

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.932

**АЛЬ-БАХДИЛИ**  
**Хасан Кассим**

**СЖАТИЕ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ  
КОДИРОВАНИЯ ДЛИН СЕРИЙ С ПЕРЕСТАНОВКАМИ  
СИМВОЛОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Минск 2019

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Конопелько Валерий Константинович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Липницкий Валерий Антонович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики УО «Военная академия Республики Беларусь»

**Касанин Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, зам. директора по науке научно-производственного республиканского унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт технической защиты информации»

Оппонирующая организация УО «Белорусская государственная академия связи»

Защита состоится 11 Апреля 2019 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат технических  
наук, доцент

Т. А. Пулко

## **КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ**

Сжатие широко используется для согласования объема данных с пропускной способностью канала передачи или емкостью запоминающего устройства. Наиболее эффективные кодеки сжатия полутоновых изображений основаны на энтропийном кодировании коэффициентов преобразований и позволяют достичь высоких коэффициентов сжатия за счет высокой вычислительной сложности. В условиях ограниченных временных и вычислительных ресурсов используются простые кодеки. Наиболее простым и быстрым является кодирование длин серий (RLE – Run-Length Encoding), ориентированное на обработку последовательностей символов с высокой вероятностью повтора. Однако его непосредственное использование для сжатия полутоновых изображений, имеющих высокую вероятность коротких серий пикселей вдоль строк или столбцов, неэффективно по сравнению с другими кодеками. Причем, если для старших битовых плоскостей изображений характерен большой разброс вероятностей повтора бит, то в младших битовых плоскостях доминируют короткие серии, делающие использование алгоритма RLE неэффективным. Повышение эффективности кодака RLE для сжатия полутоновых изображений возможно за счет использования при кодировании дополнительных символов, позволяющих эффективно кодировать короткие серии пикселей и бит в младших битовых плоскостях; перехода от кодирования пикселей к кодированию битовых плоскостей; перестановок пикселей и бит, позволяющих повысить вероятность повтора их значений. Исследованию данного подхода посвящена диссертационная работа.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами**

Тема диссертационной работы соответствует пункту 5.4 приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 585 от 19 апреля 2010 г., «Математические и интеллектуальные методы, информационные технологии и системы распознавания и обработки образов, сигналов, речи и мультимедийной информации», а также пункту 5 приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12 марта 2015 г., «Информатика и космические исследования». Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках НИР ГБ 11-2033 «Разработка и исследование методов и технологий построения мультисервисных локальных мобильных сетей» (2011–

2015 гг.) и НИР ГБ 16-2033 «Исследование методов обработки и передачи видеоданных в инфокоммуникациях» (2016–2020 гг.).

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является разработка кодеков длин серий с низкой вычислительной сложностью, обеспечивающих повышение коэффициента сжатия полутоновых изображений за счет компактного представления коротких серий пикселей и бит и их предварительной перестановки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать структуры блочных и поточных кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий пикселей с подтверждениями повтора, обеспечивающие повышение коэффициента сжатия полутоновых изображений за счет использования в кодовых словах коротких серий пикселей нескольких бит подтверждения повтора вместо многоразрядных значений счетчика серии;

– разработать структуры блочных и поточных кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий бит с подтверждениями повтора, обеспечивающие повышение коэффициента сжатия полутоновых изображений за счет перестановок бит младших битовых плоскостей в зависимости от длин серий старших битовых плоскостей.

### **Научная новизна**

1 Разработаны структуры блочного и поточного кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий пикселей с тремя подтверждениями повтора, отличающиеся от кодирования длин серий RLE использованием до трех бит подтверждения повтора для представления коротких серий пикселей, что позволило повысить коэффициент сжатия полутоновых изображений в среднем в 1,2 раза без существенного роста вычислительной сложности.

2 Разработаны структуры блочного и поточного кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора, отличающиеся от кодирования длин серий RLE использованием нескольких бит подтверждения повтора вместо коротких серий бит, что позволило повысить коэффициент сжатия полутоновых изображений в среднем в 1,1 раза без существенного роста вычислительной сложности.

3 Разработаны структуры блочного кодера и декодера, алгоритм кодирования длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора и предварительной перестановкой, отличающиеся от кодирования длин серий RLE использованием нескольких бит подтверждения повтора, перестановок и отдельного кодирования бит нижних битовых плоскостей в зависимости от длин серий верхних битовых плоскостей, что позволило повысить коэффициент сжатия

в среднем в 1,2 и 1,4 раза для полутоновых изображений видимого и инфракрасного диапазонов соответственно при увеличении вычислительной сложности примерно в 1,7 и 3 раза.

### **Положения, выносимые на защиту**

1 Структуры блочного и поточного кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий пикселей с тремя подтверждениями повтора, использующие до трех бит подтверждения повтора для представления коротких серий пикселей изображения.

2 Структуры блочного и поточного кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора, использующие несколько бит подтверждения повтора вместо коротких серий бит изображения.

3 Структуры блочного кодера и декодера, алгоритм кодирования длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора и предварительной перестановкой, использующие несколько бит подтверждения повтора, перестановки и отдельное кодирование бит нижних битовых плоскостей изображения в зависимости от длин серий верхних битовых плоскостей.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании правил кодирования, структур блочных и поточных кодеков, алгоритмов кодирования и декодирования длин серий пикселей и бит полутоновых изображений, постановке и проведении экспериментов по исследованию их эффективности, обработке и анализу полученных результатов, формулировке выводов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем д-м техн. наук, проф. В. К. Конопелько и д-м техн. наук В. Ю. Цветковым.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международные научно-технические семинары «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, 2014–2016); XIII Международная конференция «Развитие информатизации и государственной системы научно-

технической информации РИНТИ» (Минск, 2015); 14-я научно-техническая конференция БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2016); III Международная научно-практическая конференция «Технологии информатизации и управления» (Гродно, 2016); XV, XIV Белорусско-российские научно-технические конференции «Технические средства защиты информации» (Минск, 2016, 2017); III Международная научно-практическая конференция «Big Data and Advanced Analytics» (Минск, 2017).

Результаты диссертационной работы использованы в лабораторном курсе по дисциплине «Обработка, кодирование и передача изображений в телевизионных системах» специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» магистратуры в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 16 печатных работ, в том числе: 6 статей в научных журналах общим объемом 2,5 авторских листа; 10 статей и тезисов докладов в сборниках материалов конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и четырех приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 162 страниц, из них 112 страниц текста, 87 рисунков на 74 страницах, 25 таблиц на 17 страницах, список использованных библиографических источников (131 наименование на 9 страницах), список публикаций автора по теме диссертации (15 наименований на 2 страницах), 4 приложения на 22 страницах.

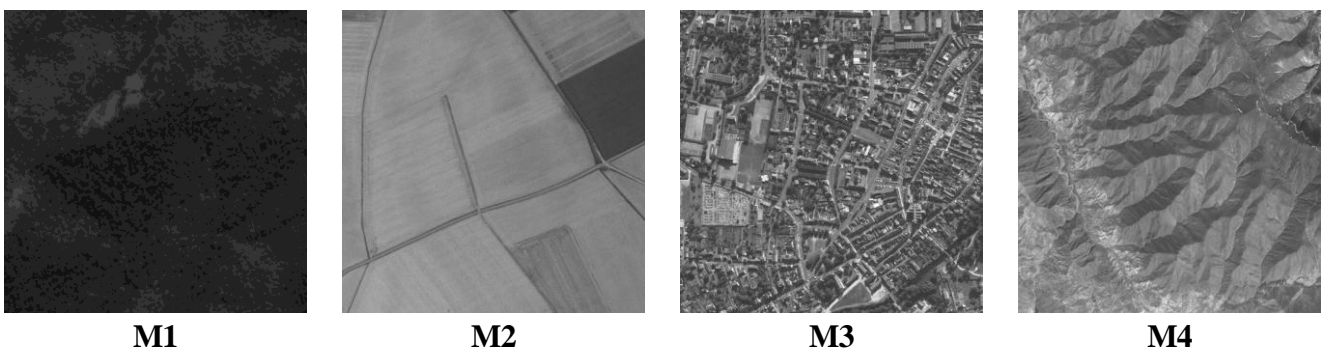
## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость проведения исследований кодеков длин серий, направленных на повышение коэффициента сжатия полутоновых изображений.

В **первой главе** рассмотрены методы эффективного кодирования и сжатия полутоновых изображений. Большинство из них имеет высокую вычислительную сложность, затрудняющую их применение в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Простым в вычислительном плане является алгоритм RLE, однако он существенно уступает другим алгоритмам по коэффициенту

сжатия. Повышение коэффициента сжатия полутоновых изображений возможно за счет кодирования коротких серий элементов (пикселей, бит) без использования счетчика серии, имеющего значительную разрядность. Известные эффективные методы для повышения коэффициента сжатия полутоновых изображений используют информационные преобразования, квантование и перестановки в сочетании с алгоритмами эффективного кодирования. Наиболее простыми являются операции квантования и перестановки, что позволяет рассматривать их в качестве основных для создания кодеков с низкой вычислительной сложностью, эффективных для сжатия изображений в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Для кодирования полутоновых изображений с высокими коэффициентами сжатия и низкой вычислительной сложностью предлагается подход, основанный на использовании дополнительных символов, позволяющих эффективно кодировать короткие серии пикселей и бит в младших битовых плоскостях; перехода от кодирования пикселей к кодированию битовых плоскостей; перестановок пикселей и бит, позволяющих повысить вероятность повтора их значений.

Во **второй главе** описаны предложенные структуры блочных и поточных кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий пикселей полутоновых изображений с тремя подтверждениями повтора значения пикселя ISBN, которые отличаются от RLE использованием от одного до трех бит подтверждения повтора вместо многоразрядных значений счетчика серии при кодировании коротких последовательностей из одного – трех одинаковых пикселей. Данная особенность позволяет учесть при кодировании высокую вероятность повторения менее четырех одинаковых пикселей в строке. На рисунке 1 приведены тестовые полутоновые изображения с различным числом и резкостью перепадов яркости.



**Рисунок 1. – Тестовые изображения размером 512×512 пикселей**

Для данных изображений на рисунке 2 приведены гистограммы повторов (длин серий) пикселей. Из рисунка следует, что вероятность повтора значения пикселя имеет неравномерное распределение от длины серии и зависит от типа изображения. Алгоритм RLE не учитывает данную особенность и выделяет для кодирования повтора пикселей в строках (счетчика серии) одинаковое число бит.

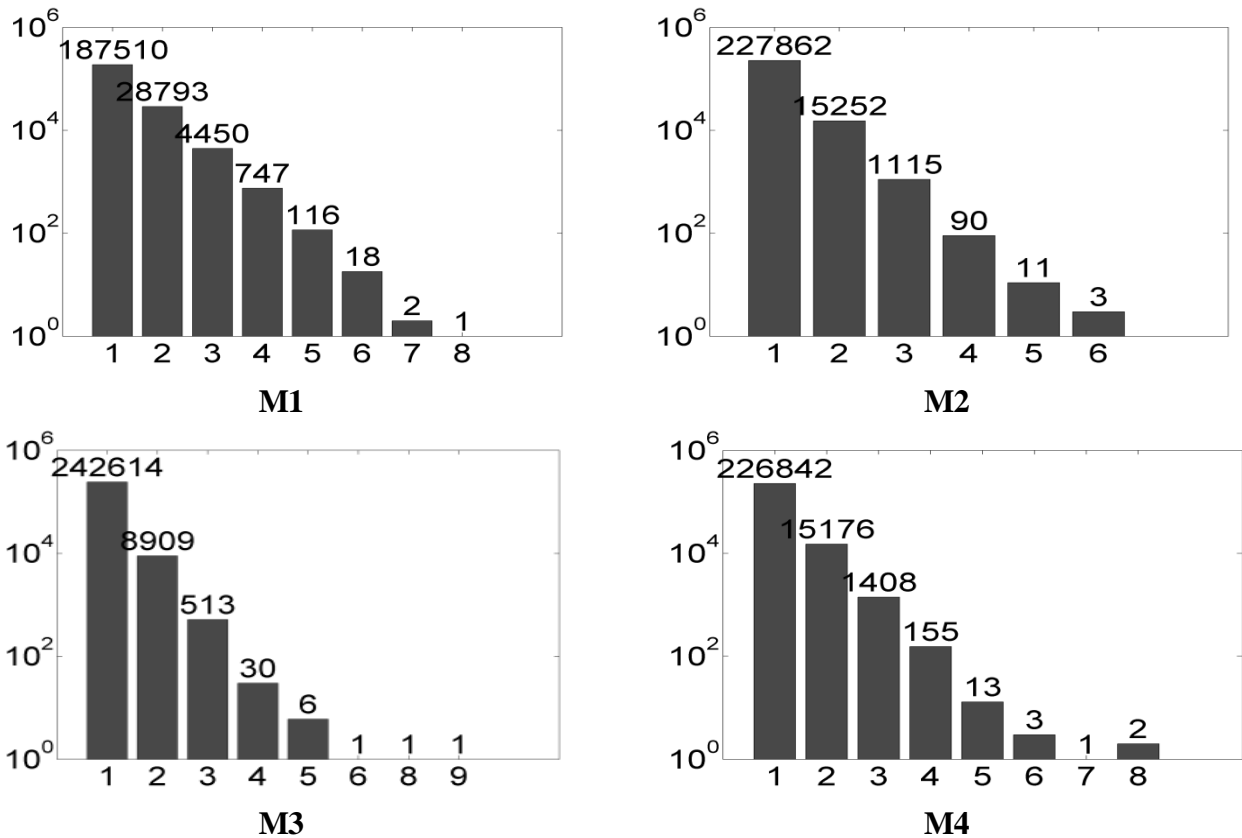
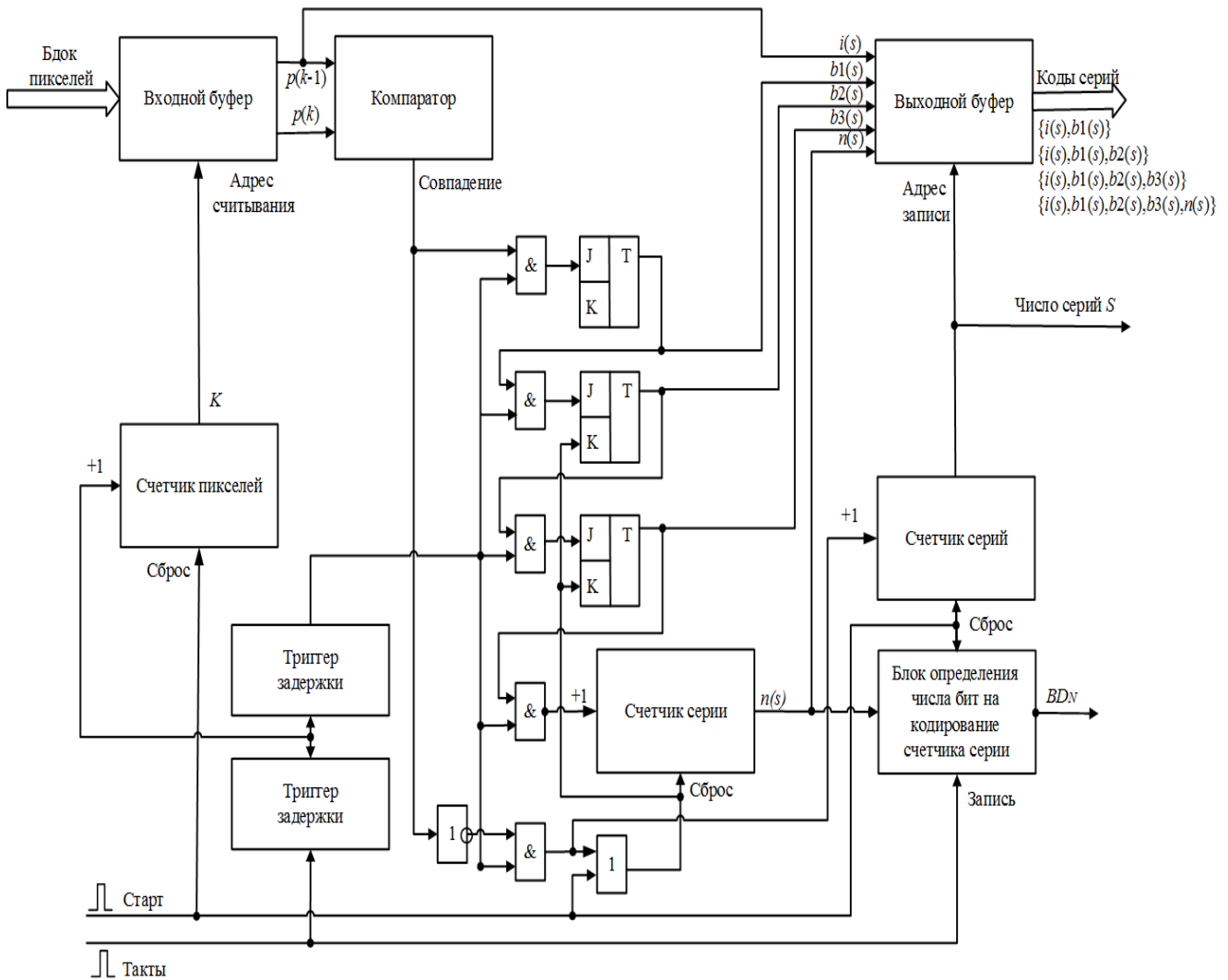


Рисунок 2. – Гистограммы длин серий пикселей в строках тестовых изображений М1–М4

Для повышения коэффициента сжатия в предложенных блочном (рисунок 3) и поточном кодерах длин серий пикселей с тремя подтверждениями повтора ISBN при формировании серии  $s$  ( $s = \overline{0, S-1}$ ) для  $k$ -го ( $k = \overline{0, K-1}$ ) пикселя  $p(k)$  изображения сначала формируется значение  $i(s)$  серии, совпадающее со значением кодируемого пикселя  $p(k)$ :  $i(s) = p(k)$ , где  $S$  – количество серий пикселей в изображении;  $K = YX$  – количество пикселей в изображении. Затем, если значение пикселя  $p(k)$  повторяется:  $p(k+1) = p(k)$ , то формируется первый бит  $b1(s) \leftarrow 1$  подтверждения повтора, иначе  $b1(s) \leftarrow 0$ . Если значение пикселя  $p(k)$  повторяется снова (при  $b1(s) = 1$ ):  $p(k+2) = p(k)$ , то формируется второй бит  $b2(s) \leftarrow 1$  подтверждения повтора, иначе  $b2(s) \leftarrow 0$ . Если значение пикселя  $p(k)$  повторяется снова (при  $b2(s) = 1$ ), то формируется третий бит  $b3(s) \leftarrow 1$  подтверждения повтора, иначе  $b3(s) \leftarrow 0$ . Если значение пикселя  $p(k)$  повторяется снова (при  $b3(s) = 1$ ), то формируется счетчик  $n(s)$  серии, учитывающий число повторов значения пикселя  $p(k)$  (изначально  $n(s) = 0$ , если значение пикселя  $p(k)$  повторяется снова, то  $n(s) > 0$ ). В результате могут формироваться кодовые слова следующего вида:  $\{i(s), b1(s) = 0\}$ ,  $\{i(s), b1(s) = 1, b2(s) = 0\}$ ,  $\{i(s), b1(s) = 1, b2(s) = 1, b3(s) = 0\}$ ,  $\{i(s), b1(s) = 1, b2(s) = 1, b3(s) = 1, n(s)\}$ .





**Рисунок 3. – Структура блочного кодера I3BN длин серий пикселей с тремя подтверждениями повтора**

Блочное кодирование длин серий предполагает накопление определенного числа пикселей в буфере для формирования кодового блока и определения необходимого числа  $BD_N$  бит для представления значений счетчика  $n(s)$  серии. Особенностью поточного кодирования является отсутствие возможности точного определения необходимого числа бит  $BD_N$  для конкретной последовательности пикселей. Данная величина должна быть постоянной, известной кодери и декодери, либо переменной и периодически обновляться в процессе кодирования. В любом случае существует вероятность превышения данной величины, что предполагает передачу дополнительных значений счетчика серии.

Структуры закодированных данных по блочному и поточному алгоритмам I3BN отличаются наборами возможных кодовых комбинаций в части счетчика  $n(s)$  серии, количество которых зависит от вероятности повтора символа в изображении и принятого для поточного кодирования значения числа бит  $BD_N$  (рисунки 4, 5).

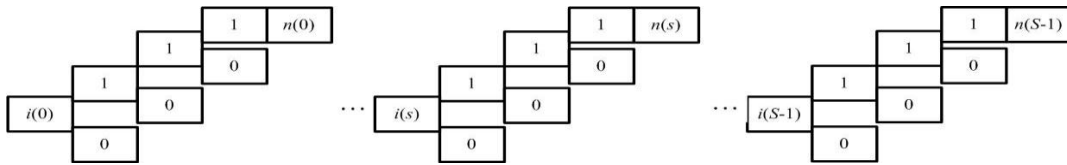


Рисунок 4. – Структура закодированных данных по блочному алгоритму I3BN

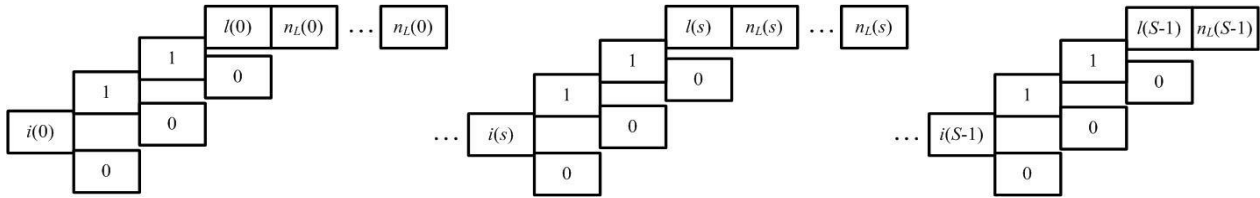


Рисунок 5. – Структура закодированных данных по поточному алгоритму I3BN

Размер  $R_{I/3B/N}$  (бит) кода и вычислительная сложность  $C_{I/2B/N}$  для кодера I3BN при размере изображения  $YX$  определяются с помощью выражений

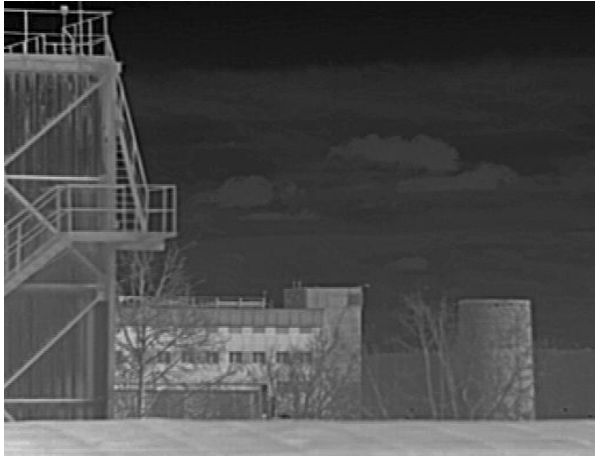
$$R_{I/3B/N} = S(BD_l + 1) + \sum_{s=0}^{S-1} b1(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b2(s) + BD_N \sum_{s=0}^{S-1} b3(s), \quad (1)$$

$$C_{I/3B/N} = YX + 4S + \sum_{s=0}^{S-1} b1(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b2(s) + \sum_{s=0}^{S-1} b3(s). \quad (2)$$

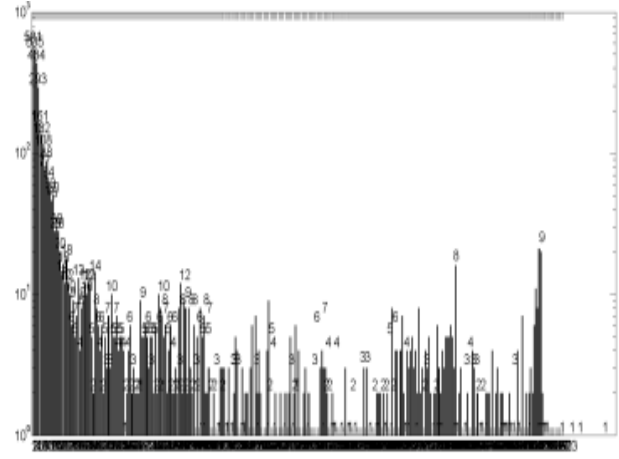
Кодирование длин серий пикселей с тремя подтверждениями повтора обеспечивает повышение коэффициента сжатия в среднем в 1,2 раза по сравнению с кодеком RLE без существенного роста вычислительной сложности. С увеличением числа подтверждений повтора до четырех и более при кодировании длин серий пикселей с несколькими подтверждениями повтора рост коэффициента сжатия изображений не происходит.

В **третьей главе** описаны предложенные структуры блочного и поточного кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора значения бита и предварительной перестановкой.

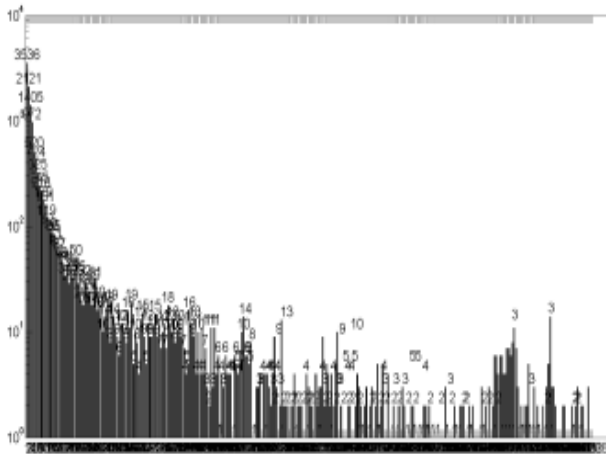
Кодек длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора mBN отличается от RLE использованием нескольких бит подтверждения повтора вместо многоразрядных значений счетчика серии при кодировании коротких последовательностей из соответствующего числа одинаковых бит. Данная особенность позволяет учесть при кодировании снижение вероятности длинных серий с понижением значимости битовой плоскости полутоновых изображений. На рисунке 6 приведено ландшафтное тепловизионное изображение с преобладанием фрагментов без существенных изменений яркости и гистограмма повторов бит (длин серий) в его битовых плоскостях. Из рисунка следует, что в старших битовых плоскостях встречается большое разнообразие длин серий бит и имеет место значительная вероятность длинных серий, в то время как в младших битовых плоскостях вариантов длин серий всего несколько десятков – от 1 до 20 и вероятность длинных серий мала. Следовательно, для младших битовых плоскостей изображений кодирование длин серий бит неэффективно.



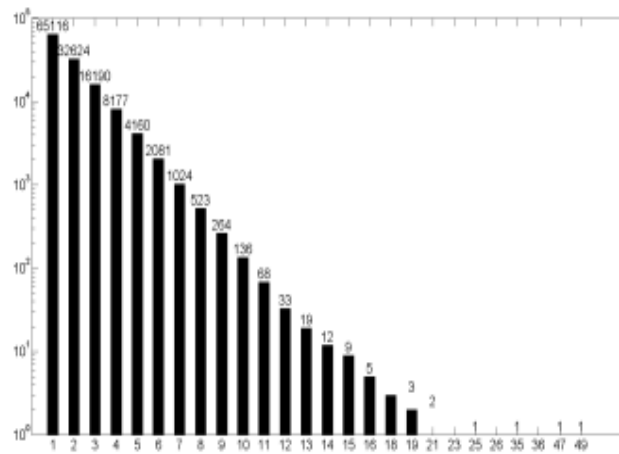
Тестовое изображение M11



Битовая плоскость 7



Битовая плоскость 6



Битовая плоскость 0

Рисунок 6. – Тестовое изображение M11 размером 512×512 пикселей и гистограммы повторов бит в его битовых плоскостях

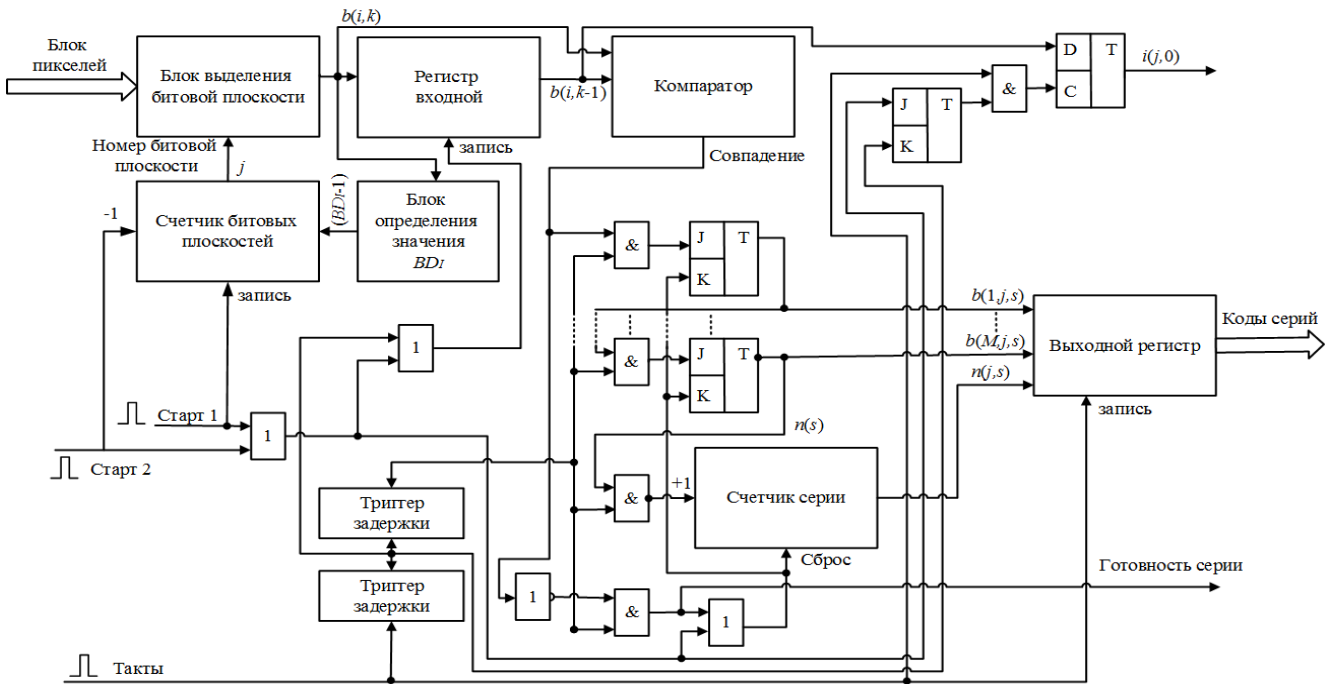


Рисунок 7. – Структура поточного кодера mBN длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора

Для повышения коэффициента сжатия в предложенных блочном и поточном (рисунок 7) кодерах длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора  $m$ BN сначала выполняется инициализация кода текущей  $j$ -й битовой плоскости – формируется первый символ 0 или 1 (символ  $i(j,0)$ ), где  $j = \overline{0, BD_I - 1}$ . При формировании очередной серии  $s$  ( $s = \overline{0, S - 1}$ ), если  $k$ -й ( $k = \overline{0, K - 1}$ ) бит  $b(j,k)$  рассматриваемой битовой плоскости изображения повторяется ( $b(j,k) = b(j,k+1)$ ), то формируется первый бит  $b(1,j,s) \leftarrow 1$  подтверждения повтора, иначе  $b(1,j,s) \leftarrow 0$  и кодирование рассматриваемой серии  $s$  завершается, где  $S$  – количество серий пикселей в изображении;  $K = YX$  – количество пикселей в изображении. Аналогично осуществляется кодирование следующих  $m \leq M - 1$  повторов значения бита  $b(j,k)$  ( $b(j,k) = b(j,k+m-1)$ ), где  $M$  – максимальное количество бит подтверждения повтора.

Если значение бита  $b(j,k)$  повторяется  $M$  раз ( $b(j,k) = b(j,k+m)$  при  $m = \overline{1, M}$  и, следовательно,  $b(m,j,s) = 1$  при  $m = \overline{1, M}$ ), то формируется значение счетчика  $n(j,s)$  серии ( $n(j,s) = r(j,k) - M$ ), учитывающее число повторов значения бита  $b(j,k)$  (изначально  $n(j,s) = 0$ , если значение бита  $b(j,k)$  повторяется, то  $n(j,s) > 0$ ), где  $r(j,k)$  – число повторов значения бита  $b(j,k)$ . В результате могут формироваться кодовые слова следующего вида (при  $m = \overline{0, 3}$ ):  $\{n(j,s)\}$  при  $M = 0$ ,  $j = \overline{0, BD_I - 1}$ ;  $\{b(1,j,s) = 0\}$ ,  $\{b(1,j,s) = 1, n(j,s)\}$  при  $M = 1$ ,  $j = \overline{0, BD_I - 1}$ ;  $\{b(1,j,s) = 0\}$ ,  $\{b(1,j,s) = 1, b(2,j,s) = 0\}$ ,  $\{b(1,j,s) = 1, b(2,j,s) = 1, n(j,s)\}$  при  $M = 2$ ,  $j = \overline{0, BD_I - 1}$ ;  $\{b(1,j,s) = 0\}$ ,  $\{b(1,j,s) = 1, b(2,j,s) = 0\}$ ,  $\{b(1,j,s) = 1, b(2,j,s) = 1, b(3,j,s) = 0\}$ ,  $\{b(1,j,s) = 1, b(2,j,s) = 1, b(3,j,s) = 1, n(j,s)\}$  при  $M = 3$ ,  $j = \overline{0, BD_I - 1}$ .

Структуры закодированных данных с помощью блочного и поточного кодеров  $m$ BN могут отличаться наборами возможных кодовых комбинаций в части счетчика  $n(j,s)$  серии, количество которых зависит от вероятности повтора символа в изображении и принятого в кодере поточного кодирования значения числа бит  $BD_N$  для представления счетчика  $n(j,s)$  серии (рисунки 8, 9).

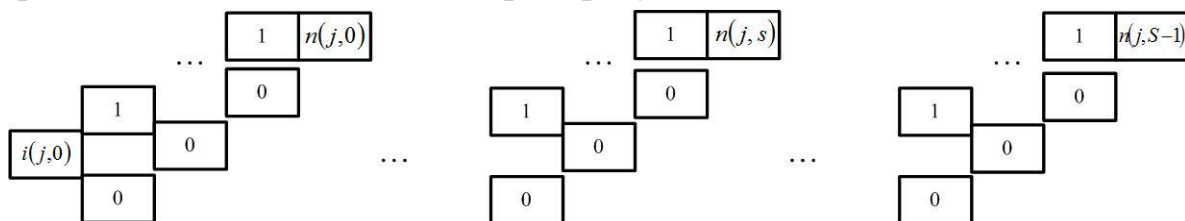
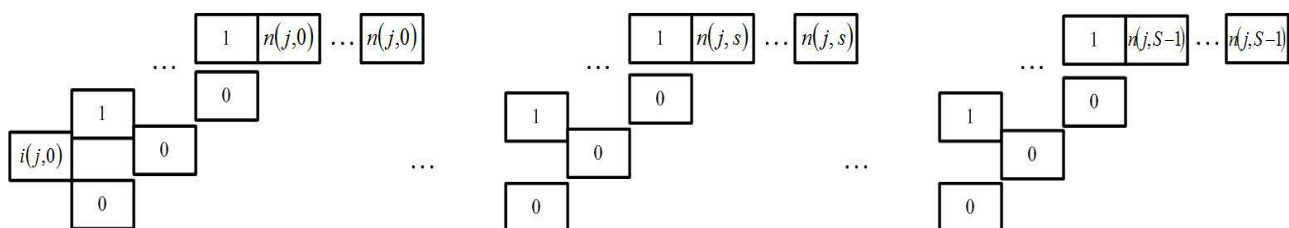


Рисунок 8. – Структура закодированных данных с помощью блочного кодера  $m$ BN



**Рисунок 9. – Структура закодированных данных с помощью поточного кодера mBN**

Размер  $R_{mBN}(j)$  (бит) кода и вычислительная сложность  $C_{mBN}(j)$  для кодера mBN (при  $M = 3$ ) определяются с помощью выражений (для  $j$ -й битовой плоскости):

$$R_{3BN}(j) = 1 + S(j) + \sum_{s=0}^{S(j)-1} b(1, j, s) + \sum_{s=0}^{S(j)-1} b(2, j, s) + BD_N(j) \sum_{s=0}^{S(j)-1} b(3, j, s), \quad (3)$$

$$C_{3BN}(j) = YX + 3S(j) + 2 \left( \sum_{s=0}^{S(j)-1} b(1, j, s) + \sum_{s=0}^{S(j)-1} b(2, j, s) + \sum_{s=0}^{S(j)-1} b(3, j, s) \right), \quad (4)$$

где  $BD_N(j) = \lceil \log_2(\max(n(j, s))_{(s=0, S(j)-1)}) \rceil$  – число разрядов, выделяемых для представления счетчика серии  $n(j, s)$ ;  $\lceil \rceil$  – операция округления с избытком.

Кодек длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора mBN позволяет при использовании от одного до четырех бит подтверждения повтора повысить коэффициент сжатия полутоновых изображений по сравнению с кодеком RLE в среднем в 1,1 раза без существенного роста вычислительной сложности.

Кодек длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора и предварительной перестановкой XmBN отличается от RLE использованием нескольких бит подтверждения повтора, перестановок и отдельного кодирования бит младших битовых плоскостей в зависимости от длин серий старших битовых плоскостей.

В кодере XmBN при кодировании  $j$ -й битовой плоскости ( $(BD_j - 1) > j > 0$ ) (рисунок 10) формируется первый символ  $i(j, p, s)$  нулевой ( $s = 0$ ) серии, равный 0 или 1, для  $p$ -го множества, содержащего  $S(j, p)$  серий бит в результате предварительной перестановки,  $p = \overline{0, P(j)}$ . При формировании очередной серии  $s$  ( $s = \overline{0, S(j, p)-1}$ ), если  $k$ -й ( $k = \overline{0, K(j, p)-1}$ ,  $\sum_{p=0}^{P(j)-1} K(j, p) = YX$ ) бит  $b(j, p, k)$  рассматриваемой битовой плоскости изображения  $p$ -го множества повторяется ( $b(j, p, k) = b(j, p, k+1)$ ), то формируется первый бит  $b(1, j, p, s) \leftarrow 1$  подтверждения повтора, иначе  $b(1, j, p, s) \leftarrow 0$  и осуществляется переход к анализу соответствующего проективного фрагмента бит следующей по убыванию значимости  $(j-1)$ -й битовой плоскости (при  $j = 1$  анализ не производится).

Аналогично осуществляется кодирование следующих  $m \leq M - 1$  повторов значения бита  $b(j, p, k)$  ( $b(j, p, k) = b(j, p, k+m-1)$  при  $m = \overline{1, M}$ ). Если значение бита  $b(j, p, k)$  повторяется  $M$  раз ( $b(j, p, k) = b(j, p, k+m)$  при  $m = \overline{1, M}$  и, следовательно,  $b(m, j, p, s) = 1$ ), то формируется значение счетчика серии  $n(j, p, s)$  ( $n(j, p, s) = r(j, p, k) - M$ ), учитывающее число повторов значения бита  $b(j, p, k)$  (изначально  $n(j, p, s) = 0$ , если значение бита  $b(j, p, k)$  повторяется более  $M$  раз, то  $n(j, p, s) > 0$ ), где  $r(j, p, k)$  – число повторов значения бита  $b(j, p, k)$ . Кодирование серии  $s$  завершается анализом соответствующего проективного фрагмента бит

следующей по убыванию значимости  $(j-1)$ -й битовой плоскости. В зависимости от преобладания нулевых или единичных бит анализируемый проективный фрагмент относится к одному из двух  $p$ -х множеств, кодируемых далее отдельно, а к кодируемому  $s$ -му фрагменту  $p$ -го множества  $j$ -й битовой плоскости добавляется бит перестановки  $x(j, p, s)$ , равный 0 или 1 соответственно.

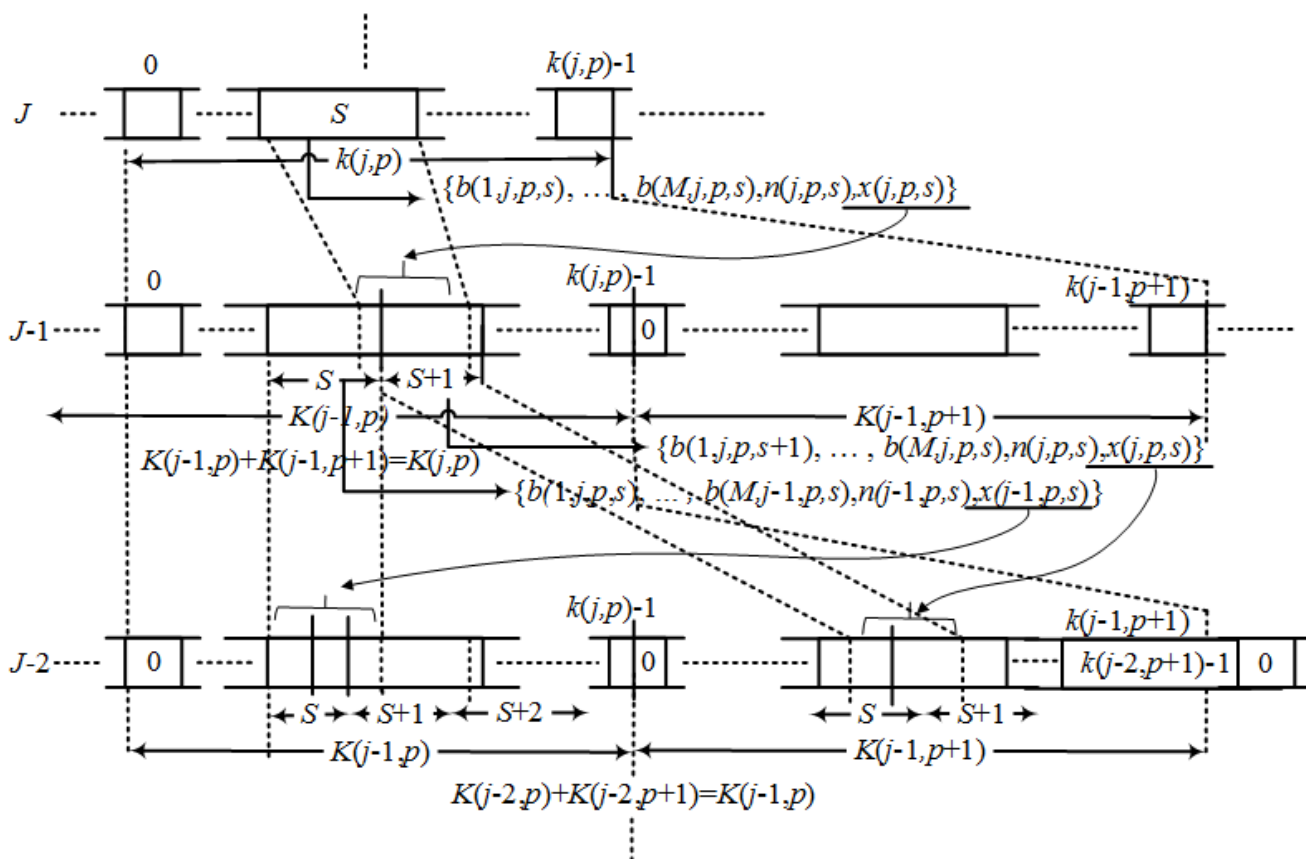


Рисунок 10. – Схема кодирования битовых плоскостей в кодере XmVN

Перечисленные операции выполняются для всех  $P(j)$  множеств переставленных бит  $j$ -й плоскости. Таким образом, проективные фрагменты бит  $j$ -й битовой плоскости, соответствующие сериям в старшей  $(j+1)$ -й битовой плоскости, распределяются по множествам в  $j$ -й битовой плоскости в зависимости от значений соответствующих бит  $x(j+1, p, s)$  перестановки в старшей  $(j+1)$ -й битовой плоскости. Каждое  $p$ -е множество бит  $j$ -й битовой плоскости кодируется независимо от других с использованием кодера mBN и  $M$  подтверждений повтора.

В результате формируются коды серий  $p_j$ -го множества  $j$ -й битовой плоскости (при  $M = 3$ ):

$$i(j, p_j, 0), \dots, \{b(1, j, p_j, s) = 0, x(j, p_j, s)\}, \{b(1, j, p_j, s) = 1, b(2, j, p_j, s) = 0, x(j, p_j, s)\}, \\ \{b(1, j, p_j, s) = 1, b(2, j, p_j, s) = 1, b(3, j, p_j, s) = 0, x(j, p_j, s)\}, \\ \{b(1, j, p_j, s) = 1, b(2, j, p_j, s) = 1, b(3, j, p_j, s) = 1, n(j, p_j, s), x(j, p_j, s)\}$$

при  $s = \overline{S(j, p_j) - 1}$ .

Размер  $R_{XmBN}$  (бит) кода и вычислительная сложность  $C_{XmBN}$  для кодера XmBN (при  $M = 3$ ) определяются с помощью выражений

$$R_{X3BN} = 1 + S(BD_I - 1, 0) + \sum_{s=0}^{S(BD_I-1,0)-1} b(BD_I - 1, 0, 1, s) + \sum_{s=0}^{S(BD_I-1,0)-1} b(BD_I - 1, 0, 2, s) + BD_N(BD_I - 1, 0) \sum_{s=0}^{S(BD_I-1,0)-1} b(BD_I - 1, 0, 3, s) + \sum_{j=0}^{BD_I-2} \sum_{p=0}^{P(j)-1} \left( 1 + 2S(j, p) + \sum_{s=0}^{S(j,p)-1} b(j, p, 1, s) + \sum_{s=0}^{S(j,p)-1} b(j, p, 2, s) + BD_N(j, p) \sum_{s=0}^{S(j,p)-1} b(j, p, 3, s) \right), \quad (5)$$

$$C_{X3BN}(J_{X3BN}) = (BD_I - J_{X3BN} + 3)IX + 11 \sum_{j=J_{X3BN}}^{BD_I-1} \sum_{p=0}^{P(j)-1} S(j, p) + 2 \left( \sum_{j=J_{X3BN}}^{BD_I-1} \sum_{p=0}^{P(j)-1} \sum_{s=0}^{S(j,p)-1} b(j, p, 1, s) + \sum_{j=J_{X3BN}}^{BD_I-1} \sum_{p=0}^{P(j)-1} \sum_{s=0}^{S(j,p)-1} b(j, p, 2, s) + \sum_{j=J_{X3BN}}^{BD_I-1} \sum_{p=0}^{P(j)-1} \sum_{s=0}^{S(j,p)-1} b(j, p, 3, s) \right), \quad (6)$$

где  $BD_N(j, p) = \lceil \log_2(\max_{s=0, S(j,p)-1} n(j, p, s)) \rceil$  – число разрядов, выделяемых для представления символа  $n(j, p, s)$ ;  $J_{X3BN}$  – число старших битовых плоскостей, для которых алгоритм XmBN обеспечивает коэффициент сжатия больше единицы.

Кодек длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора и предварительной перестановкой XmBN при использовании от одного до трех бит подтверждения повтора позволяет повысить коэффициент сжатия по сравнению с кодеком RLE в среднем в 1,2 и 1,4 раза для полутонных изображений видимого и инфракрасного диапазонов соответственно при увеличении вычислительной сложности примерно в 1,7 и 3 раза.

В четвертой главе приведены результаты исследований использования разработанных кодеков длин серий в сочетании с рекурсивными перестановками и квантованием.

Анализ распределений вероятностей длин серий пикселей полутонных изображений после рекурсивных перестановок Гильберта показал, что они приводят к увеличению вероятности длинных серий пикселей. Аналогичные результаты получены для рекурсивных перестановок бит в старших битовых плоскостях полутонных изображений. Таким образом, рекурсивные перестановки способствуют повышению эффективности кодирования длин серий пикселей и бит изображений. Наибольшее увеличение коэффициента сжатия обеспечивает рекурсивная перестановка Гильберта – в 1,1 раза для кодера длин серий бит с тремя подтверждениями повтора и предварительной перестановкой. Использование рекурсивной перестановки приводит к одновременному визуальному шифрованию изображений без изменения распределения вероятностей значений пикселей (рисунок 11).

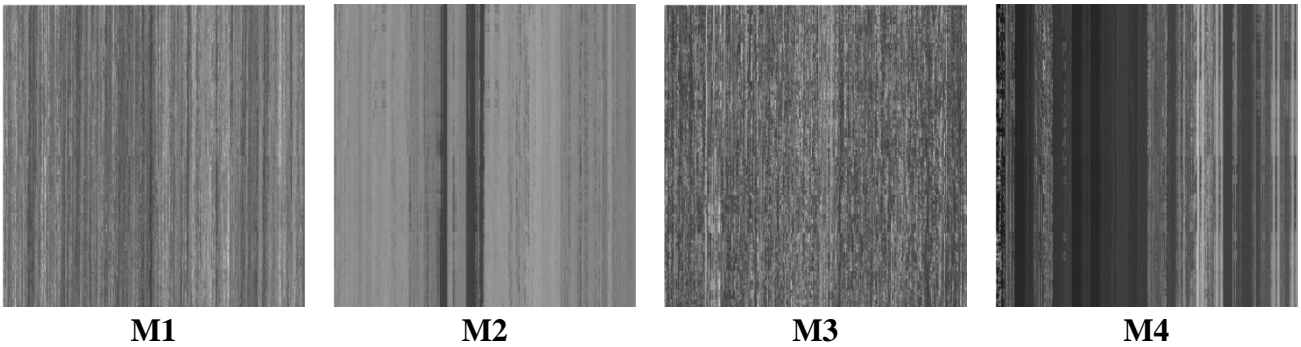


Рисунок 11. – Перестановки Гильберта для тестовых изображений М1–М4

Для оценки эффективности сжатия полутоновых изображений с потерями на основе кодирования длин серий пикселей использован алгоритм построчного двухпорогового квантования, основанный на оценке разности значений центрального пикселя и соседних с ним пикселей в окрестности Мура по отношению к двум порогам: основному  $\Delta_B$  (определяет условия разделения значений яркости соседних пикселей по соседним уровням квантования) и дополнительному  $\Delta_S$  (определяет условия приведения значения пикселя к несоответствующему ему уровню квантования из-за локального характера отличия яркости этого пикселя от яркости окрестных пикселей). Пороги связаны соотношением  $\Delta_B = K\Delta_S$ , где  $K \geq 1$  – балансный коэффициент, определяющий степень влияния значения второго порога на результаты квантования (если значение  $K$  стремится к  $\infty$ , то результаты квантования стремятся к результатам однопорогового алгоритма).

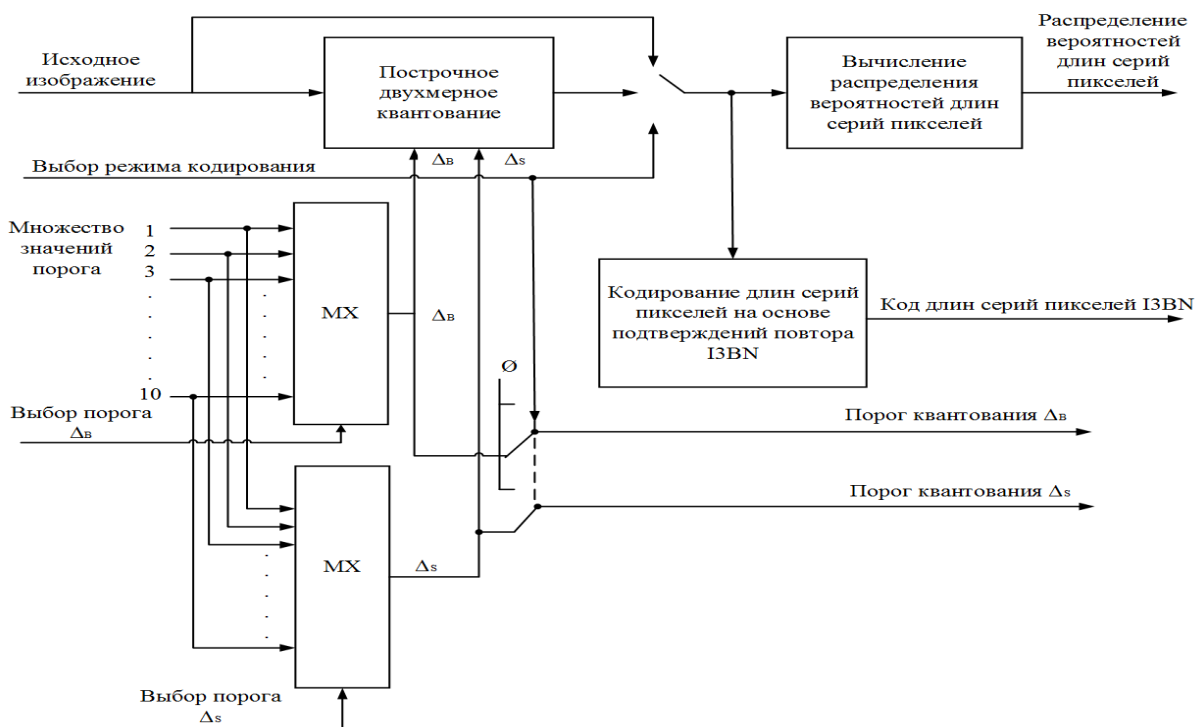


Рисунок 12. – Схема подбора значений порогов квантования для сжатия изображений с потерями при кодировании длин серий



На рисунке 12 приведена схема подбора значений порогов для получения наибольшего коэффициента сжатия изображений с потерями с помощью кодера длин серий пикселей с тремя подтверждениями повтора (I3BN). При сжатии с потерями данный кодер обеспечивает большую эффективность в сравнении с базовым кодером RLE, а также предложенными кодерами длин серий бит с тремя подтверждениями повторов (3BN) и предварительной перестановкой (X3BN).

С помощью данной схемы установлено, что для уменьшения среднеквадратичной ошибки квантования и повышения коэффициента сжатия полутоновых изображений необходимо использовать различные значения порога квантования в различных диапазонах изменения коэффициента сжатия. Исключения составляют изображения оптического диапазона с узкой (около 50 уровней) гистограммой яркости, для которых рекомендуется использовать фиксированное значение основного порога квантования, равное двум. Для изображений оптического диапазона с широкими гистограммами яркости рекомендуется использовать фиксированный основной порог квантования, равный двум, при увеличении коэффициента сжатия более чем в 1,6 раза. Для изображений инфракрасного диапазона фиксированный основной порог квантования, равный двум, рекомендуется использовать при сжатии более чем в 6 раз. Выбор порогов квантования согласно данным рекомендациям позволяет повысить коэффициент сжатия в 1,1 – 1,5 раза в зависимости от типа изображения (до 1,2 раза с усреднением по типам изображений).

В приложениях содержатся расчетные и экспериментальные данные, акт о практическом использовании результатов диссертационной работы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1 Разработаны структуры блочного и поточного кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий пикселей с тремя подтверждениями повтора, использующие в отличие от кодирования длин серий RLE от одного до трех бит подтверждения повтора вместо многоразрядных значений счетчика серии при кодировании коротких последовательностей из одного – трех одинаковых пикселей, что позволило повысить коэффициент сжатия полутоновых изображений в среднем в 1,2 раза без существенного роста вычислительной сложности. Установлено, что увеличение числа бит подтверждения повтора до четырех и более не приводит к росту коэффициента сжатия полутоновых изображений [1, 2, 5].

2 Разработаны структуры блочного и поточного кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора, использующие в отличие от кодирования длин серий RLE несколько бит подтверждения повтора вместо многоразрядных значений счетчика серии при кодировании коротких последовательностей из соответствующего числа одинаковых бит, что позволило при использовании от одного до четырех бит подтверждения повтора повысить коэффициент сжатия полутоновых изображений в среднем в 1,1 раза без существенного роста вычислительной сложности [1].

3 Разработаны структура блочного кодека и алгоритм кодирования длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора и предварительной перестановкой, использующие в отличие от кодирования длин серий RLE несколько бит подтверждения повтора, перестановки и отдельное кодирование бит младших битовых плоскостей в зависимости от длин серий старших битовых плоскостей, что позволило при использовании от одного до трех бит подтверждения повтора повысить коэффициент сжатия в среднем в 1,2 и 1,4 раза для полутоновых изображений видимого и инфракрасного диапазонов соответственно при увеличении вычислительной сложности примерно в 1,7 и 3 раза [4].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Предложенные структуры кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий пикселей и бит с подтверждениями повтора и перестановками предназначены для сжатия полутоновых изображений в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, а также могут эффективно использоваться в системах хранения и передачи данных.

Для повышения эффективности блочного кодирования длин серий бит с тремя подтверждениями повтора и предварительной перестановкой и одновременного визуального шифрования кодируемых полутоновых изображений рекомендуется использовать рекурсивную перестановку Гильберта для пикселей на входе кодера, что обеспечивает увеличение коэффициента сжатия в 1,1 раза.

Для сжатия полутоновых изображений с потерями с помощью кодирования длин серий пикселей с несколькими подтверждениями повтора рекомендуется использовать построчное двухпороговое квантование значений пикселей с различными значениями порога квантования в различных диапазонах изменения коэффициента сжатия, что позволяет повысить коэффициент сжатия в 1,1 – 1,5 раза в зависимости от типа изображения (до 1,2 раза с усреднением по типам изображений).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Сжатие полутоновых изображений без потерь на основе кодирования длин серий / Х. К. Аль-Бахдили, Е. Г. Макейчик, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2016. – № 2(96). – С. 63–69.

2. Аль-Бахдили, Х. К. Сжатие изображений дистанционного зондирования земли на основе вероятностного кодирования длин серий пикселей / Х. К. Аль-Бахдили, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2017. – № 1(103). – С. 65–70.

3. Аль-Бахдили, Х. К. Сжатие битовых плоскостей полутоновых изображений посредством вероятностного кодирования длин серий бит с подтверждением повтора / Х. К. Аль-Бахдили, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2017. – № 6(108). – С. 48–54.

4. Аль-Бахдили, Х. К. Вероятностное кодирование длин серий с подтверждением повтора и предварительной сортировкой для сжатия битовых плоскостей полутоновых изображений / Х. К. Аль-Бахдили, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2017. – № 7(109). – С. 12–19.

5. New modified RLE algorithms to compress grayscale images with lossy and lossless compression / H. Al-Bahadily, V. Kanapelko, A. Altaay, V. Tsviatkou // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). – 2016. – Vol. 7. – № 7. – P. 250–255.

6. Al-Bahadily, H. Grayscale image compression using bit plane slicing and developed RLE algorithms / H. Al-Bahadily, V. Kanapelko, V. Tsviatkou // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE). – 2017. – Vol. 6, № 2. – P. 309–314.

### Статьи в сборниках научных трудов, материалов конференций и семинаров

7. Al-Bahadily, H. Developed RLE algorithm and bitplane slicing to compress grayscale images / H. Al-Bahadily, V. Tsviatkou // Big Data и анализ высокого уровня: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2017. – P. 105–109.

8. Модифицированные алгоритмы кодирования длин серий для сжатия полутоновых изображений / Х. К. Аль-Бахдили, В. В. Томилин, В. К. Конопелько, З. Х. Аль-Заиди // Информационные системы и технологии: материалы конф. – Минск, 2016. – P. 212.

9. Реализация кодека кластерного вейвлет-сжатия спутниковых изображений в интегрированной среде Matlab/C / Х. К. Аль-Бахдили, В. В.

Новицкий, М. К. Сален, Е. Г. Макейчик // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С.16–20.

10. Аль-Бахдили, Х. К. Алгоритмы кодирования длин серий для сжатия изображений / Х. К. Аль-Бахдили, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации РИНТИ: материалы конф., Минск, 19 ноября 2015 г. / Минск, 2015. – С. 68–73.

11. Вероятностное кодирование длин серий в сжатии полутоновых изображений / Х. К. Аль-Бахдили, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько, В. Томилин, З. Ал-Заиди, А. Алкалби // Материалы международного научно-технического семинара. – Минск, 2016. – С. 11–17.

12. Кодирование с переключением длин серий / Х. К. Аль-Бахдили, Х. А. Албигарби, В. К. Конопелько, З. Х. Аль-Заиди // Материалы XIV Белорусско-российской научно-технической конференции. – Минск, 2016. – С. 46.

13. Al-Bahadily, H. Modified RLE algorithm for satellite image compression / H. Al-Bahadily, V. Tsviatkou // Материалы XV Белорусско-российской научно-технической конференции, Минск, 6 июня 2017 г. / Минск, 2017. – Р. 37.

14. Аль-Бахдили, Х. К. Сжатие изображений на основе вероятностного кодирования длин серий и двухпорогового квантования / Х. К. Аль-Бахдили, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // ТИМ–2016 : материалы науч. – практ. конф. – Гродно, 2016. – С. 46.

15. Аль-Бахдили, Х. К. кодирования длин серий пикселей изображений с предварительной рекурсивной перестановкой / Х. К. Аль-Бахдили, В. К. Конопелько // Материалы международного научно-технического семинара. – Минск, 2016. – С. 11–16.

### **Тезисы докладов**

16. Аль-Бахдили, Х. К. Оценка эффективности контурных фильтров для обработки аэрокосмических изображений / Х. К. Аль-Бахдили, В. Ю. Цветков, А. В. Костусев // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 мая 2014 г. / УО «Военная академия Республики Беларусь». – Минск, 2014. – С. 234.

**РЭЗІЮМЭ**

Аль-Бахділі Хасан Кассім

**Сціск паўтонавых відарысаў на аснове кадавання даўжынь серый з перастановамі знакаў**

**Ключавыя словы:** сціск паўтонавых відарысаў, кадаванне даўжынь серый, перастановы знакаў.

**Мэта даследаванняў:** распрацоўка кодэкаў даўжынь серый з нізкай вылічальнай складанасцю, забяспечвальных падвышэнне каэфіцыента сціску паўтонавых відарысаў за рахунак кампактнага падання кароткіх серый пікселяў і біт, і іх папярэдняя перастановы.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацаваныя структуры блокавых і струменевых кодэкаў, алгарытмы кадавання і дэкадавання даўжынь серый пікселяў і біт з пацверджаннямі паўтору і папярэдняй перастановай, адрозныя ад кадавання даўжынь серый RLE выкарыстаннем некалькіх біт пацверджання паўтору замест кароткіх серый пікселяў і біт, перастаноў і паасобнага кадавання біт ніжніх бітавых плоскасцяў у залежнасці ад даўжынь серый верхніх бітавых плоскасцяў, што дазволіла павысіць каэфіцыент сціску паўтонавых відарысаў у сярэднім: а) у 1,2 раза – для кадавання даўжынь серый пікселяў з трыма пацверджаннямі паўтору; б) у 1,1 раза – для кадавання даўжынь серый біт з 4-мя пацверджаннямі паўтору; в) у 1,2 і 1,4 раза для паўтонавых відарысаў бачнага і інфрачырвонага дыяпазонаў адпаведна пры павелічэнні вылічальнай складанасці прыкладна ў 1,7 і 3 раза – для кадавання даўжынь серый біт з некалькімі пацверджаннямі паўтору і папярэдняй перастановай. Распрацаваны праграмны сродак сціску паўтонавых відарысаў на аснове кадавання даўжынь серый з перастановамі знакаў, які дазваляе ацаніць эфектыўнасць прапанаваных кодэкаў у параўнанні з RLE і сфармаваць рэкамендацыі па іх выкарыстанню ў спалучэнні з рэкурсіўнымі перастановамі і квантаваннем.

**Ступень выкарыстання:** вынікі дысертацыйнай працы выкарыстаныя ў лабараторным курсе па дысцыпліне "Апрацоўка, кадаванне і перадача відарысаў у тэлевізійных сістэмах" спецыяльнасці "Сістэмы, сеткі і прылады тэлекамунікацый" магістратуры ва ўстанове адукацыі "Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі".

**Вобласць ужывання:** распрацаваныя структуры блокавых і струменевых кодэкаў, алгарытмы кадавання і дэкадавання даўжынь серый пікселяў і біт з пацверджаннямі паўтору і папярэдняй перастановай могуць выкарыстоўвацца для сціску паўтонавых відарысаў у сістэмах перадачы і захоўванні дадзеных з нізкай прадукцыйнасцю.

**РЕЗЮМЕ**

Аль-Бахдили Хасан Кассим

**Сжатие полутоновых изображений на основе кодирования длин серий с перестановками символов**

**Ключевые слова:** сжатие полутоновых изображений, кодирование длин серий, перестановки символов.

**Цель работы:** разработка кодеков длин серий с низкой вычислительной сложностью, обеспечивающих повышение коэффициента сжатия полутоновых изображений за счет компактного представления коротких серий пикселей и бит и их предварительной перестановки.

**Полученные результаты и их новизна:** разработаны структуры блочных и поточных кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий пикселей и бит с подтверждениями повтора и предварительной перестановкой, отличающиеся от кодирования длин серий RLE использованием нескольких бит подтверждения повтора вместо коротких серий пикселей и бит, перестановок и отдельного кодирования бит нижних битовых плоскостей в зависимости от длин серий верхних битовых плоскостей, что позволило повысить коэффициент сжатия полутоновых изображений в среднем: а) в 1,2 раза – для кодирования длин серий пикселей с тремя подтверждениями повтора; б) в 1,1 раза – для кодирования длин серий бит с четырьмя подтверждениями повтора; в) в 1,2 и 1,4 раза для полутоновых изображений видимого и инфракрасного диапазонов соответственно при увеличении вычислительной сложности примерно в 1,7 и 3 раза – для кодирования длин серий бит с несколькими подтверждениями повтора и предварительной перестановкой. Разработано программное средство сжатия полутоновых изображений на основе кодирования длин серий с перестановками символов, позволяющее оценить эффективность предложенных кодеков в сравнении с RLE и сформировать рекомендации по их использованию в сочетании с рекурсивными перестановками и квантованием.

**Степень использования:** результаты диссертационной работы использованы в лабораторном курсе по дисциплине «Обработка, кодирование и передача изображений в телевизионных системах» специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» магистратуры в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

**Область применения:** разработанные структуры блочных и поточных кодеков, алгоритмы кодирования и декодирования длин серий пикселей и бит с подтверждениями повтора и предварительной перестановкой могут использоваться для сжатия полутоновых изображений в системах передачи и хранения данных с низкой производительностью.

**SUMMARY**

Al Bahadily Hassan Kassim

**COMPRESSION OF GRAYSCALE IMAGES BASED ON RUN LENGTH ENCODING WITH DIFFERENT SCAN ORDER**

**Keywords:** grayscale image compression, RLE, pixels scan order.

**Aim of the work:** development low complexity compression algorithms with high compression ratio for grayscale images due to the compact representation of short series of pixels and bits, and their preliminary scan order.

**Research methods and used facilities:** theory of digital image processing, programming environment Matlab.

**Obtained results and their novelty:** developed block and stream codecs algorithms for encoding and decoding of lengths of series of pixels and bits with confirmations of repetition and scan order, using several repetition confirmation bits instead of short series of pixels and bits, permutations and separate coding of the bits of the least significant bit planes in depending on the lengths of the series of the most significant bit planes, which made it possible to increase the compression ratio of grayscale images on average: a) by 1.2 times – for encoding series of pixels with three repeat; b) 1.1 times – for encoding of lengths of bits with 4 confirmations of repetition; c) 1.2 and 1.4 times for grayscale images of the visible and infrared, with an increase in computational complexity of approximately 1.7 and 3 times – for encoding bit plane with several confirmations of repetition and scan order. A software for compressing grayscale images based on coding of lengths of series with permutations of symbols has been developed, which makes it possible to evaluate the effectiveness of the proposed codecs in comparison with RLE and formulate recommendations for their use in combination with recursive permutations and quantization.

**Use guidelines:** the results of the research were used in the laboratory course on the discipline "Processing, coding and transmission of images in television systems" in the specialty "Systems, networks and telecommunications devices" of the master's program in the educational establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics".

**Application area:** Developed block and stream codec structures, coding and decoding algorithms for pixel and bit plane with confirmations of repetition and scan order to compress grayscale images in low capacity data transmission and storage systems.

*Научное издание*

**Аль-Бахдили Хасан Кассим**

**СЖАТИЕ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ  
КОДИРОВАНИЯ ДЛИН СЕРИЙ С ПЕРЕСТАНОВКАМИ  
СИМВОЛОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Подписано в печать .2018. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч. изд. л. . Тираж 60 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,

№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.

ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6