DAB/A}(t) = \frac{1}{K(t)} \sum_{k=1}^{K(t)} \frac{N_{A\&R}(I(t,k))}{BD(I(t,k))} \quad (8)$$

Значения $L_{DAB/A}(t)$ приведены в табл. 3, из которой следует, что наибольший проигрыш в вычислительной сложности для кодера DAB в сравнении с кодерами A и DA наблюдается на меди-

цинских изображениях. Средний нормированный проигрыш по всем типам изображений составляет 0,68 (средний ненормированный проигрыш для 8-ми битовых плоскостей 5,44).

Таблица 3. Значения нормированных средних проигрышей в вычислительной сложности

Нормированные проигрыши в вычислительной сложности	Типы t изображений				
	C	P	M	R	G
$L_{DAB/A}(t)$	0,56	0,60	0,94	0,63	0,65
$L_{DSB/A}(t)$	0,38	0,53	0,60	0,38	0,37
$L_{DHB/A}(t)$	0,44	0,33	0,56	0,33	0,37

Комбинированный кодер с гибкой структурой DSB позволяет частично компенсировать рост вычислительной сложности в кодере DAB за счет кодирования длин серий бит старших битовых плоскостей. Нормированный проигрыш $L_{DSB/A}(t)$ в вычислительной сложности DSB по сравнению с кодерами A и DA (см. табл. 3) без учета сложности коммутатора и с учетом применения битового арифметического кодера на каждой плоскости, для которой коэффициент сжатия больше единицы и больше коэффициента сжатия кодера длин серий бит (число таких плоскостей определяется для каждой строки (t,k) табл. 1 числом $N_A(I(t,k))$ символов A в столбце б), определяется с помощью выражения

$$L_{DSB/A}(t) = \frac{1}{K(t)} \sum_{k=1}^{K(t)} \frac{N_A(I(t,k))}{BD(I(t,k))} \quad (9)$$

Значения $L_{DSB/A}(t)$ приведены в табл. 3, из которой следует, что кодер DSB по сравнению с A и DA в среднем в 3,62 раза сложнее (для 8-ми битовых плоскостей без учета сложности коммутатора), но сокращает проигрыш в вычислительной сложности (имеет меньшую вычислительную сложность) по сравнению с DAB в 1,47, 1,13, 1,57, 1,66, 1,76 раза для изображений типов C, P, M, R, G соответственно (в 1,52 раза в среднем по типам).

Однако для гибкого комбинированного кодирования необходимо управление коммутацией кодеров к битовым плоскостям. В комбинированном кодере с постоянной структурой DHB проблема решается закреплением кодеров арифметического и длин серий бит за битовыми плоскостями. В сравнении с кодером DSB это приводит либо к увеличению вычислительной сложности и повышению коэффициента сжатия, либо наоборот. Нормированный проигрыш $L_{DHB/A}(t)$ в вычислительной сложности кодера DHB по

сравнению с кодерами A и DA (см. табл. 3) определяется с помощью выражения (9) для столбца 8 табл. 1. Из табл. 1 и 3 следует, что вычислительная сложность кодера DHB может быть больше или меньше чем кодера DSB , но всегда меньше вычислительной сложности кодера DAB за счет использования кодирования длин серий бит старших битовых плоскостей. Ненормированный средний проигрыш в вычислительной сложности кодера DHB по сравнению с кодерами A и DA составляет 3,25 (для 8-ми битовых плоскостей). Кодер DHB сокращает проигрыш в вычислительной сложности (имеет меньшую вычислительную сложность) по сравнению с DAB в 1,27, 1,82, 1,68, 1,91, 1,76 раз для изображений типов C, P, M, R, G соответственно (1,69 раза в среднем по типам изображений).

Заключение

Предложены правила комбинированного (арифметического/длин серий) кодирования

битовых плоскостей разностей пикселей изображений, позволяющие синтезировать кодер с перестраиваемой структурой, отличающийся использованием коммутатора для подбора кодеров (арифметического и длин серий) для каждой плоскости, обеспечивающий по сравнению с арифметическим кодером битовых плоскостей в 1,5 раза меньшую вычислительную сложность при таком же коэффициенте сжатия. Предложен комбинированный кодер с постоянной структурой без коммутатора, отличающийся закреплением кодеров арифметического и длин серий за определенными битовыми плоскостями для достижения максимального выигрыша в коэффициенте сжатия для большинства изображений определенного типа, обеспечивающий по сравнению с арифметическим кодером битовых плоскостей в 1,7 раза меньшую вычислительную сложность при таком же коэффициенте сжатия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Taubman, D. S.** JPEG2000: image compression fundamentals, standards, and practice / D. S. Taubman, M. W. Marcellin. – Springer-Verlag. – 2002. – 773 p.
2. **Shapiro, J. M.** Embedded image coding using zerotress of wavelet coefficients / J. M. Shapiro // IEEE Trans. Signal Processing. – 1993. – № 41. – P. 3445–3462.
3. **Said, A.** A new, fast, and efficient codec based on set partitioning in hierarchal trees / A. Said, W. A. Pearlman // IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology. – 1996. – Vol. 6. – P. 243–250.
4. **Islam, A.** Set partitioned sub-block coding (speck) / A. Islam, W. A. Pearlman // ISO/IEC/JTC1/SC29, WG1. – 1998. – № 873. – P. 312–326.
5. **Abramson, N.** Information Theory and Coding / N. Abramson. – McGraw-Hill, New York – 1963.
6. **Abdmouleh, M. K.** A New Method Which Combines Arithmetic Coding with RLE for Lossless Image Compression / M. K. Abdmouleh, A. Masmoudi, M. S. Bouhlel // Journal of Software Engineering and Applications. – 2012. – No. 5. – P. 41–44.
7. **Rubin, F.** Arithmetic stream coding using fixed precision registers / F. Rubin // IEEE Trans. If. Theory IT-25, 6. – Nov, 1979. – P. 672–675.
8. **Golomb, S. W.** Run Length Encoding / S. W. Golomb // IEEE Transactions on Information Theory. – July, 1966. – P. 399–401.

Поступила
04.07.2019

После доработки
13.11.2019

Принята к печати
01.12.2019

SADIQ B. J. S., V. YU. TSVIATKOU, BOBOV M. N.

COMBINED CODING OF BIT PLANES OF IMAGES

The aim of this work is to reduce the computational complexity of lossless compression in the spatial domain due to the combined coding (arithmetic and Run-Length Encoding) of a series of bits of bit planes. Known effective compression encoders separately encode the bit planes of the image or transform coefficients, which leads to an increase in computational complexity due to multiple processing of each pixel. The paper proposes the rules for combined coding and combined encoders for bit planes of pixel differences of images with a tunable and constant structure, which have lower computational complexity and the same compression ratio as compared to an arithmetic encoder of bit planes.

Keywords: *combined coding, image compression, bit planes, arithmetic coding, Run-Length Encoding, computational complexity, compression codecs.*

Работа выполнена в рамках НИР «Разработка алгоритмов и программных средств обнаружения и сопровождения наземных объектов, определения их местоположения по изображениям земной поверхности» (№ госрегистрации 20182047).



Садик Б. Д. С. – стажер кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: baqir.alsadiq@gmail.com

Sadiq B. J. S., trainee of the department of information and communication technologies of the Belarusian State University of Informatics and radioelectronics.



Цветков В. Ю. – Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: vtsvet@bsuir.by.

V. Yu. Tsviatkou. Doctor of Engineering, associate professor, head of department of infocommunications of Belerussian state university of informatics and radioelectronics.



Бобов М. Н. – Доктор технических наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: nikitich.b@tut.by

Bobov M. N., PhD, professor, department of infocommunications of Belorussian state university of informatics and radioelectronics.