

Вариант ARQ/FEC системы для противодействия блокировкам пакетов в очередях на приемной стороне¹

Е.О. Карпухин

Аннотация. Рассмотрена проблема блокировки «головы» очереди, увеличивающая время сборки данных получателем. Проведен анализ существующих гибридных ARQ/FEC систем, которые позволяют повысить скорость передачи данных и уменьшить эффект от блокировок «головы» очереди. Предложен вариант системы ARQ/FEC на основе протокола UDP. Особенность данного варианта заключается в интеграции кодов Рида-Соломона и расширенных кодов с проверкой на четность с алгоритмами управления перегрузкой как на отправителе, так и на получателе. Структура предложенного варианта ARQ/FEC системы состоит из адаптивного модуля FEC, а также модуля обратной связи и регулирования скользящего окна как на отправителе, так и на получателе, что позволит эффективно бороться с проблемой блокировки «головы» очереди.

Ключевые слова: блокировка головы очереди, ARQ/FEC, транспортное кодирование, информационное взаимодействие, управление перегрузкой.

Введение

Одной из наиболее существенных проблем информационного взаимодействия абонентов в реальном времени является блокировка «головы» очереди [1]. При последовательной передаче данных при потере пакета в соединении остальные остаются заблокированными до момента его повторной передачи. Появляются задержки, увеличивается объем буфера под временное хранение полученных пакетов, что существенно снижает безопасность системы из-за увеличения вероятности успешной реализации атак класса «Отказ в обслуживании». Схематично причина возникновения проблемы и процесс блокировки изображены на Рис. 1.

Данная проблема актуальна в сервисах, требующих высокой степени интерактивности: сервисах удаленного управления оборудованием и удаленных рабочих столов, а также мультимедийных приложений при высокой частоте возникновения блокировок.

Для борьбы с указанной проблемой используются механизмы прямого кодирования FEC (forward error correction), однако накладные расходы на кодирование при незначительных задержках в сети не позволяют их широко применять. В результате возникли гибридные системы ARQ/FEC, которые обладают преимуществами как механизмов ARQ (automatic repeat request), так и FEC, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться наиболее перспективные варианты из них на разных уровнях модели OSI (open systems interconnection).

Перспективные варианты гибридных ARQ/FEC систем

Рассмотрим три наиболее распространенных варианта совместного использования механизмов ARQ и FEC. Первый вариант заключается в адаптивном применении корректирующих кодов и управлении механизмом ARQ для надежной высокоскоростной передачи мультимедий-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00186 А и выполнения фундаментальных научных исследований по теме № 0071-2015-0005

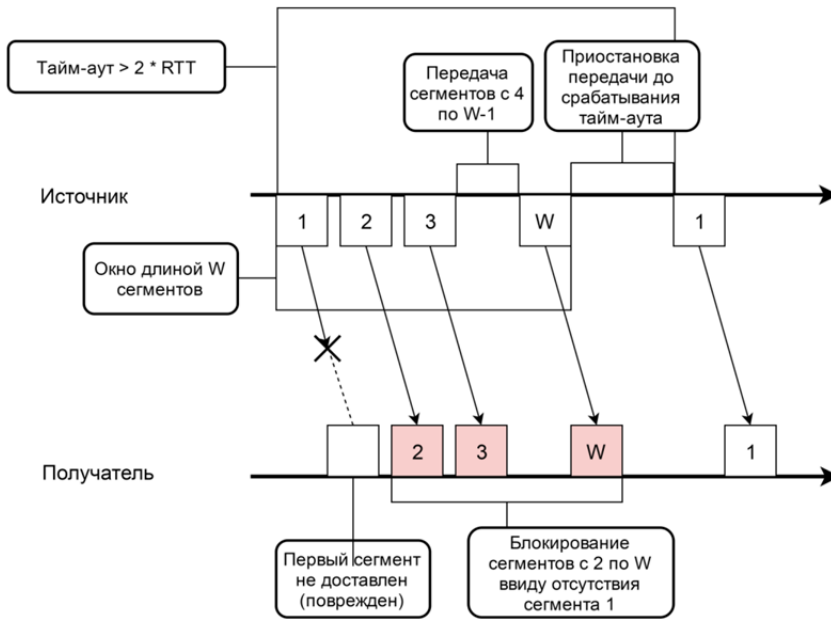


Рис. 1. Процесс блокировки «головы» очереди на примере протокола TCP

ных данных на основе протокола UDP (user datagram protocol) [2]. В данном решении предлагается метод передачи, основанный на комбинации передачи данных посредством протоколов TCP (transmission control protocol) и UDP. Предлагаемый авторами подход уникален тем, что в нем задействованы одновременно два канала для передачи данных. Один канал используется при незначительных задержках (ARQ), другой канал – для адаптивного режима исправления ошибок (FEC). Отправитель переключается между двумя режимами передачи, основываясь на отклике получателя. Когда статус сети стабилен, используется режим ARQ, в противном случае предпочтителен FEC.

Скорость отправки данных устанавливается между минимально гарантированной пропускной способностью и максимальной. Затем отправитель и получатель открывают два соединения для передачи данных и одно для управления. Отправитель начинает избирательно отправлять данные через два канала передачи данных. В режиме ARQ получатель передает отправителю пакеты отклика: ACK, ERR, SYN и другие (Рис. 2).

Таким образом, принципиальной особенностью данной системы является наличие следующих компонентов:

- модуль мониторинга состояния сети, ограничивающий скорость отправки данных и позволяющий избежать перегрузок;

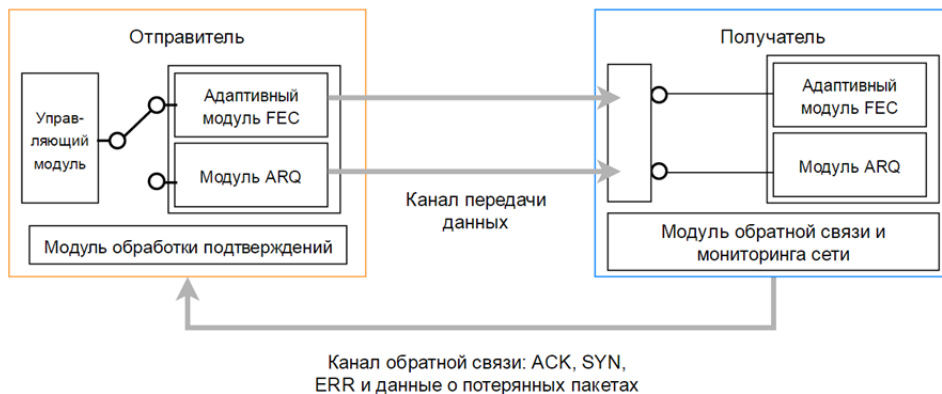


Рис. 2. Система ARQ/FEC с адаптивным применением корректирующих кодов и управлением механизмом ARQ

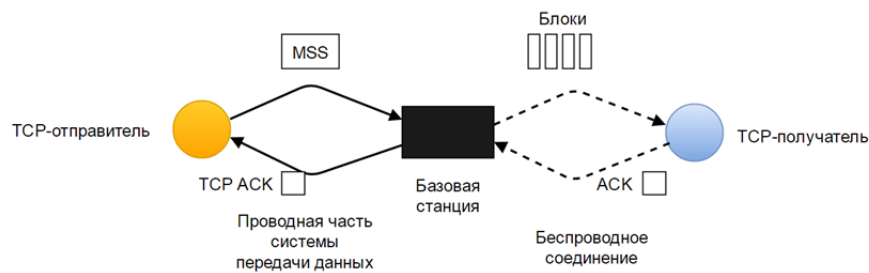


Рис. 3. Схема передачи данных через базовую станцию

- адаптивный модуль FEC, позволяющий не просто исправлять ошибки, избегая повторной передачи сообщения, но и изменять параметры кода в зависимости от состояния сети и вероятности потери пакета;

- модуль, позволяющий переключиться из режима FEC в режим ARQ при низких величинах вероятности потери пакета, что позволяет уменьшить объем передаваемых данных за счет остановки формирования избыточных пакетов и уменьшения времени на обработку сообщений.

Данный вариант ARQ/FEC системы предназначен для борьбы с утраченными пакетами при передаче потока аудио- и видеоданных приложениями с ограниченным размером буфера.

Второй вариант гибридной межуровневой системы ARQ/FEC основан на регулировании мощности передатчика [3]. Предлагаемая модель системы передачи данных, созданная для преодоления проблем, возникающих при передаче данных по TCP в беспроводных сетях, схематично изображена на Рис. 3.

В представленной модели предполагается, что TCP-пакет размером MSS проходит как проводное, так и беспроводное соединение. Система рассматривается с ограничением на размер буфера базовой станции – он должен быть достаточно велик. Такое условие установлено для того, чтобы устранить проблемы с потоками TCP, вызванные размером буфера, меньшим размера окна. Даже в случае переполнения буфера модель успешно справляется с потерями, вызванными перегрузками в сети. Передача всех пакетов подтверждается, а квитанции передаются через базовую станцию.

В беспроводной части системы данные передаются фрагментами длины K каждый. Модуль

FEC преобразует каждый из этих фрагментов в кодовое слово длины N . Коэффициент избыточности x определяется как отношение избыточности $(N - K)$ к длине информационного блока K

Каждый сегмент размера MSS разделяется на $X = MSS/K$ блоков длиной K . TCP-сегмент декодируется правильно в случае, если все X блоков получены неповрежденными и декодированы получателем. На канальном уровне реализована ARQ-SR/FEC схема контроля ошибок. Используются эффективные варианты CRC (cyclic redundancy check) кодов, так что вероятность неудачного детектирования поврежденного блока стремится к нулю. С другой стороны, FEC может исправить только часть битовых ошибок. Также предполагается, что сообщения обратной связи хорошо защищены либо вероятность их потерь пренебрежимо мала, так что для этих сообщений повторная передача не требуется.

Представленная модель основана на следующих принципах:

- использование дополнительного модуля – базовой станции, который будет обрабатывать пакеты, полученные от стандартного TCP соединения, и перенаправлять их для дальнейшей передачи;
- разбиение исходного пакета на X пакетов меньшей длины для их последующего кодирования, передачи и восстановления (при необходимости) на стороне получателя;
- квитирование - отправка положительных квитанций для каждого полученного пакета и отрицательных квитанций в случае невозможности восстановления пакета методами FEC;
- обращение к исходному TCP-соединению в случае невозможности восстановления пакета

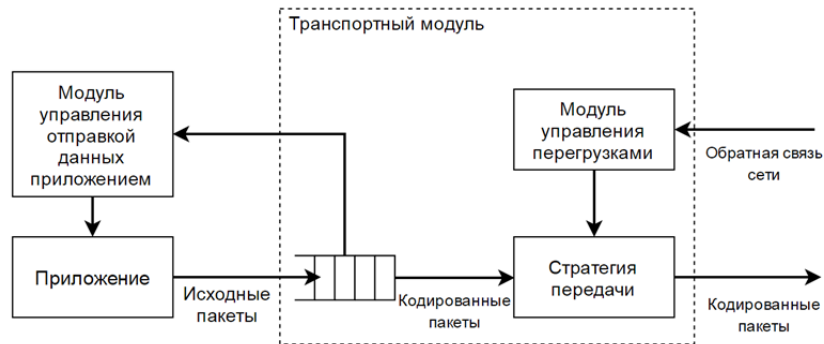


Рис. 4. Структура передающей стороны

путем повторной передачи от базовой станции (после фиксированного количества неудачных попыток);

- увеличение мощности передатчика, позволяющее снизить вероятность битовой ошибки (потери пакета), однако влекущее за собой большие расходы энергии и возможные проблемы электромагнитной совместимости.

Рассмотренная модель гибридной межуровневой системы ARQ/FEC нашла применение в беспроводных системах связи для борьбы с потерями пакетов между базовой станцией и абонентами.

Последним из наиболее перспективных вариантов является уменьшение задержек без потерь при последовательной передаче потока данных [4]. Приложение-отправитель генерирует пакеты и отправляет их приемнику. Эти пакеты обычно приходят группой и содержат данные, которые получатель будет обрабатывать в порядке очереди. Пакеты передаются транспортному модулю (Рис. 4). Транспортный модуль обычно имеет буфер для временного хранения данных. Пакеты покидают буфер только в случае успешного подтверждения их передачи приемником. Если буфер, содержащий отправленные пакеты, полон, отправляющее данные приложение получает от транспортного модуля отклик об этом и уменьшает свою передающую скорость. К примеру, приложение, передающее аудио или видео, может заново сжать данные с более низким битрейтом. Для игровых приложений можно снизить период обновления состояния, таким образом снизив скорость отправки. Единожды попав в

транспортный модуль, пакет должен быть доставлен до приемника без потерь.

В зависимости от состояния сети и информации, полученной при предыдущей передаче пакетов, модуль управления стратегией передачи выбирает один из следующих способов:

- отправление нового пакета без какого-либо кодирования;
- отправление кодированного пакета, полученного от первого из числа некодированных;
- повторное отправление уже отправленного до этого пакета, для которого сработал таймаут или пришла отрицательная квитанция.

Таким образом, представленная система состоит из двух основополагающих модулей:

- модуль управления перегрузками, оценивающий состояние сети и устанавливающий такую скорость отправки данных, которая максимальна при данной пропускной способности канала и не вызывает перегрузок;
- модуль управления стратегией передачи, определяющий, каким образом должен быть отправлен пакет данных в зависимости от условий сети, вероятности ошибки и результатов передачи предыдущих пакетов.

Область применения данного варианта гибридной системы ARQ/FEC – интерактивные приложения, чувствительные к задержкам: Интернет-магазины и ряд других веб-приложений, предполагающих взаимодействие пользователей в реальном времени.

Подводя результаты проведенного анализа следует отметить, что основными средствами борьбы с потерями пакетов и вызываемыми ими перегрузками являются:

1. использование помехоустойчивого кодирования, позволяющего восстанавливать искаженные символы и пакеты на стороне получателя без обратной связи, что существенно сокращает задержку при возникновении блокировок «головы» очереди;

2. уменьшение размера передаваемого сегмента для снижения вероятности битовой ошибки при передаче данных и упрощения процедуры кодирования;

3. постоянный контроль и оценка состояния сети для применения необходимых комбинаций FEC и изменения скорости отправки при передаче данных.

Некоторые решения, такие как увеличение мощности передатчика, влекут за собой большие затраты ресурсов, что делает их куда менее привлекательными для широкого использования.

Проанализировав существующие системы, при создании собственной выберем первый из рассмотренных вариантов в качестве прототипа. Разрабатываемая система будет базироваться на протоколе UDP, а основным решением по восстановлению утерянных пакетов является помехоустойчивое кодирование.

Особенности разработанного варианта ARQ/FEC системы

Разработанный вариант предполагает следующие отличия от прототипа ARQ/FEC системы, выбранного за основу:

1. базовым транспортным протоколом является UDP, т.к. он позволяет с минимальными накладными расходами реализовать как ARQ, так и FEC механизмы передачи данных;

2. в предлагаемом варианте ARQ/FEC системы методы кодирования должны быть основаны на наиболее простых в реализации кодах, так как на прикладном уровне кодеки должны

быть высокопроизводительными из-за ограничений на аппаратную реализацию.

Однако учитывая, что подавляющее большинство приложений работают по протоколу TCP, предлагаемая система должна иметь возможность принимать от этих приложений данные. Структура системы передачи данных представлена на Рис. 5. Данные от приложения, использующего протокол TCP, передаются приложению-посреднику, которое передает их между абонентами по протоколу UDP. На приемной стороне также необходимо приложение-посредник для обработки пакетов и представления их в требуемой получателем форме.

Одним из ключевых элементов системы является модуль FEC, состоящий из двух кодеков. Выбраны два кода [5]: расширенный код с проверкой на четность и код Рида-Соломона. Расширенный код с проверкой на четность не предъявляет особых требований к производительности системы, имеет систематическую форму представления кодового слова и может быть легко адаптирован под изменяющиеся характеристики канала передачи данных. Единственным существенным недостатком кода с проверкой на четность является исправление только единичной ошибки, т.е. восстановление единственного утраченного пакета, при этом в сети очень часто возникает потеря двух пакетов за короткий временной интервал, что существенно ограничивает область применения данного кода в гибридных ARQ/FEC системах.

Особенность работы расширенного кодера с проверкой на четность состоит в получении n пакетов группы и формировании пакета с контрольными битами, в котором каждый i -ый байт будет получен путем сложения i -ых байт всех n пакетов по модулю 256 и последующего вычитания этой суммы из 256. Таким образом, сумма всех i -ых байтов $n+1$ пакета будет всегда равна 256.

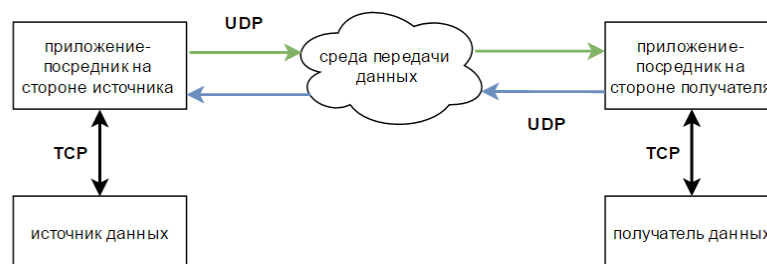


Рис. 5. Структура системы передачи данных между абонентами с использованием приложения-посредника

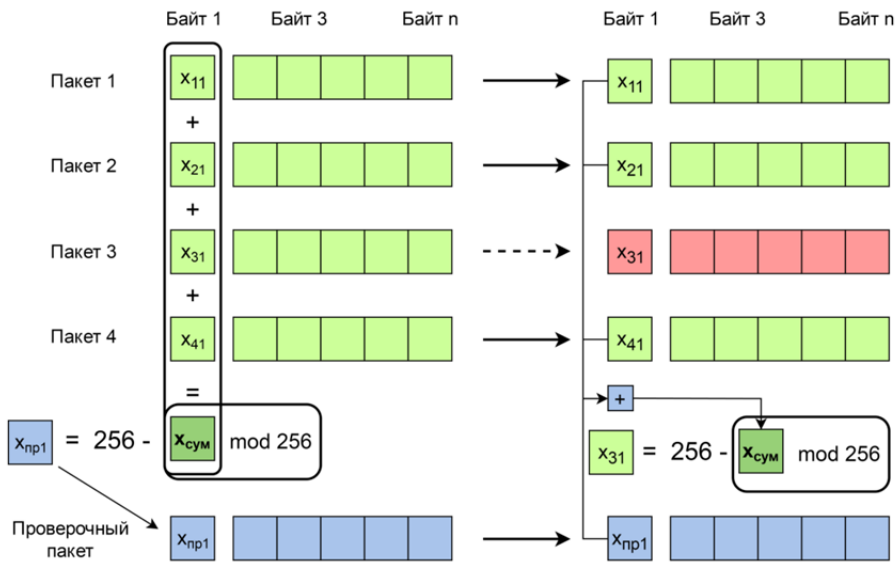


Рис. 6. Методы формирования и декодирования пакетов с данными на основе расширенной проверки на четность

Аналогичным образом происходит и восстановление: контрольный пакет выступает в роли одного из исходных, а получившийся в ходе работы декодера пакет и будет восстановленным фрагментом (Рис. 6).

Код Рида-Соломона позволяет выполнить процедуры кодирования и декодирования с минимальными затратами ресурсов при небольших длинах кодовых слов, а возможность адаптировать структуру кодека под определенный уровень потерь пакетов (в том числе и группы) и представить кодовое слово в систематической форме де-

лает его незаменимым для использования в системах ARQ/FEC. Наиболее интересен код Рида-Соломона с характеристикой $GF(2^8)$. В разработанной системе используется код Рида-Соломона со следующими характеристиками:

- Длина кодового слова 255 байт;
- Количество исправляемых ошибок 8;
- Количество избыточных байт 16;
- Количество информационных байт 239.

Механизм коррекции пакета ошибок приведен на Рис. 7.

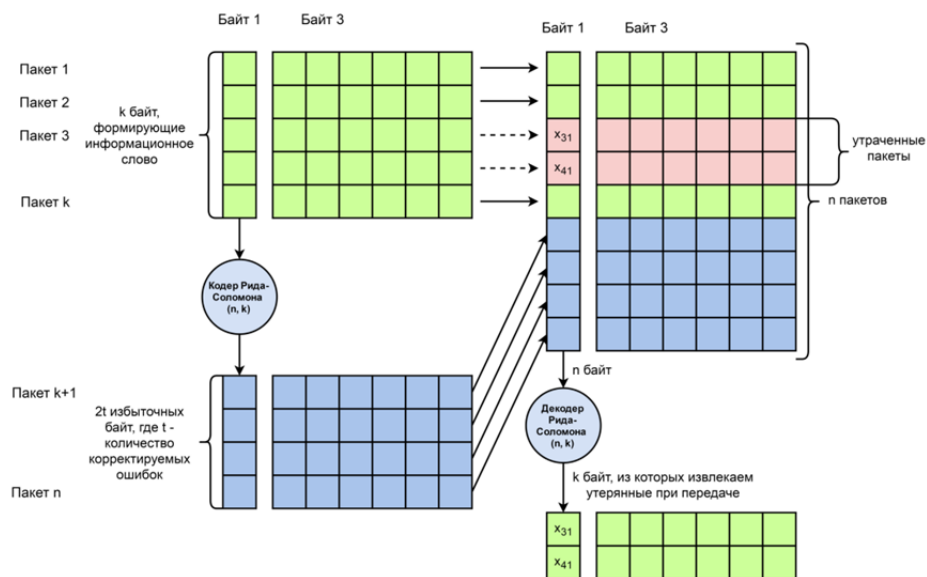


Рис. 7. Пример восстановления двух потерянных пакетов с использованием кода Рида-Соломона

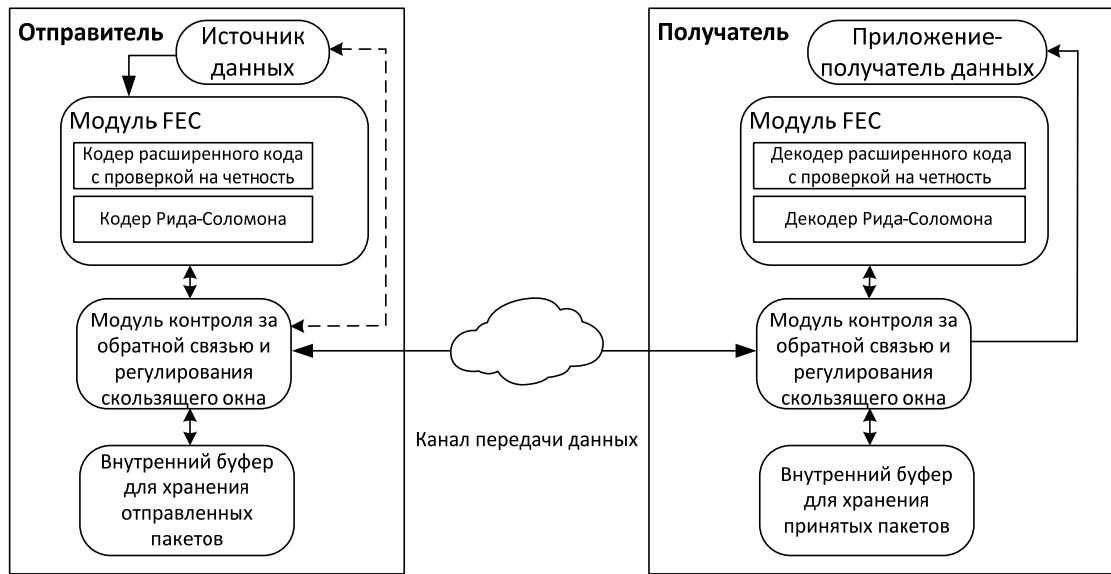


Рис. 8. Структура разработанной ARQ/FEC системы

Применение в разработанной системе механизмов FEC снижает количество перезапросов и сокращает задержки на сборку пакетов и их обработку прикладными службами, т.к. соединение по протоколу TCP работает только внутри конечных хостов. Базовыми алгоритмами управления перегрузкой являются стандартизированные алгоритмы типа «Reno» и «NewReno» [6], которые дополняются оценкой скользящего окна на получателе [7], в чем и заключается существенное преимущество разработанной гибридной системы перед проанализированными ранее тремя вариантами ARQ/FEC.

На Рис. 8 приведена структура разработанной гибридной ARQ/FEC системы, состоящая из модулей адаптивного кодирования, обратной связи с регулированием скользящего окна как на отправителе, так и на получателе. Модуль адаптивного кодирования FEC подстраивает скорость кода под характеристики канала передачи данных в части потерь пакетов и выбирает используемый код. Механизм ARQ используется по умолчанию, но при потерях пакетов больше 0,1% подключается модуль FEC. Размер скользящего окна W зависит от числа закодированных пакетов N следующим образом:

$$W \geq \frac{N - 2}{2} \quad (1)$$

Как видно из формулы (1), длина закодированной серии не должна превышать удвоенного

значения скользящего окна. Однако при регулировании окна на отправителе длина закодированной серии сетевых пакетов будет незначительной, т.к. большинство алгоритмов управления перегрузкой основаны на уменьшении окна при детектировании потери пакета и медленно наращивают нагрузку на сеть после данного события. Именно в этом состоит преимущество управления окном на получателе, т.к. оно позволяет эффективнее бороться с перегрузками, подстраиваясь под характеристики сети [8].

Заключение

В работе были рассмотрены варианты решения проблемы блокировки «головы» очереди, заключающиеся в использовании гибридных ARQ/FEC систем. Проанализированы три наиболее перспективных варианта гибридных систем, один из которых был взят за основу для дальнейшей разработки ARQ/FEC системы, позволяющей уменьшить влияние потерь пакетов в сети на сборку данных протоколами прикладного уровня. Выделены основные особенности проектирования ARQ/FEC систем на транспортном и прикладном уровнях модели OSI, состоящие в применении корректирующих кодов с возможностью модификации скорости кода, уменьшении размера передаваемого сегмента, постоянном контроле и оценке состоя-

ния сети для изменения скорости отправки передаваемых данных.

В разработанной системе нашли применение методы кодирования, основанные на наиболее простых в реализации кодах – код Рида-Соломона и расширенный код с проверкой на четность. Система позволяет передавать данные, сгенерированные приложениями, использующими протокол TCP, инкапсулируя трафик в UDP-пакеты.

Отличительной особенностью разработанной структуры гибридной системы ARQ/FEC является наличие регулировки скользящего окна как на передающей, так и на приемной стороне, что позволяет точнее адаптировать скорость кода к пропускной способности канала и эффективнее управлять перегрузкой. Предложенный вариант ARQ/FEC системы с учетом возможностей широкого внедрения и его использования для улучшения информационного взаимодействия в различных задачах сможет найти применение в распределенных информационных системах. Основной областью, в которой использование разработанного варианта гибридной ARQ/FEC системы позволит существенно улучшить информационное взаимодействие пользователей, является передача управляющей информации в сочетании с мультимедийными данными, как это происходит при удаленной работе пользователей с терминальным сервером.

Карпухин Евгений Олегович. Старший научный сотрудник ЦИТП РАН. Окончил МАИ в 2009 году. Количество печатных работ: 20, в том числе 2 монографии. Кандидат технических наук. Область научных интересов: проектирование защищенных телекоммуникационных систем и сетей. E-mail: ret1987@yandex.ru

Variant ARQ/FEC system to counteract blocking packets in queues on receiver

Е.О. Карпухин

Abstract. Considered the problem of head-of-line blocking will also increase assembly time data on receiver. Analysis of existing hybrid ARQ/FEC systems showed that they improve data transmission speed and reduce the effect of head-of-line blocking. Proposed a variant of ARQ/FEC system based on UDP. The feature this variant is the integration of Reed-Solomon codes and extended codes with parity check with congestion control algorithms for both sender and receiver. The structure of proposed variant ARQ/FEC system consists of adaptive module FEC, as well as feedback and control of the sliding window in sender and receiver, which will deal effectively with the problem of head-of-line blocking.

Keywords: head-of-line blocking, ARQ/FEC, transport coding, data-driven interaction, congestion control.

Karpukhin Eugene, Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Design Information Technologies Center, Russian Academy of Sciences. Graduated in 2009 from the Moscow Aviation Institute (State Technical University). The number of publications - 20, monographs - 2. Research interests - design of protected telecommunication systems and networks.

Литература

1. Борискина Е.П., Витомский Е.В., Карпухин Е.О., Корнилов А.М., Неволин А.О. Безопасное информационное взаимодействие. Под редакцией Мазепы Р.Б., Михайлова В.Ю., М.: МАИ-ПРИНТ, 2010 г. – раздел 2, с.44-76
2. Young-Woo Kwon, JongWon Kim. Adaptive FEC and ARQ Control for Reliable High-speed UDP-based Media Transport // in Proceedings of the SPIE, Volume 5600, 2004, p. 11-20
3. Dhiman Barman, Ibrahim Matta, Eitan Altman and Rachid El Azouzi. TCP Optimization through FEC, ARQ and Transmission Power Tradeoffs // Second International Conference, WWIC, 2004, p. 87-98
4. Sanjeev Mehrotra, Jin Li, Ying-zong Huang. Minimizing delay in lossless sequential data streaming // in Proc. Int. Conf. Multimedia and Expo., 2010, p.1-6
5. Карпухин Е.О., Карнаков В.В. Применение корректирующих кодов в системах ARQ/FEC на транспортном и прикладном уровнях // Информационные технологии в науке, образовании и управлении: труды междунар. конф. IT + S&E 16, 2016 г., с. 207-211
6. Floyd S. and T. Henderson. The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm // RFC 2582, April 1999.
7. Карпухин Е.О., Гасанов Э.О., Солодовников В.И. Способ управления доставкой сетевых пакетов на стороне получателя для повышения эффективности информационного взаимодействия в телекоммуникационных системах // Системы высокой доступности, 2014 г., т.10, №2 – с.33-37.
8. Гридин В.Н., Карпухин Е.О., Евдокимов И.А. Оценка эффективности способа управления доставкой сетевых пакетов на стороне получателя // Системы и средства информатики, т.25, №3, 2015г. – с. 150-160