

Шинкаренко Константин Всеволодович

**АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ
МУЛЬТИМЕДИА ПОТОКОВ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ**

Специальность 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов
и компьютерных сетей

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск–2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)".

Научный руководитель:

заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Кориков Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Спицын Владимир Григорьевич

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Протасов Константин Тихонович

Ведущая организация:

Новосибирский государственный
технический университет

Защита состоится «29» декабря 2008 г. в 14³⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84, институт «Кибернетический центр» ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «28» ноября 2008 г.

Ученый секретарь Совета
к.т.н., доцент

_____ Сонькин М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время происходит бурное развитие компьютерных сетей и рост числа сетевых приложений, в том числе для передачи цифровых мультимедиа данных. Цифровое телевидение через Интернет, так называемое *IPTV* (*Internet Protocol Television*, *IP* телевидение), является одним из наиболее перспективных сетевых приложений. Как и в любой системе передачи данных, в компьютерных сетях существуют помехи, шумы, ведущие к потерям и искажениям данных. Для борьбы с помехами в системах передачи данных применяется помехоустойчивое кодирование. Помехоустойчивое кодирование выполняет важнейшую роль в цифровых системах передачи данных, так как повышает достоверность передаваемых данных путем внесения систематической избыточности согласно некоторому математическому закону (коду).

Теория помехоустойчивого кодирования была основана в середине XX в. и с тех пор превратилась в хорошо проработанную, математически стройную отрасль науки. Основоположниками теории помехоустойчивого кодирования стали выдающиеся ученые В.А. Котельников, К.Шеннон, У.Питерсон, П.Элиас.

Одной из важнейших сфер практического применения помехоустойчивого кодирования является цифровое телевидение (ЦТВ). Значимость развития цифрового телевидения прекрасно иллюстрирует тот факт, что решения в этой отрасли принимаются на государственном и международном уровнях. Правительство Российской Федерации в апреле 2006 года официально объявило о том, что к 2015 году в России планируется полностью перейти с аналогового на цифровое телевидение. В связи с этим разрабатывается Федеральная целевая программа «Развитие телерадиовещания в Российской Федерации (2007-2015 гг.)».

В наши дни в сфере технологий цифрового телевидения происходят значительные изменения. Все большее количество телезрителей предпочитают пользоваться услугами *IPTV* для просмотра телепередач. По сравнению с системами спутникового и наземного цифрового телевидения, *IPTV* предлагает телезрителю ряд удобств, таких как «видео по запросу», пауза в трансляции и последующий просмотр с места остановки, «виртуальный видеомаягнитофон» (запись передачи, идущей в определенное время) и т.д. В 2005 году количество пользователей *IPTV* составляло 200 млн человек, и ожидается, что их количество увеличится до 400 млн человек в 2010 году.

Сети *IP* являются сетями пакетной передачи данных. Одной из наиболее острых актуальных проблем в *IPTV* является проблема потерь пакетов мультимедиа данных при потоковом телевидении, т.е. телевидении в режиме реального времени. Для потокового телевидения по сетям *IP* используются протоколы стека *IP* с негарантированной доставкой: *UDP*, *RTP*. Использование данных протоколов обусловлено необходимостью доставки пакетов с как можно меньшей задержкой, для плавного воспроизведения видео и звука. Однако, из-за перегрузок коммутаторов, задержек и помех в сетях *IP* происходят потери пакетов, причем теряется пакет целиком. Такой тип ошибки называют «стиранием». Потери пакетов в *IPTV* ведут к деградации качества восприятия видео, частичной или полной пропаже звука.

Классические блочные и сверточные коды не способны решить проблему потерь пакетов целиком. Сверточные коды исправляют отдельные битовые ошибки. Блочный коды, в том числе коды Рида–Соломона, способны исправлять пакеты ошибок в отдельно взятом пакете. И те, и другие бессильны в случае потери пакета целиком. Сделано заключение о том, что для решения проблемы потерь пакетов необходимо применение стирающих помехоустойчивых кодов.

Проблему представляет также применение помехоустойчивых кодов в сетях *IP*, поскольку внедрение уровня помехоустойчивого кодирования должно быть универсальным в плане взаимодействия с существующим сетевым оборудованием. Применение помехоустойчивого кода не должно требовать изменения протоколов стека *IP*.

Разработка помехоустойчивых кодов для систем *IPTV* осложнена тем, что код должен отвечать сразу нескольким требованиям, подчас взаимоисключающим и требующим нахождения компромисса:

- обладать способностью восстановления данных в случае потери целых пакетов при передаче. При этом помехоустойчивый код должен быть корректирующим, т.е. не требовать наличия канала обратной связи между источником и получателем, так как запрос и повторная передача пакетов в системах потокового цифрового телевидения невозможна в силу особенностей мультимедиа данных и способа их обработки;
- обеспечивать высокую эффективность восстановления от ошибок, и тем самым высокое качество восприятия телевизионных программ;
- обеспечивать по возможности регулируемую гибкую схему кодирования, в зависимости от степени зашумленности канала передачи и условий приема потока мультимедиа данных;
- декодирование кода должно осуществляться с использованием недорогих вычислительных ресурсов, поскольку это определяет стоимость приемных устройств, приобретаемых пользователями.;
- обеспечивать как можно меньшую конечную задержку данных (*end-to-end delay*) в цепи «передатчик – приемник» ТВ сигнала.

В этой связи разработка кодов, корректирующих потери пакетов и отвечающих вышеперечисленным требованиям, является актуальной задачей.

Актуальным является также исследование существующих подходов к реализации систем *IPTV*, и разработка способов внедрения помехоустойчивых кодов в рамках современных международных стандартов в области цифрового телевидения.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов и программных средств, позволяющих уменьшить количество потерь пакетов цифровых мультимедиа данных при потоковом телевидении по компьютерным сетям.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка корректирующего помехоустойчивого кода, позволяющего добиться поставленной цели при соблюдении требований, налагаемых системами ЦТВ;
- разработка алгоритма декодирования помехоустойчивого кода, с использованием минимального объема физической памяти и вычислительных ресурсов процессора;
- проектирование технологии применения помехоустойчивого кода в системах *IPTV* с учетом специфики потоков цифровых мультимедиа данных для комплексного повышения эффективности работы систем. Технология должна быть разработана в рамках общепринятых подходов реализации систем *IPTV*, и должна обеспечивать совместимость с существующими программными и аппаратными компонентами современных систем *IPTV*.

Объект исследования: системы потокового цифрового телевидения по компьютерным сетям (*IPTV*).

Предмет исследования: коды, корректирующие ошибки, а также алгоритмы декодирования, применительно к системам *IPTV*. Кроме того, предметом исследования являются принципы и стандарты компрессии, форматы транспортировки цифровых мультимедиа данных, архитектуры современных систем *IPTV*.

Методы исследования. В диссертации представлены результаты исследований, полученные с помощью имитационного и математического моделирования, методов теории вероятности. В ходе работы использовались положения теории информации, помехоустойчивого кодирования, учитывались принципы компрессии и стандарты транспортировки цифровых мультимедиа данных. Моделирование осуществлялось средствами объектно-ориентированного языка программирования C++. В процессе программной реализации теоретических результатов использовались методы теории алгоритмов, теории структур данных, объектно-ориентированного и процедурного программирования.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается:

- корректным применением методов теории помехоустойчивого кодирования;
- результатами компьютерного (имитационного) моделирования;
- непротиворечивостью результатов с предполагаемыми теоретическими оценками.

Научная новизна:

1. Выдвинута и экспериментально подтверждена гипотеза о возможности повышения эффективности восстановления пакетов от потерь стирающими кодами путем выбора надлежащих степеней кодовых пакетов в зависимости от уровня потерь пакетов в сети и допустимого избытка кодовых пакетов. Для интервалов значений степеней кодовых пакетов и допустимого избытка кодовых пакетов построена таблица аппроксимирующих полиномов функции эффективности восстановления пакетов.

2. Разработан стирающий помехоустойчивый код с детерминированной алгоритмической структурой («неслучайный стирающий код», НССК) для применения в системах *IPTV*, отличающийся от известных стирающих кодов тем, что позволяет учитывать при кодировании приоритет исходных информационных пакетов, обеспечивая более надежную доставку приоритетных пакетов. По сравнению с аналогами, НССК эффективнее восстанавливает данные при кодировании коротких информационных последовательностей, а также обеспечивает высокую эффективность восстановления пакетов от потерь при меньшем кодовом соотношении. Это позволяет снизить задержку данных в цепи «передатчик - приемник» и более экономно использовать канал передачи.

3. Предложена новая технология применения НССК в системах *IPTV* с целью повышения надежности передачи данных, не имеющая известных аналогов. Отличительной чертой данной технологии является использование НССК на уровне транспортного потока *MPEG-2*, что обуславливает возможность применения НССК для уменьшения потерь пакетов в системах *IPTV* без модификации сетевого оборудования и стека протоколов *IP*, а также совместимость с программно-аппаратными компонентами систем *IPTV*.

Практическая ценность:

1. Программно реализованы алгоритмы кодирования и декодирования кодов ЛТ и НССК, позволяющих восстанавливать пакеты в случае потерь при передаче.

2. Реализована программа *Erasur Simulator* для имитационного моделирования и исследования характеристик стирающих кодов. Программа позволяет оценивать влияние кодовых параметров на эффективность восстановления пакетов стирающими кодами, моделировать каналы с различными условиями передачи, подбирать оптимальные сочетания кодовых параметров для заданных условий передачи и ограничений на длину исходной информационной последовательности.

3. Спроектирована архитектура системы цифрового телевидения по сетям *IP*, с использованием НССК на уровне транспортного потока *MPEG-2*. Проектирование выполнено с учетом общепринятых современных

подходов к реализации систем *IPTV*. Преимуществами предлагаемой архитектуры являются совместимость с существующими программно-аппаратными компонентами систем *IPTV* (компрессорами, мультиплексорами), а также протоколами стека *IP*.

4. Реализован программный мультиплексор транспортного потока *MPEG-2* в виде *DirectShow* фильтра для объединения и синхронизации цифровых видео и аудио потоков в соответствии со стандартом *ISO 13818-1*. Мультиплексор осуществляет анализ структуры мультимедиа потоков и ранжирование транспортных пакетов, для дальнейшей передачи этой информации кодеру *HССК*. Мультиплексор пригоден для использования в профессиональных системах цифрового телевидения (*IPTV*, *DVB*) в режиме реального времени.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный способ определения степеней кодовых символов в зависимости от уровня потерь пакетов в сети *IP* и допустимого избытка кодовых пакетов повышает эффективность восстановления от потерь. Для определения степеней кодовых пакетов используется полученная экспериментально таблица аппроксимирующих полиномов функции эффективности восстановления.

2. Стирающий помехоустойчивый код *HССК* с детерминированной алгоритмической структурой обеспечивает эффективное восстановление пакетов в случае потерь при передаче, в том числе на коротких информационных последовательностях. Код *HССК* обладает более высокой эффективностью восстановления пакетов в случае потерь по сравнению с известными аналогами. *HССК* является корректирующим помехоустойчивым кодом и позволяет восстанавливать потерянные при передаче пакеты на приемнике без использования канала обратной связи.

3. Разработанная технология применения стирающих кодов в системах *IPTV* уменьшает количество потерь пакетов мультимедиа данных. В случае, если исправление всех потерь невозможно, данная технология позволяет уменьшить влияние потерь на аудиовизуальное качество восприятия телепрограмм за счет ранжирования пакетов потока цифровых мультимедиа данных по приоритетам.

Внедрение результатов. Программный мультиплексор транспортного потока *MPEG-2*, разработанный и реализованный в рамках данной диссертационной работы, внедрен и используется в качестве коммерческого продукта «MainConcept MPEG Multiplexer» компанией MainConcept GmbH, что подтверждается актом о внедрении.

С докладом по теме исследования автор занял 1-е место в конкурсе «За научные результаты, обладающие существенной новизной и среднесрочной (до 5-7 лет) перспективой их эффективной коммерциализации» в рамках Программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К.).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2005», – Томск, 2005.
- XLIII Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», Новосибирский государственный университет (НГУ), 2005.
- Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2007», – Томск, 2007.
- Четвертая Международная научно-практическая конференция «Электронные системы и средства управления», – Томск, 2007.
- IEEE Workshop «Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems» (DDECS'08), Bratislava, 2008. (Международный симпозиум IEEE «Разработка и диагностика электронных схем и систем», – Братислава, 2008.)
- 15-я Всероссийская межвузовская конференция «Микроэлектроника и информатика-2008», – Московский институт электронной техники (МИЭТ), Москва. Доклад отмечен дипломом 1-й степени.
- Научно-практическая конференция «Электронные системы и средства управления», – Томск, ТУСУР, 2008. Доклад занял 1-е место в рамках Программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К.).

Публикации. По теме исследования автором опубликованы 12 работ, в том числе 3 статьи в научных периодических журналах, из них 1 в журнале перечня ВАК [6], 2 работы опубликована в зарубежных изданиях, в том числе одна в сборнике докладов международного симпозиума *IEEE* [9], 6 докладов опубликованы в материалах научных конференций и семинаров. Программа ErasureSimulator зарегистрирована в Отраслевом фонде алгоритмов и программ (ОФАП).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал изложен на 142 страницах, содержит 13 таблиц, 31 рисунок и 2 приложения. Список цитируемой литературы содержит 93 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе кратко представлено развитие компьютерных сетей, сетевых приложений и проведен аналитический обзор систем ЦТВ и IPTV, а также известных помехоустойчивых кодов, применяемых в ЦТВ и IPTV.

В данной главе изложены принципы компрессии цифровых видео и аудио данных, исследуется структура элементарных цифровых мультимедиа потоков, структура транспортного потока MPEG-2 ISO.

Основными стандартами компрессии мультимедиа данных, используемыми в современных системах потокового телевидения, являются стандарты сжатия видео H.264 и MPEG-2, стандарты аудио компрессии AAC, MPEG Audio.

Рассмотрены современные системы наземного и спутникового ЦТВ, исследованы помехоустойчивые коды, применяемые в этих системах: коды Рида-Соломона, сверточные коды, Турбо-коды. Сделан вывод о непригодности применения классических блочных и сверточных кодов для решения проблемы потерь пакетов целиком, имеющей место быть в системах IPTV.

В диссертации рассматриваются современные подходы к реализации систем IPTV, сделан обзор протоколов стека IP, представляющих интерес в контексте данной работы

Вторая глава посвящена теории стирающих кодов. Дано определение стирания, рассматриваются концептуальные модели каналов со стираниями. Излагаются основополагающие принципы построения кодов Лаби Трансформ (ЛТ), как наиболее идейно целостных стирающих кодов. Коды были названы в честь ученого М.Лаби, изобретшего данные коды.

Коды ЛТ строятся следующим образом. Допустим, исходное сообщение состоит из K символов. В качестве символа может выступать сетевой пакет данных, либо транспортный пакет MPEG-2 ISO, – требуется лишь, чтобы все пакеты имели равную длину. Кодовые символы в стирающих кодах генерируются как результат операции «исключающее или» (XOR) над d исходными символами. Величину d называют степенью кодового символа. Данная величина может принимать значения от 1 до некоторого максимального значения G . Исходные символы, использованные для генерации некоторого кодового символа i , будем называть «соседями» (neighbors).

Введем также понятие плотности распределения степени кодовых символов $p(d)$: $p(d)$ есть вероятность того, что кодовый символ будет иметь степень d .

Процесс генерации кодовых символов для кода ЛТ состоит в следующем:

- случайным образом выбрать степень d кодового символа, используя плотность распределения $p(d)$;
- выбрать случайным образом d различных исходных символов в качестве соседей кодового символа;
- значение кодового символа задать равным результату операции XOR над d выбранными соседями.

Описание алгоритма декодирования кода ЛТ приведено в диссертации.

Важнейшей задачей в проектировании стирающих кодов является разработка распределения степеней кодовых символов. Для кодов ЛТ зарубежными учеными было предложено робастное распределение для степени кодовых символов (Robust Soliton Distribution). Исходя из соображений удобства практической реализации кодов, для задания закона распределения степени кодовых символов используется функция плотности распределения.

Плотность робастного распределения $\mu(d)$ задается формулой:

$$\mu(d) = \frac{p(d) + \tau(d)}{\sum_d p(d) + \tau(d)}, \quad (1)$$

где

$$p(d) = \begin{cases} 1/K, d=1 \\ \frac{1}{d(d-1)}, d=2, \dots, K \end{cases} \quad \tau(d) = \begin{cases} \frac{S}{K} \frac{1}{d}, d=1, 2, \dots, (K/S)-1 \\ \frac{S}{K} \log(S/\delta), d=K/S \\ 0, d > K/S \end{cases}$$

В последней формуле S определяется выражением

$$S(K, \delta) = c \ln(K/\delta) \sqrt{K}$$

Параметрами функции плотности робастного распределения являются: K – количество исходных символов; c – параметр распределения; рекомендуется задавать $0 < c < 1$; δ – параметр, определяющий вероятность успешного декодирования; процесс декодирования будет успешно завершен с вероятностью $1 - \delta$.

С целью изучения возможностей восстановления пакетов кодом ЛТ были программно реализованы кодер – декодер ЛТ и проведено имитационное моделирование работы кодов на наборе значений кодовых параметров c , δ , K , а также при различных значениях интенсивности потерь пакетов. Результаты моделирования приведены в третьей главе.

Были также исследованы систематические стирающие коды. В результате исследования на основе экспериментально полученных данных построена таблица аппроксимирующих полиномов функции эффективности восстановления пакетов стирающими кодами.

На основе анализа вероятности восстановления исходных символов при кодировании кодом ЛТ в диссертации сформулированы следующие проблемы применения кодов ЛТ в системах IPTV:

- неприемлемо длительная задержка ТВ сигнала между приемником и передатчиком, вызванная необходимостью буферизации большого числа исходных пакетов, поскольку эффективность ЛТ начинает проявляться только для большого числа исходных символов, порядка 5000 – 10000. Это свойство ЛТ кодов подтверждается экспериментально;
- стирающее кодирование без учета «важности» исходных пакетов не является наилучшим решением для систем *IPTV*, так как пакеты, содержащие данные видео кадров различных типов (*I*, *P*, *B* кадров), аудио данные, вносят различный вклад в формирование общего качества восприятия телепрограмм. Наибольшую проблему представляют потери звука. Существенную деградацию качества видео влечет потеря данных опорных *I*-кадров. Поэтому для систем *IPTV* необходим помехоустойчивый код, позволяющий кодировать приоритетные пакеты с более высокой степенью защищенности;

В третьей главе предлагаются неслучайные стирающие коды, разработанные автором с учетом требований, налагаемых системами цифрового телевидения в компьютерных сетях.

Мотивацией к созданию НССК стало то, что при низких значениях K не работают статистические свойства, составляющие основу теории ЛТ кода. Поэтому необходимо контролировать количество вхождений исходных пакетов в кодовые пакеты, обеспечивая большую надежность доставки приоритетных пакетов и повышая эффективность кода.

Количество кодовых пакетов для НССК потенциально может быть неограниченным, но для моделирования использовалось ограничение конкретной величиной N . Величина N определяется исходя из максимально дозволённого переизбытка кодовых пакетов относительно числа K исходных символов как $N = K \cdot \beta$, где β немногим более 1 (задается программно либо по усмотрению пользователя, исходя из ограничений, накладываемых приложением).

Для определения количества пакетов с той или иной степенью код НССК использует робастное распределение $\mu(d)$ (1). Однако, распределение модифицировано путем введения дополнительных проверочных пакетов для опорных пакетов. Обозначим модифицированное распределение $\mu'(d)$. Для определения степеней дополнительных проверочных используется результат, полученный для систематических стирающих кодов. Дополнительные пакеты генерируются отдельно для наиболее приоритетных данных, закодированных как кодовые пакеты со степенью 1, и для пакетов с более низким приоритетом, взятых в качестве соседей для кодирования со степенью 2, 3 и так далее. Для определения степени проверочных пакетов используется значение D , при котором аппроксимирующий полином $F(D)$ функции эффективности восстановления от степени кодового пакета имеет максимум, т.е. находится значение D , при котором производная аппроксимирующего полинома обращается в 0. Полученное таким образом значение D масштабируется на число кодовых пакетов со степенью $n[d_i]$, для которых генерируются проверочные пакеты. Обозначим данное значение D как D'_i . Количество пакетов с данной степенью определяется через допустимое количество избыточных пакетов $V = N - K$ как $Z_i = \frac{V \cdot n[d_i]}{K}$.

Очередь исходных символов обозначим кратко *ОИС*. Очередь кодовых символов назовем *ОКС*. Будем использовать индексы для обращения к символам в *ОКС* и *ОИС*. Количество вхождений f -го исходного символа в кодовые символы в качестве «соседа» назовем *мерой защищенности* исходного пакета. Обозначим меру защищенности переменной $R[f]$, $f = 0, \dots, K-1$.

Ниже приведен алгоритм кодирования НССК.

Шаг 1. Определить количество кодовых символов, предназначенных для кодирования со степенями $d_0, \dots, d_{max}$ согласно $n(d_i) = \mu'(d_i) \cdot N$, где N – целое количество кодовых символов.

Шаг 2. Выбрать $n[d_0]$ исходных пакетов с наивысшим приоритетом. Закодировать их как опорные символы со степенью 1. Можно записать это действие на языке псевдо-Си как

```
for(i = 0; i < n[d0]; i++)
{
    OKC[i] = ОИС[f_i];
}
```

где f_i обозначает индекс исходного символа из *ОИС*.

Шаг 3. Произвести кодирование всех символов, закодированных на шаге 1, согласно следующей процедуре:

```
for(i = 0; i < Z0; i++) {
    r = rand(R_min); R[r]++; OKC[i + n[d0]] = ОИС[r];
    for(h = 0; h < D'_0; h++) {
        r = rand(R_min); R[r]++;
        OKC[i + n[d0]] = OKC[i + n[d0]] XOR ОИС[r];
    }
}
```

Шаг 4. Обозначим через W_R подмножество всех исходных символов, обладающих на некотором шаге кодирования мерой защищенности R . Среди них подмножество символов с максимальной мерой защищенности обозначим как W_{MAX} , с минимальной – W_{MIN} .

Задать $i = 2$.

Шаг 4.1 Выполнять действия 4.1.1 и 4.1.2 $n[d_i]$ раз:

Шаг 4.1.1. Сгенерировать очередной k -й кодовый символ как результат операции XOR над одним символом из W_{MAX} , одним из

$W_{MAX-1}, \dots$, одним из W_{L-1} , и одним символом из W_{MIN} где $L=MAX - d_i$.

$OKC[k] = W_{MAX}[j_0] XOR W_{MAX-1}[j_1] XOR \dots XOR W_{L-1}[j_{L-1}] XOR W_{MIN}[j_L]$;

Шаг 4.1.2. Увеличить на единицу значения $R[j_t]$ для всех $j_t, t=0 \dots L$ (здесь индексы j_t являются индексами исходных пакетов в ОИС).

Шаг 4.2. Обновить подмножества W_R , а также максимальное и минимальное значения R . Увеличить i на единицу.

Если i стало равным $d_{max}+1$, либо общее число кодовых символов достигло желаемого количества N , выход.

Если не все исходные пакеты хотя бы один раз вовлечены в процесс кодирования, перейти на Шаг 4.1.

Иначе перейти на Шаг 5.

Шаг 5.

$m=1$;

$while(k < N) \{$

$for(v=0; v < Z_m; v++) \{$

$r = rand(n[d_m]); R[r]++; OKC[k] = ОИС[r];$

$for(h=0; h < D'_m; h++) \{$

$r = rand(n[d_m]); R[r]++;$

$OKC[k] = OKC[k] XOR ОИС[r];$

$\}$

$\}$

$k++;$

Если все пакеты из $n[d_m]$ вовлечены в кодирование на данном шаге, $m++;$

$\}$

Выход.

Отметим, что чем выше приоритет исходного пакета, выбираемого из W_{MIN} , тем ниже должна быть степень кодового пакета, при которой он будет впервые вовлечен в кодирование.

В ходе имитационного моделирования были экспериментально получены результаты оценки эффективности восстановления пакетов с помощью ЛТ и НССК для различных уровней интенсивности потерь пакетов в сети. В модели осуществлялась имитация стираний пакетов при передаче. Количество пакетов, подлежащих стиранию, определялось параметром модели PLR (*Packet Loss Ratio*, отношение потерь пакетов). Индексы пакетов, подлежащих стиранию, определялись случайным образом, согласно равномерному распределению. Параметры кодов ЛТ и НССК c, δ, K, N , а также параметр модели системы передачи данных PLR , варьировались в заданных пределах.

В качестве критерия оценки эффективности ЛТ и НССК в данном эксперименте используется процент успешно восстановленных декодером исходных пакетов. Достоверность эксперимента обеспечивается тем, что для каждого набора значений пяти вышеперечисленных параметров производились по 1000 запускам моделирования для кодов ЛТ и НССК, и проводилось усреднение полученных для каждого запуска значений процента восстановленных пакетов.

Эксперимент подтвердил, что коды ЛТ могут быть использованы в компьютерных сетях для исправления потерь пакетов, но характеристики ЛТ кодов не удовлетворяют требованиям, предъявляемым системами *IPTV* к помехоустойчивым кодам.

Коды ЛТ обеспечивают уверенное восстановление пакетов лишь при значениях K порядка 5000 – 10000, в то время как коды НССК эффективны, в том числе, при малых K порядка 100 – 1000, что очень важно с точки зрения возможностей применения стирающих кодов в системах *IPTV*. За счет детерминированной алгоритмической структуры коды НССК более надежны, нежели коды ЛТ, так как для ЛТ при превышении некоторого критического уровня PLR происходит резкое падение количества восстановленных пакетов (см. рис. 1). С помощью кодов ЛТ может быть достигнута столь же высокая эффективность восстановления данных от потерь, как с помощью НССК, но за счет большего избытка кодовых пакетов, что увеличит нагрузку на сеть передачи данных.

На рис. 1, 2 проиллюстрированы полученные экспериментально результаты работы кодов ЛТ и НССК соответственно. Столбцы гистограмм показывают процент восстановленных исходных пакетов. Значения параметров плотности робастного распределения вероятности одинаковы и равны $c=0.05, \delta=0.05$ для обоих кодов. Число исходных пакетов $K=100 \dots 10000$, процент потерь пакетов $PLR=0 \dots 15$. Избыток кодовых пакетов для иллюстрируемого примера равен 10% от числа исходных пакетов K .

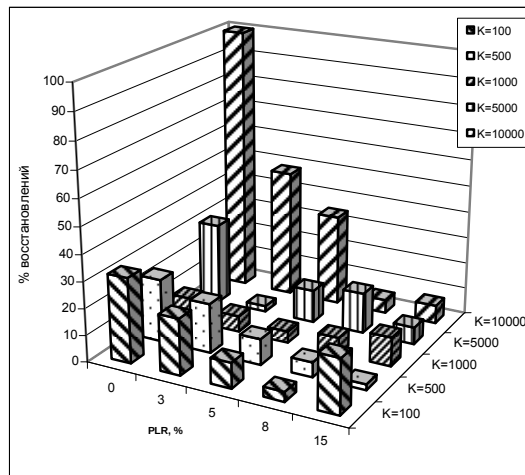


Рис. 1. Процент успешно восстановленных пакетов для кода ЛТ

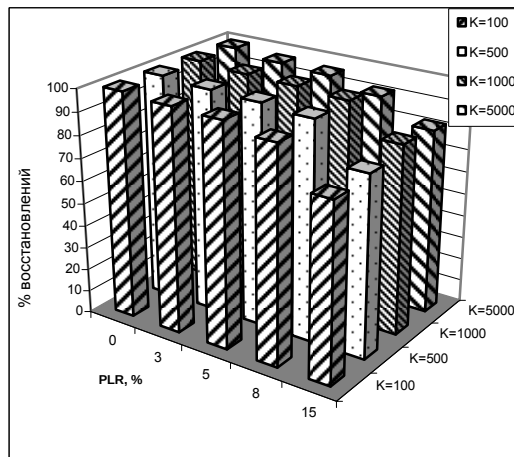


Рис. 2. Процент успешно восстановленных пакетов для кода НССК

В данной главе рассмотрены также вопросы практической реализации систем *IPTV* с использованием НССК. В качестве уровня интеграции с НССК был выбран транспортный поток *MPEG-2* (*MPEG-2 Transport Stream, MPEG-2 TS*), в связи с тем, что фактически *MPEG-2 TS* является наиболее распространенным форматом, используемым в профессиональных системах *IPTV* во всем мире. Предлагаемая архитектура системы *IPTV* с использованием НССК приведена на рис. 3.

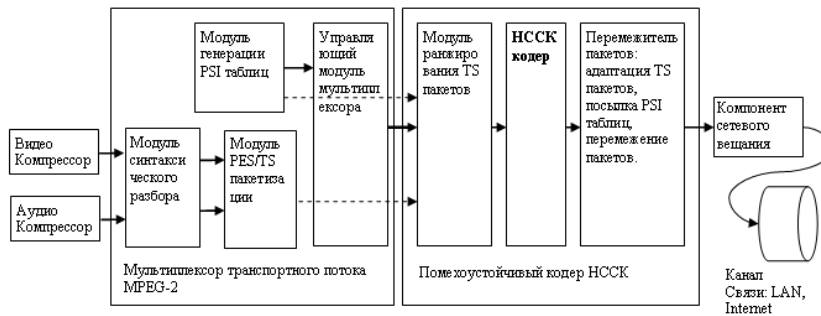


Рис. 3. Архитектура системы *IPTV* с применением НССК

В предлагаемой архитектуре важнейшую роль, помимо кодера НССК, играет мультиплексор, осуществляющий синтаксический разбор входящих аудио и видео потоков, собственно генерацию *MPEG-2 TS*, а также обеспечение дополнительной служебной информации о содержимом каждого пакета в *MPEG-2 TS* для кодера НССК, что является отличительной особенностью данной архитектуры.

Транспортные пакеты содержат данные различных типов: служебные таблицы для демультиплексирования потока, аудиоданные, видео кадры различных типов (*I*, *P*, *B* кадры). Помимо собственно кодера НССК, важной отличительной чертой предлагаемой архитектуры является наличие модуля ранжирования транспортных пакетов (рис. 3). Модуль ранжирования назначает приоритет *TS* пакетам на основе вспомогательной информации о типе содержимого пакетов, обеспечиваемой модулем синтаксического разбора. Наивысший приоритет имеют пакеты с аудио данными и опорными (*I*-кадрами) видео. Более низкий приоритет имеют *P*-кадры видео. Низший приоритет назначается *B*-кадрам видео. Служебные таблицы используются для передачи декодерам параметров кодера. При кодировании НССК в качестве кодовых пакетов со степенью 1 выбираются *TS* пакеты с наивысшим приоритетом, для кодовых

пакетов со степенью 2 – с приоритетом 2, и т. д., до тех пор, пока все исходные пакеты не будут вовлечены в процесс кодирования, согласно алгоритму кодирования НССК. За счет этого ранжирование пакетов призвано повысить эффективность помехоустойчивого кодирования для уменьшения влияния потерь пакетов на качество телепрограмм в *IPTV*.

Перемежитель (рис. 3) отвечает за индексацию кодовых пакетов для восстановления приемником порядка их следования, а также за перемежение кодовых пакетов с различными степенями во избежание потерь пачек кодовых пакетов со степенью 1.

На приемной стороне производятся обратные действия: деперемежение, восстановление синтаксиса поля адаптации транспортных пакетов, декодирование НССК, демultipлексирование транспортного потока, декомпрессия видео- и аудиоданных, и, наконец, воспроизведение мультимедиа.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Разработан новый стирающий помехоустойчивый код – НССК, способный исправлять потери пакетов целиком. НССК позволяет учитывать при кодировании приоритет исходных информационных пакетов, обеспечивая надежную доставку приоритетных пакетов. По сравнению с аналогами, НССК эффективнее восстанавливает пакеты от потерь при меньшей избыточности, а также способен эффективно работать при меньшем количестве исходных пакетов в кодируемой последовательности, что подтверждено полученными экспериментальными результатами.

2. Программно реализованы алгоритмы кодирования и декодирования кодов ЛТ и НССК, позволяющие восстанавливать пакеты в случае потерь при передаче.

3. Реализована программа *Erasur Simulator* для имитационного моделирования и исследования характеристик стирающих кодов. Программа позволяет оценивать влияние кодовых параметров на эффективность восстановления пакетов стирающими кодами ЛТ и НССК, моделировать каналы с различными условиями передачи, подбирать оптимальные сочетания кодовых параметров для заданных условий передачи и ограничений на длину исходной информационной последовательности.

4. Спроектирована технология применения НССК в системах *IPTV* на уровне транспортного потока *MPEG-2*, не имеющая аналогов. Предлагаемая технология обладает возможностью реализации помехоустойчивого стирающего кодирования в рамках стека протоколов *IP*. Применение НССК на уровне *MPEG-2 TS* обеспечивает также совместимость с существующими программно-аппаратными компонентами современных систем *IPTV*. В рамках данной технологии разработан оригинальный способ ранжирования транспортных пакетов по приоритетам с последующим кодированием НССК для комплексного повышения надежности воспроизведения телепрограмм в системах *IPTV*.

5. Реализован программный мультиплексор транспортного потока *MPEG-2* в виде *DirectShow* фильтра для объединения и синхронизации цифровых видео и аудио потоков в соответствии со стандартом *ISO 13818-1*. Мультиплексор осуществляет синтаксический анализ структуры мультимедиа потоков, для дальнейшей передачи этой информации кодеру НССК. Мультиплексор пригоден для использования в профессиональных системах цифрового телевидения (*IPTV, DVB*) в режиме реального времени.

В приложениях приведены список используемых сокращений и акт о внедрении.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Шинкаренко К.В. Статистическое мультиплексирование *MPEG-2* видеопотоков с переменным битрейтом для эффективного использования канала передачи данных // Информационные системы. – Томск, 2004. – С. 123 – 129.
2. Шинкаренко К.В. Однопроходный режим компрессии видеоданных // Доклады ТУСУРа. – Томск, 2005. – Т. 11. – № 3. – С. 110 – 114.
3. Шинкаренко К.В. Статистическое мультиплексирование видеопотоков с переменной скоростью передачи данных для эффективного использования канала связи // Материалы XLIII науч. студенч. конф. «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. – Новосибирск, 2005. – С. 52.
4. Шинкаренко К. Алгоритм мультиплексирования транспортного потока *MPEG-2* // Сб. науч. докл. конференции «Сибресурс-12-2006»). – Тюмень, 2006. – С. 90 – 94.
5. Шинкаренко К. Коррекция ошибок в системах цифрового мультимедиа вещания // Материалы докладов Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2007». – Томск, 2007. – С. 189 – 192.
6. Корилов А.М., Шинкаренко К. Критерии оптимизации помехоустойчивых кодов для цифрового телевидения // Вычислительные технологии. – Томск, 2007. – Т. 12. – Спец. вып. 1. – С. 86–95.
7. Шинкаренко К., Корилов А.М. Оптимизация помехоустойчивого кодирования для цифрового телевидения // Сб. науч. докл. Международной науч.-практ. конф. «Электронные системы и средства управления». – Томск, 2007. – С. 91 – 94.
8. Shinkarenko K., Vlcek K. Architecture of Channel Coding Effectiveness Estimation System (Архитектура системы оценки эффективности помехоустойчивого кодирования) // In Proc. of 6th Electronic Circuits and Systems Conference. – Bratislava, 2007. – P. 165 – 169.
9. Shinkarenko K., Vlcek K. Design of Erasure Codes for Digital Multimedia Transmitting (Разработка стирающих кодов для передачи цифрового мультимедиа) // In Proc. of 11th IEEE Workshop on Design and Diagnostic of Electronic Circuits and Systems (DDECS08). – Bratislava, 2008. – P. 30 – 34.

Доступен также: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: –
<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/stamp/stamp.jsp?arnumber=4538751&isnumber=4538735>. –
11.11.2008.

10. Шинкаренко К. Применение стирающих кодов в системах цифрового телевидения // Сб. науч. докл. 15-й Всероссийской науч.-техн. конф. «Микроэлектроника и информатика-2008». – Москва, 2008. – С. 248.

11. Шинкаренко К. Стирающие помехоустойчивые коды для коррекции ошибок в системах цифрового телевидения // Сб. науч. докл. науч.-практ. конф. «Электронные системы и средства управления-2008», – Томск, 2008. – С.181 – 188.

12. Шинкаренко К.В. Программа моделирования помехоустойчивого кодирования стирающими кодами ErasureSimulator // Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 11720. Номер государственной регистрации: 50200802200. – 2008.