

Коробкин Владимир Владимирович – НИИ МВС ЮФУ; e-mail: vvk@niimvs.ru; г. Таганрог, ул. Чехова, 2; к.т.н.; главный конструктор по направлению; зав. лабораторией.

Кухаренко Анатолий Павлович – e-mail: ss@mvs.sfedu.ru; к.т.н.; доцент; заместитель директора НИИ МВС ЮФУ.

Колоденкова Анна Евгеньевна – Уфимский государственный авиационный технический университет; e-mail: anna82_42@mail.ru; 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12; тел.: +73472730763; кафедра технологии машиностроения; к.т.н.; доцент.

Korobkin Vladimir Vladimirovich – Academician A.V. Kalyaev SRI multiprocessor computer system at Southern Federal University; e-mail: vvk@niimvs.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.; chief designer in the direction; head laboratory.

Kukharensko Anatoly Pavlovich – e-mail: ss@mvs.sfedu.ru; cand. of eng. sc.; associate professor; deputy director Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems.

Kolodenkova Anna Evgen'evna – Ufa State Aviation Technical University; e-mail: anna82_42@mail.ru; 12, K. Marksa street, Ufa, 450008, Russia; phone: +73472730763; the department of engineering technology; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.3.014

DOI 10.18522/2311-3103-2016-8-1426

С.В. Скороход, Н.Ш. Хусаинов**ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ JPWL В УСЛОВИЯХ КОРРЕКЦИИ ПАКЕТНЫХ ОШИБОК ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ВИДЕО В ФОРМАТЕ JPEG 2000***

Рассматривается задача передачи видео в формате jpeg 2000 с применением средств помехоустойчивого кодирования JPWL по зашумленному каналу в условиях возникновения пакетных ошибок. Основная проблема – восстановление потерянного пакета данных средствами JPWL. Поставлена задача проведения экспериментального исследования способности средств JPWL корректировать пакетные ошибки. Методика исследования заключается в моделировании передачи защищенного средствами JPWL видео, состоящего из 1000 кадров одного и того же изображения размером 1024x768 пикселей. Варьируемыми параметрами исследования являются: применяемые для защиты коды Рида-Соломона, количество тайлов изображения, процент потерь RTP пакетов. Рассматривается стандартный вариант защиты и комбинация стандартного варианта с алгоритмом чередования. Конечными результатами эксперимента выступают среднее значения процента полностью и частично восстановленных тайлов от количества тайлов в кодовом потоке. Описан разработанный для проведения исследования программный комплекс, в который включаются кодер и декодер JPWL, средства разбиения кодового потока на RTP пакеты, средства моделирования пакетных потерь, средства сборки кадров из RTP пакетов. Описаны укрупненная схема функционирования кодера и декодера JPWL. Предложен метод чередования кодового потока, предназначенный для повышения его устойчивости к пакетным ошибкам. В процессе исследования выдвинуты две гипотезы, которые были подтверждены полученными экспериментальными результатами. Гипотеза 1: стандартные средства JPWL не способны корректировать пакетные ошибки. Гипотеза 2: стандарт-

* Работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания "Информационно-алгоритмическое обеспечение систем цифрового управления, автономной высокоточной навигации и технического зрения для перспективных летательных аппаратов: разработка теоретических основ проектирования, алгоритмов, способов эффективной и надежной программной реализации, использование высокопроизводительной вычислительной инфраструктуры для экспериментального моделирования".

ные средства JPWL, применяемые совместно с алгоритмом чередования, могут восстанавливать пакетные ошибки. Побочным результатом исследования является вывод о некотором улучшении восстанавливаемости тайлов с ростом количества тайлов в кодированном потоке.

JPEG2000; JPWL; пакетные ошибки; помехоустойчивое кодирование.

S.V. Skorokhod, N.S. Khusainov

THE RESEARCHING OF JPWL TOOLS IN THE CONDITIONS OF PACKET ERROR CORRECTION FOR VIDEO TRANSMISSION IN THE JPEG 2000 FORMAT

The discussion is made on the issue of transmitting video in a JPEG 2000 format using the JPWL tools (Wireless JPEG 2000) for noise-immunity coding through a noisy channel under conditions of burst errors occurrence. The major problem is the restoration of the lost packet using the JPWL tools. It is set out to conduct an experimental study on the ability of JPWL tools to correct burst errors. The methodology of the study consists in modelling a transmission of the JPWL protected video composed of 1,000 frames of one and the same image with a size of 1,024 x 768 pixels. The variable parameters of the study are as follows: the Reed-Solomon codes applied for protection, the number of image tiles, and the RTP (Real-time Transport Protocol) packet loss ratio. A standard variant of protection and a combination of the standard variant with an interleaving algorithm are considered. The final results of the experiment are the average values of the percentage of fully and partially restored tiles of the number of tiles in a code stream. A software system developed for the conduction of study is described, which includes the JPWL encoder and decoder, the tools for partitioning code streams into RTP packets, the tools for packet loss modelling, and the tools for frame assembly from the RTP packets. A macro flowchart of the JPWL encoder and decoder functioning is described. A method for the code stream interleaving is suggested, which is intended for increasing its resistance to burst errors. During the study process, the two hypotheses were put forward, which were confirmed by the experimental results obtained. The first hypothesis is that the standard JPWL tools are not able to correct burst errors. The second hypothesis is that the standard JPWL tools used in conjunction with the interleaving algorithm can recover burst errors. A side effect of the study is the conclusion on a slight improvement of the recoverability of tiles with the increasing number of tiles in a code stream.

JPEG 2000; JPWL; burst errors; noise-immunity coding.

Введение. В работе рассматривается общая проблема передачи видео в формате jpeg 2000 [1] по зашумленному каналу, в частности, по беспроводным сетям. Передача связана с пересылкой сетевых пакетов, несущих фрагменты кодированного видео потока. В результате зашумления канала некоторые пакеты могут быть искажены и отброшены. Следствием таких пакетных ошибок является отсутствие смежных фрагментов видео данных в приемнике, что либо затрудняет их декодирование, либо делает декодирование невозможным. Для защиты кодированного потока jpeg 2000 при передаче по беспроводным сетям разработана спецификация ITU T.810 [2]. В ней описан набор средств, применяемых для одиночного изображения, называемых JPWL. Поскольку видео формата jpeg 2000 представляет собой последовательность независимых друг от друга изображений [3], JPWL используется также для защиты видео данных.

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований способности средств JPWL корректировать пакетные ошибки. Под пакетной ошибкой понимается потеря как минимум одного сетевого пакета с данными при передаче от источника к приемнику [4]. Для проведения такого исследования разработан специализированный программный комплекс, который способен выполнять кодирование и декодирование JPWL, разбиение кодированного потока JPWL на последовательность сетевых пакетов и обратную сборку кодированного потока JPWL из сетевых пакетов с моделированием их потерь. В работе также предлагается метод чередования, который может существенно повысить способность стандартных средств корректировать пакетные ошибки, что также является предметом экспериментального исследования.

Методика исследования. Методика исследования опирается на набор средств защиты JPWL, предназначенных для защиты кодового потока видео кадра [5]. При кодировании в формате jpeg 2000 кадр может быть разбит на несколько прямоугольных фрагментов (тайлов), каждый из которых кодируется отдельно. Структура кодового потока изображена на рис. 1 [6].

SOC	Основной заголовок	Заголовок тайла 1	Данные тайла 1	...	Заголовок тайла N	Данные тайла N	EOC
-----	--------------------	-------------------	----------------	-----	-------------------	----------------	-----

Рис. 1. Структура кодового потока jpeg 2000

Маркеры SOC и EOC обозначают начало и конец конкретного кадра. Основной заголовок содержит данные об изображении в целом: размер, цветовая схема, количество тайлов и др. Заголовок тайла включает информацию о прямоугольном фрагменте изображения, в том числе о его привязке к координатной сетке. Данные тайла – это собственно закодированный фрагмент изображения.

Средства JPWL могут использовать два способа защиты [2]:

- ◆ контрольные суммы *CRC-16* или *CRC-32* – позволяют только обнаружить присутствие ошибок в данных при использовании минимального объема кодов четности;
- ◆ коды Рида-Соломона [7] $RS(n,k)$ (*RS*-коды) – предназначены не только для обнаружения, но и для исправления искаженных данных. Здесь n – длина кодового слова в байтах, состоящего из защищаемого фрагмента данных и кодов четности, а k – количество байт защищаемых данных. Код $RS(n,k)$ позволяет исправить до $(n-k)/2$ искаженных байт в кодовом слове. Спецификацией ITU T.810 предусмотрено использование целого семейства *RS*-кодов от наиболее «слабых» $RS(37,32)$ до наиболее «сильных» $RS(128,32)$ и $RS(160,64)$.

Поскольку контрольные суммы не могут использоваться для защиты от пакетных ошибок, в настоящей работе они не рассматриваются.

Защита кодового потока выполняется добавлением в него специальных сегментов. Предусмотрены четыре вида сегментов.

- ◆ EPC – возможность защиты от ошибок. Вставляется только в основной заголовок. Его задача – сообщить декодеру, что в кодовом потоке присутствуют средства JPWL. Содержит описание использованных методов защиты и, при необходимости, их параметры.
- ◆ EPB – блок защиты от ошибок. Собственно реализует защиту данных с использованием *RS*-кодов. Вставляется в основной заголовок и заголовки тайлов. Содержит параметры применяемой защиты и избыточные коды четности.
- ◆ ESD – дескриптор чувствительности. Задаёт степень чувствительности к ошибкам участков кодового потока. Чем больший вклад в формируемое изображение вносит фрагмент кодового потока, тем больше его чувствительность.
- ◆ RED – дескриптор остаточной ошибки. Используется только в заголовках декодированного кодового потока. Описывает участки, которые либо полностью восстановлены, либо не были восстановлены декодером JPWL и содержат остаточные ошибки.

Сегмент ESD используется только кодером JPWL с целью реализации более надежной защиты наиболее ценных участков кодового потока. Для декодера JPWL он не несет никакой полезной информации, существенно увеличивая при этом размеры заголовков и всего кодового потока в целом. В связи с этим при передаче видео целесообразно отказаться от использования сегмента ESD [8, 9] и в настоящем исследовании этот сегмент не используется.

Методика исследования заключается в моделировании передачи защищенного средствами JPWL видео, состоящего из 1000 кадров одного и того же изображения размером 1024x768 пикселей, предварительно закодированного кодером jpeg 2000 системы OpenJpeg 2.1.0 [10]. Полученный кодовый поток загружается в разработанную автором исследовательскую программную систему, в которой он последовательно проходит следующие этапы обработки:

- ◆ кодирование JPWL;
- ◆ разбиение на RTP-пакеты, соответствующие спецификации RFC 5371 [11, 12];
- ◆ моделирование потерь пакетов по заданному проценту потерь;
- ◆ сборка кодового потока из оставшихся пакетов;
- ◆ декодирование JPWL и подсчет статистики декодирования.

Неизменными параметрами в исследовании являются способ защиты заголовков и размер RTP пакета. Для защиты основного заголовка и заголовков тайлов применяются RS-коды, предопределенные в спецификации T.810. Размер RTP пакета равен 1024 байт.

Переменными параметрами исследования являются виды RS-кодов, применяемых для защиты данных, процент потери пакетов и количество тайлов, на которые разбивается изображение (определяется выбранным размером тайла). Программа исследования приведена в табл. 1.

Таблица 1

Программа исследования

Количество тайлов (размер тайла)	RS-коды для защиты данных	Процент потерь RTP пакетов
12 (256x256)	<i>RS(37,32), RS(64,32), RS(96,32),</i>	1, 3, 5, 10, 15,
48 (128x128)	<i>RS(128,32)</i>	20, 25, 30, 35,
192 (64x64)		40, 45, 50

Статистическими результатами декодирования выступают количество полностью и частично восстановленных тайлов кодового потока.

Следует отметить, что наиболее важной частью кодового потока является основной заголовок. Поэтому для его дополнительной защиты обычно применяется избыточное дублирование пакетов, содержащих его фрагменты [13], в связи с чем, в данном исследовании пакетные ошибки не будут применяться к пакетам основного заголовка.

Инструменты и методы. Для данного исследования был разработан программный комплекс, состоящий из двух модулей: подготовительного и моделирующего. Схема функционирования комплекса изображена на рис. 2.

Исходными данными для подготовительного модуля является кодовый поток jpeg 2000, содержащий 12, 48 или 192 тайла в соответствии с программой исследования, а также набор параметров исследования, в которых задается режим кодирования (с использованием чередования или без) и процент отбрасываемых пакетов. Подготовительный модуль выполняет кодирование JPWL, при необходимости – чередование, разбивает полученный кодовый поток на RTP пакеты в соответствии со спецификацией RFC 5371 и выполняет выгрузку в промежуточные файлы полученную последовательность пакетов, их параметры (количество, длины и т.д.) и параметры исследования.

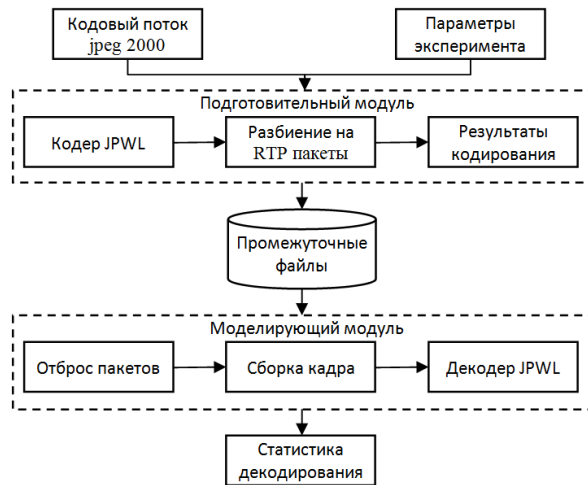


Рис. 2. Исследовательский программный комплекс

Моделирующий модуль загружает подготовленную последовательность пакетов и параметры исследования. Далее выполняются циклические итерации отброса пакетов, сборки кадра и его обработки декодером JPWL. Декодер подсчитывает количество полностью и частично восстановленных тайлов. После выполнения 1000 подобных итераций вычисляется среднее арифметическое этих величин, характеризующее способность декодера восстановить кодированный поток при заданных параметрах кодирования и заданном уровне пакетных ошибок.

Главными звеньями данного комплекса являются кодер и декодер JPWL. В данном исследовании используются библиотеки кодера и декодера, разработанные автором для системы видеотрансляции [14–16].

Обобщенная схема работы кодера JPWL приведена на рис. 3.

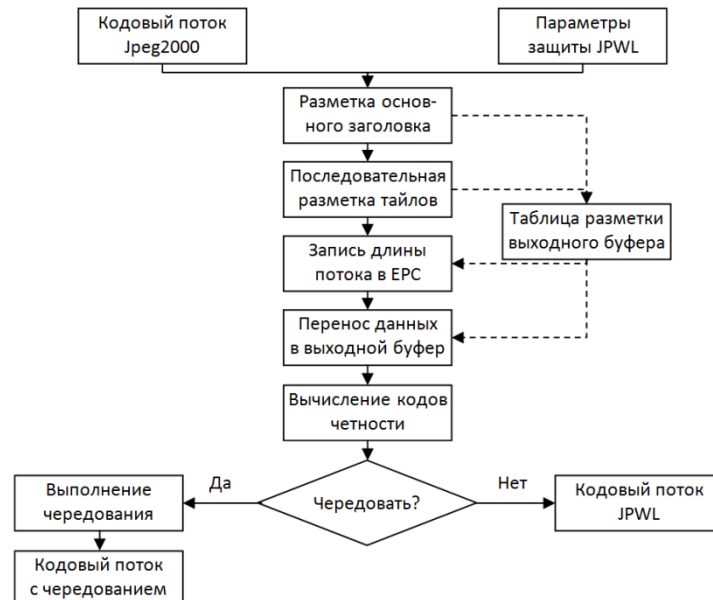


Рис. 3. Схема работы кодера JPWL

Входными данными являются собственно кодовый поток jpeg 2000 и параметры используемых средств защиты JPWL. Кодер выполняет разметку основного заголовка и каждого последующего тайла в выходном буфере. При этом данные о параметрах маркеров JPWL и их местоположении заносятся в таблицу разметки выходного буфера. После окончания прохода входного буфера вычисляется длина выходного потока как сумма длины входного потока и длин всех добавляемых в него маркеров. Полученное значение длины помещается в таблицу разметки в параметры маркера EPC. Далее выполняется копирование на свои места в выходном потоке исходных данных и параметров маркеров JPWL. Последним шагом кодирования является вычисление и вставка в выходной поток кодов четности маркеров EPB. После этого шага формируется кодовый поток JPWL, удовлетворяющий требованию обратной совместимости, т.е. декодер jpeg 2000 способен декодировать данный поток, если в нем нет искажений. При применении алгоритма чередования дополнительно выполняется чередование, результатом которого является кодовый поток JPWL, удовлетворяющий требованию обратной совместимости с расширением: декодер jpeg 2000 способен декодировать такой поток только при наличии декодера JPWL.

Обобщенная схема работы декодера JPWL изображена на рис. 4.

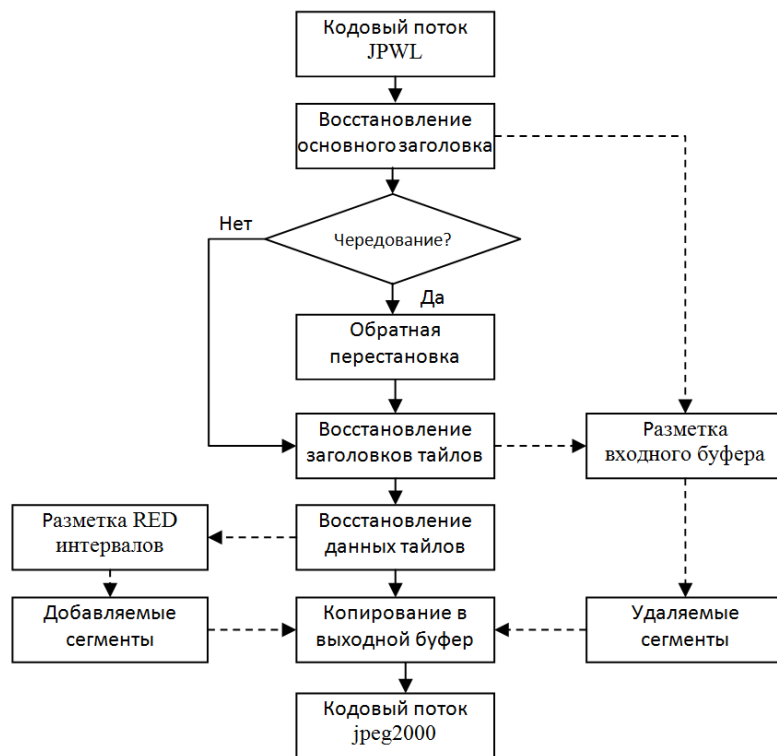


Рис. 3. Схема работы декодера JPWL

Декодер JPWL выполняет декодирование предварительно собранного кадра, последовательно анализируя основной заголовок и заголовки тайлов. При невозможности восстановления основного заголовка весь кадр отбрасывается. Если основной заголовок успешно восстановлен, то анализ сегмента EPC позволяет определить применяется чередование кодового потока или нет. Если чередование применяется, декодер сначала выполняет обратную перестановку, и только после это-

го переходит к анализу тайлов. При невозможности восстановления заголовка тайла пропускается весь тайл и ищется заголовок следующего тайла. При этом пропущенный фрагмент помечается в таблице разметки входного буфера как испорченный. В случае успешного восстановления основного заголовка или заголовка тайла в таблицу разметки заносятся параметры и местоположение всех найденных маркеров JPWL. Восстановление данных тайла выполняется только в случае успешного восстановления его заголовка. При этом часть данных тайла может оказаться скорректированной, а часть – нет. В этом случае создаются записи в таблице RED интервалов, которые описывают начало и конец как исправленных, так и не исправленных фрагментов данных.

По завершении просмотра входного буфера выполняется копирование данных в выходной буфер. При этом выполняется пропуск всех входных маркеров JPWL. При наличии записей в таблице RED интервалов в основной заголовок вставляется сегмент EPC, сигнализирующий о присутствии в кодовом потоке сегментов RED, а в заголовки частично восстановленных тайлов добавляются сегменты RED, описывающие адреса восстановленных и не восстановленных участков.

Подсчет статистики декодера JPWL выполняется на основе результатов восстановления заголовков и данных тайлов. Если после декодирования заголовков тайла не содержит сегмента RED, такой тайл считается полностью восстановленным. Если сегмент RED присутствует – тайл восстановлен частично. Наличие сегмента RED ничего не говорит о качестве данных в частично восстановленном тайле, поэтому в данном исследовании этот вопрос не затрагивается.

Кодер и декодер JPWL поддерживают как стандартный способ защиты, соответствующий спецификации T.810, так и алгоритм чередования, не относящийся к этой спецификации [17]. Сущность алгоритма заключается в том, что основной заголовок остается без изменений, а остальная часть кодового потока подвергается перестановке. Основной заголовок содержит сегмент EPC, в котором записана общая длина кодового потока. Разность общей длины и длины основного заголовка определяет длину данных, которые должны быть переставлены. Эти данные рассматриваются как прямоугольная матрица, заполненная «по строкам». Данные в этой матрице переставляются так, чтобы она оказалась заполнена «по столбцам».

Пусть L – общая длина кодового потока, M – длина основного заголовка. Тогда согласно (ITU-T T.810, 2012) количество столбцов и строк матрицы вычисляется по формулам:

$$N_C = \lceil \sqrt{L - M} \rceil, \quad N_R = \left\lceil \frac{L - M}{N_C} \right\rceil.$$

Следует отметить, что в результате такой перестановки фактическая длина кодового потока несколько увеличивается на стороне кодера, поскольку в матрицу может быть включено до $N_R - 1$ «лишних» элементов. Кодер и декодер JPWL должны учитывать этот факт.

Отличие предлагаемого способа чередования от описанного в [18] заключается в том, что в данном случае чередованию подвергаются весь кодовый поток за исключением основного заголовка. В [18] предлагается перестановка только кодов четности, записанных в сегментах EPB.

Экспериментальное исследование. В исследовании проверяются две основные гипотезы.

Гипотеза 1. Стандартные средства JPWL, соответствующие спецификации T.810, не способны корректировать пакетные ошибки. Критерием, подтверждающим эту гипотезу, является обратная линейная зависимость процента пакетных потерь и суммарного количества полностью и частично восстановленных тайлов.

Проанализируем стандартный способ защиты с применением RS -кодов. Кодовое слово $RS(n,k)$ состоит из двух частей расположенных в разных частях кодового потока. Первую часть составляют избыточные коды четности длиной $n-k$ байт, которые расположены в основном заголовке или заголовках тайлов. Вторая часть – k информационных байт, защищаемых от искажения. При потере пакета возможны три варианта [19].

1. Обе части кодового слова потеряны – восстановление невозможно.
2. Потеряны избыточные коды четности – восстановление невозможно.
3. Потеряны только информационные байты – восстановление возможно только если $k \leq (n-k)/2$. Этому условию соответствуют только коды $RS(160,64)$, $RS(80,25)$, $RS(40,13)$, применяемые для защиты заголовков тайлов, и $RS(96,32)$, $RS(112,32)$, $RS(128,32)$, применяемые для защиты данных тайлов. Остальные 14 предопределенных стандартом кодов не способны произвести восстановление.

Анализируемые в исследовании способы защиты кодами $RS(37,32)$, $RS(64,32)$ не способны скорректировать данные ни в одном из перечисленных вариантов. При применении $RS(96,32)$ и $RS(128,32)$ возможна коррекция данных в варианте 3, однако расплатой за это является значительное увеличение заголовков тайлов, что делает из гораздо уязвимее и может нивелировать возможный положительный эффект.

Гипотеза 2. Стандартные средства JPWL, применяемые совместно с алгоритмом чередования, могут восстанавливать пакетные ошибки. Способность восстановления зависит от используемых RS -кодов и процента пакетных потерь. Критерием, подтверждающим эту гипотезу, является нелинейная зависимость процента пакетных потерь и суммарного количества полностью и частично восстановленных тайлов, при которой до определенного уровня потерь наблюдается сто-процентное восстановление тайлов.

Для проверки гипотезы 1 проведем эксперимент 1. Эксперимент проводится над кодовым потоком jpeg 2000, содержащем 48 тайлов, к которому применяется стандартная защита. Применяемые RS -коды и моделируемые проценты потерь RTP пакетов заданы в программе исследований. Результаты эксперимента приведены в табл. 2 с округлением до целых величин. Для каждого вида RS -кодов указан размер кодового потока JPWL, средний процент полностью и частично восстановленных тайлов.

Таблица 2

Результаты эксперимента 1

Потери пакетов %	RS(37,32) 1025691 байт		RS(64,32) 1767653 байт		RS(96,32) 2647205 байт		RS(128,32) 3526937 байт	
	Полн.	Част.	Полн.	Част.	Полн.	Част.	Полн.	Част.
1	81	18	71	28	69	30	58	40
3	53	44	34	63	35	61	21	76
5	35	60	18	77	16	79	8	85
10	12	78	4	86	4	86	1	87
15	5	81	1	84	1	84	0	81
20	2	78	0	81	0	80	0	76
25	1	75	0	76	0	75	0	71
30	0	69	0	70	0	70	0	65
35	0	64	0	65	0	64	0	60
40	0	59	0	59	0	61	0	54
45	0	55	0	55	0	56	0	50
50	0	50	0	49	0	51	0	43

Данный результат полностью подтверждает гипотезу 1. Более того, надежды на то, что RS -коды $RS(96,32)$ и $RS(128,32)$ дадут лучший результат по сравнению с $RS(37,32)$ и $RS(64,32)$ не оправдались по причине чрезмерного увеличения заголовков тайлов при применении этих кодов.

На рис. 5 изображены графики зависимости суммарного процента полностью и частично восстановленных тайлов (ордината) от процента пакетных ошибок (абсцисса) для эксперимента 1.

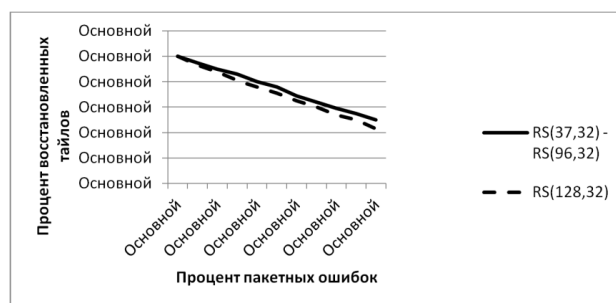


Рис. 5. Графики зависимостей для эксперимента 1

Полученные зависимости полностью соответствуют критерию, подтверждающему гипотезу 1. Кроме того, можно сделать вывод о том, что с увеличением количества тайлов увеличивается процент их восстановления. Это объясняется тем, что чем больше тайлов, тем меньше их размер, что уменьшает вероятность повреждения конкретного тайла, в особенности его заголовка, при пакетной ошибке. Наоборот, чем меньше тайлов, тем больше их размер и более уязвимыми для пакетной ошибки они становятся.

В рамках проверки гипотезы 1 проводились также эксперименты 2 и 3, в которых использовался кодовый поток jpeg 2000, состоящий соответственно из 12 и 192 тайлов. Остальные условия соответствовали эксперименту 1. Данные эксперименты показали схожие зависимости.

Для проверки гипотезы 2 проведен эксперимент 4. Исходные данные для него соответствуют эксперименту 1, но стандартный способ защиты комбинируется с алгоритмом чередования. Результаты эксперимента приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты эксперимента 4

Потери пакетов %	RS(37,32) 1027949 байт		RS(64,32) 1770615 байт		RS(96,32) 2649924 байт		RS(128,32) 3529845 байт	
	Полн.	Част.	Полн.	Част.	Полн.	Част.	Полн.	Част.
1	39	61	100	0	100	0	100	0
3	0	100	100	0	100	0	100	0
5	0	100	100	0	100	0	100	0
10	0	100	98	2	100	0	100	0
15	0	100	28	72	100	0	100	0
20	0	100	0	100	85	15	100	0
25	0	98	0	99	7	91	83	15
30	0	92	0	92	0	92	7	84
35	0	72	0	73	0	72	0	70
40	0	37	0	39	0	39	0	35
45	0	11	0	11	0	11	0	9
50	0	1	0	1	0	1	0	1
	-0,86		-0,86		-0,86		-0,86	

Анализ табл. 5 подтверждает гипотезу 2. Действительно, при уровне пакетных потерь до 25 % любые RS-коды восстанавливают практически все тайлы, изменяется лишь распределение полностью и частично восстановленных тайлов. С дальнейшим ростом пакетных потерь процент восстановленных тайлов начинает снижаться. В эксперименте 4 проявилась еще одна явная зависимость: при применении более «длинных» RS-кодов качество восстановления улучшается, прежде всего за счет большего процента полностью восстановленных тайлов.

На рис. 6 изображен график зависимости суммарного процента полностью и частично восстановленных тайлов (ордината) от процента пакетных ошибок (абсцисса) для эксперимента 4. Полученные зависимости полностью соответствуют критерию, подтверждающему гипотезу 2.

В рамках данного исследования были проведены эксперименты 5 и 6, условия которых совпадали с условиями эксперимента 4, но был использован кодовый поток jpeg 2000, содержащий соответственно 12 и 192 тайла. Результаты этих экспериментов во многом совпадают с таблицей 5 и рисунком 6 с некоторым ухудшением при 12 тайлах и улучшением при 192.

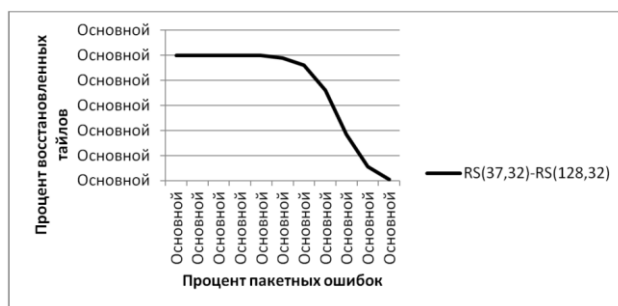


Рис. 6. Графики зависимости для эксперимента 4

Заключение. Данное исследование проведено с использованием программного комплекса, разработанного на языке Си в системе программирования Microsoft Visual Studio 2008. Полученные результаты могут быть использованы для выбора оптимальных параметров JPWL в зависимости от характеристик канала передачи данных.

Направлением дальнейших исследований является экспериментальное исследование влияния пакетных ошибок на качество декодированного изображения в формате jpeg 2000. Для проведения этого исследования требуется разработать декодер jpeg 2000, способный декодировать частично восстановленный кодовый поток, в котором могут отсутствовать некоторые тайлы, а в заголовках имеющихся тайлов присутствовать сегменты остаточной ошибки RED. К сожалению, известные доступные декодеры, такие как JasPer, OpenJpeg [10, 20] не могут декодировать такой кодовый поток.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Набор стандартных средств JPWL, соответствующих спецификации T.810 является недостаточным для эффективной коррекции пакетных ошибок.
2. Сочетание стандартных средств JPWL с предложенным в работе алгоритмом чередования позволяет успешно корректировать пакетные ошибки.
3. Увеличение количества тайлов незначительно повышает устойчивость кодового потока к пакетным ошибкам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Taubman D.S., Marcellin M.W.* JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 773 p.
2. ITU-T Recommendation T.810. Information Technology JPEG2000 Image Coding System: Wireless. – Geneva: ITU, 2007. – 60 p.
3. *Acharya T. Tsai P.* JPEG2000 standard for image compression: concepts, algorithms and VLSI architectures. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 274 p.
4. *Скоруход С.В., Степанова А.П.* Вопросы синхронизации передатчика и приемника в процессе видео трансляции // Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции «Управление интеллектуальной собственностью и инновационной активностью хозяйствующих субъектов, коммерциализация технологий – 2014». – Таганрог, 2014. – С. 122-125.
5. *Скоруход С.В., Артюхова А.С.* Особенности реализации системы JPWL для широкоэшелательной видео трансляции // Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции «Управление интеллектуальной собственностью и инновационной активностью хозяйствующих субъектов, коммерциализация технологий – 2014». – Таганрог, 2014. – С. 131-134.
6. *ITU-T Recommendation T.800. Information Technology JPEG2000 Image Coding System: Core Coding System.* – Geneva: ITU-T Series T: Terminal for Telematic Services, 2003. – 212 p.
7. *Морелос-Сарагоса Р.* Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. – М.: Изд-во Техносфера, 2005. – 320 с.
8. *Skorokhod S.V., Kravchenko P.P., Khusainov N.S.* Some aspects of JPWL implementation for streaming video // International Conference «Engineering & Telecommunication En&T 2014». November 26-28, 2014. Book of Abstracts. – Moscow – Dolgoprudny: MIPT, 2014. – P. 135-136.
9. *Скоруход С.В., Степанова А.П.* Некоторые аспекты технологии сетевого взаимодействия между передатчиком и приемником в процессе видео трансляции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 4 (165). – С. 171-181.
10. An open-source JPEG 2000 codec written in C. Retrieved April 6, 2016, from <http://www.openjpeg.org/>.
11. Network Working Group RFC 5371. RTP Payload Format for JPEG 2000 Video Streams. – The Internet Security (IETF), 2006. – 31 p.
12. Network Working Group RFC 3550. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. – Schulzrinne: BlueCoatSystemsInc., 2003. – 89 p.
13. *Дроздов С.Н.* Реализация алгоритмов кодирования JPEG2000 для системы передачи видеоданных в реальном времени: International Conference «Engineering & Telecommunication En&T 2014». November 26-28, 2014. Book of Abstracts. – Moscow – Dolgoprudny: MIPT, 2014. – С. 69.
14. *Хусаинов Н.Ш., Дроздов С.Н., Скоруход С.В., Жиглатый А.А., Кравченко П.П.* Особенности проектирования и программной реализации системы видеотрансляции на базе семейства стандартов JPEG2000 // Сборник тезисов докладов Международной конференции "Инжиниринг & Телекоммуникации - En&T 2014". – М., 2014. – С. 137-139.
15. *Дроздов С.Н., Жиглатый А.А., Кравченко П.П., Скоруход С.В., Хусаинов Н.Ш.* Об опыте реализации системы видеотрансляции в формате jpeg2000 и перспективах применения стандарта jpeg2000 для передачи видео и мультиспектральных данных с борта БПЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 161-170.
16. *Skorokhod S.V.* The experimental studies of the jpwl tools ability to correct burst errors in a noisy channel when transmitting video in a jpeg 2000 format // Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 10th November, 2015. – Vol. 81, No. 1. – P. 34-42.
17. *Скоруход С.В., Кравченко П.П., Хусаинов Н.Ш.* Анализ реализации средств защиты потокового видео в формате jpeg2000 от ошибок в канале передачи данных для бортовых систем видеотрансляции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8 (157). – С. 219-226.
18. ITU-T Recommendation T.810. Information Technology JPEG 2000 image coding system: Wireless. Amendment 1: IP based wireless networks. – Geneva: ITU-T Series T: Terminal for Telematic Services, 2012. – 6 p.

19. Дроздов С.Н., Жиглатый А.А., Кравченко П.П., Скороход С.В., Хусаинов Н.Ш. Об опыте практической реализации стандартов семейства JPEG2000 при разработке программной системы трансляции видеопотока в реальном масштабе времени в условиях ограниченного сетевого ресурса // Материалы Девятой Всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" и Четвертой молодежной школы-семинара "Управление и обработки информации в технических системах". – Таганрог, 2014. – С. 459-472.
20. Adams, M., Kossentini F. JasPer: A Software-Based JPEG-2000 Codec Implementation // In Proc. of IEEE International Conference on Image Processing, Vancouver, BC, Canada, Oct. 2000. – Vol. 2. – P. 53-56. DOI: 10.1109/ICIP.2000.899223.

REFERENCES

1. Taubman D.S., Marcellin M.W. JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002, 773 p.
2. ITU-T Recommendation T.810. Information Technology JPEG2000 Image Coding System: Wireless. Geneva: ITU, 2007, 60 p.
3. Acharya T. Tsai P. JPEG2000 standard for image compression: concepts, algorithms and VLSI architectures. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005, 274 p.
4. Skorokhod S.V., Stepanova A.P. Voprosy sinkhronizatsii peredatchika i priemnika v protsesse video translyatsii [Issues of synchronization of the transmitter and receiver in the process live video], *Sbornik materialov vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Upravlenie intellektual'noy sobstvennost'yu i innovatsionnoy aktivnost'yu khozyaystvuyushchikh sub"ektov, kommersializatsiya tekhnologii – 2014»* [Collection of materials of all-Russian scientific-practical conference "Management of intellectual property and innovative activity of economic entities, commercialization of technologies – 2014"]. Taganrog, 2014, pp. 122-125.
5. Skorokhod S.V., Artyukhova A.S. Osobennosti realizatsii sistemy JPWL dlya shirokoveshchatel'noy video translyatsii [Peculiarities of implementation of the JPWL system to broadcast live video], *Sbornik materialov vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Upravlenie intellektual'noy sobstvennost'yu i innovatsionnoy aktivnost'yu khozyaystvuyushchikh sub"ektov, kommersializatsiya tekhnologii – 2014»* [Collection of materials of all-Russian scientific-practical conference "Management of intellectual property and innovative activity of economic entities, commercialization of technologies – 2014"]. Taganrog, 2014, pp. 131-134.
6. ITU-T Recommendation T.800. Information Technology JPEG2000 Image Coding System: Core Coding System. Geneva: ITU-T Series T: Terminal for Telematic Services, 2003, 212 p.
7. Morelos-Saragosa R. Isskusstvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primeneniye [The art of error-correcting coding. Methods, algorithms, applications]. Moscow: Izd-vo Tekhnosfera, 2005, 320 p.
8. Skorokhod S.V., Kravchenko P.P., Khusainov N.S. Some aspects of JPWL implementation for streaming video, *International Conference «Engineering & Telecommunication En&T 2014». November 26-28, 2014. Book of Abstracts*. Moscow – Dolgoprudny: MIPT, 2014, pp. 135-136.
9. Skorokhod S.V., Stepanova A.P. Nekotorye aspekty tekhnologii setevogo vzaimodeystviya mezhdru peredatchikom i priemnikom v protsesse video translyatsii [Some aspects of the network technology between the transmitter and the receiver during video broadcast], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 4 (165), pp. 171-181.
10. An open-source JPEG 2000 codec written in C. Retrieved April 6, 2016, from <http://www.openjpeg.org/>.
11. Network Working Group RFC 5371. RTP Payload Format for JPEG 2000 Video Streams. The Internet Security (IETF), 2006, 31 p.
12. Network Working Group RFC 3550. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. – Schulzrinne: BlueCoatSystemsInc, 2003, 89 p.
13. Drozdov S.N. Realizatsiya algoritmov kodirovaniya JPEG2000 dlya sistemy peredachi videodannykh v real'nom vremeni [Implementation of coding algorithms JPEG2000 for transmission system VI-dodanykh in real time]: International Conference «Engineering & Telecommunication En&T 2014». November 26-28, 2014. Book of Abstracts. Moscow – Dolgoprudny: MIPT, 2014, pp. 69.

14. *Khusainov N.Sh., Drozdov S.N., Skorokhod S.V., Zhiglatyy A.A., Kravchenko P.P.* Osobennosti proektirovaniya i programmnoy realizatsii sistemy videotranslyatsii na baze semeystva standartov JPEG2000 [Features design and software implementation of the system of video broadcasting on the basis of the JPEG2000 family of standards], *Sbornik tezisev dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii "Inzhiniring & Telekommunikatsii - En&T 2014"* [Proceedings of the International conference "Engineering & telecommunications - En&T 2014"]. Moscow, 2014, pp. 137-139.
15. *Drozdov S.N., Zhiglatyy A.A., Kravchenko P.P., Skorokhod S.V., Khusainov N.Sh.* Ob opyte realizatsii sistemy videotranslyatsii v formate jpeg2000 i perspektivakh primeneniya standarta jpeg2000 dlya peredachi video i mul'tispektral'nykh dannykh s borta BPLA [On the experience of jpeg2000 broadcasting system implementation and about perspectives of jpeg2000 standard using for transmission of video and multispectral data from UAV] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 161-170.
16. *Skorokhod S.V.* The experimental studies of the jpw1 tools ability to correct burst errors in a noisy channel when transmitting video in a jpeg 2000 format, *Journal of Theoretical and Applied Information TechNology*, 10th November, 2015, Vol. 81, No. 1, pp. 34-42.
17. *Skorokhod S.V., Kravchenko P.P., Khusainov N.Sh.* Analiz realizatsii sredstv zashchity potokovogo video v formate jpeg2000 ot oshibok v kanale peredachi dannykh dlya bortovykh sistem videotranslyatsii [Analysis of the implementation of remedies streaming video format JPEG2000 error in the data transmission channel for on-board video broadcast systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 8 (157), pp. 219-226.
18. ITU-T Recommendation T.810. Information Technology JPEG 2000 image coding system: Wireless. Amendment 1: IP based wireless networks. Geneva: ITU-T Series T: Terminal for Telematic Services, 2012, 6 p.
19. *Drozdov S.N., Zhiglatyy A.A., Kravchenko P.P., Skorokhod S.V., Khusainov N.Sh.* Ob opyte prakticheskoy realizatsii standartov semeystva JPEG2000 pri razrabotke programmnoy sistemy translyatsii videopotoka v real'nom masshtabe vremeni v usloviyakh ogranichenogo setevogo resursa [About the experience of the practical implementation of the JPEG2000 family of standards for software development of the broadcasting system of the video stream in real time, with limited network resources], *Materialy Devyatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya" i Chetvortoy molodezhnoy shkoly-seminara "Upravlenie i obrabotki informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"* [Materials of the Ninth all-Russian scientific-practical conference "advanced systems and control problems" and the Fourth youth school-seminar "Management and processing of information in technical systems"]. Taganrog, 2014, pp. 459-472.
20. *Adams, M., Kossentini F.* JasPer: A Software-Based JPEJ-2000 Codec Implementation, *In Proc. of IEEE International Conference on Image Processing, Vancouver, BC, Canada, Oct. 2000*, Vol. 2, pp. 53-56. DOI: 10.1109/ICIP.2000.899223.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.Е. Веселов.

Скороход Сергей Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: sss64@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371746; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Хусаинов Наиль Шавкятович – e-mail: naile.khussainov@gmail.com; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Skorokhod Sergey Vasilievitch – Southern Federal University; e-mail: sss64@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371746; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Khusainov Nail Shavkyatovich – e-mail: naile.khussainov@gmail.com; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.