

НАДЕЖНАЯ ДОСТАВКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В IP-СЕТЯХ

А.Бегаев,
к.т.н., коммерческий директор
ОАО "Институт Сетевых Технологий"
begaev@mail.ru

Поистине взрывной рост приложений реального времени и генерируемого ими трафика требует специальных механизмов его доставки по IP-сетям. Автор предлагает возможный подход к решению проблемы гарантированной доставки данных реального времени, основанный на передаче данных одновременно по нескольким независимым маршрутам. При этом обосновывается теоретическая возможность реализации механизмов динамической маршрутизации.

ПРОБЛЕМЫ ДОСТАВКИ АУДИО- И ВИДЕОПОТОКОВ ПО IP-СЕТЯМ

Телекоммуникационные операторы стремятся предоставлять все более разнообразные услуги, чтобы максимально увеличить доход от каждого пользователя и сохранить конкурентоспособность. Интересы операторов в большей степени смешаются в сторону triple-play-услуг (передачи аудио-, видеосигнала и данных) через IP-сети. При этом приложения реального времени становятся ключевым компонентом для роста их бизнеса. Чтобы дополнить уже существующие сервисы новыми приложениями реального времени, значительные средства инвестируются в развитие IP-сетей для широковещательной трансляции программ телевидения (IPTV), видео по запросу (VoD), видеосвязи высокой четкости (HD Video), голосовой связи высокой четкости (HD Audio) и т.д. Однако есть ряд противоречий между качеством доставки информации приложений реального времени в действующих IP-сетях и современными требованиями к качеству изображения и звука.

Способность операторов предложить доступные и качественные телекоммуникационные услуги для провайдеров аудио- и видеоконтента (контент-провайдеров) становится жизненной необходимостью, залогом сохранения конкурентоспособности в отрасли. Эта задача мобилизует разработчиков на поиски решений по гаран-

тированной доставке потоков информации в реальном времени по IP-сети одновременно миллионам потребителей.

Основная проблема для операторов телекоммуникационных услуг заключается в том, что аудио- и видеопотоки создают совсем другой профиль нагрузки, нежели приложения передачи данных, для которых IP-сети изначально проектировались. Одна из характерных особенностей приложений реального времени – их чувствительность к задержкам: если пакет с данными задержится или потеряется, то на стороне получателя это сразу проявится в виде ухудшения звука или изображения. Даже небольшие сбои при передаче пакетов могут привести к значительному снижению качества.

Согласно отраслевым нормам, качество восприятия видеоизображения считается приемлемым, если в течение двух часов передачи случается не более одного видимого ухудшения изображения. Поэтому для контент-провайдеров, предоставляющих, например, услуги телевидения высокой четкости (HDTV – High Definition Television), максимальный уровень потерь пакетов 10^{-6} – это базисное требование на рынке телекоммуникационных услуг. Для сравнения – для стандартного телевидения допустимый уровень потерь пакетов составляет не более 10^{-5} .

Для иллюстрации сути проблемы пакетных потерь рассмотрим ее на примере доставки видеосигналов широковещательного телевидения. Видеосигнал передается по IP-сети в сильно сжатом виде. Именно по этой причине потеря даже единственного IP-пакета с видеоконтентом может привести к заметному ухудшению качества видеоизображения.

Видеокодеки обычно получают поток в стандарте MPEG-2 или MPEG-4, который состоит из трех типов кадров – I, P и B. Для создания группы изображений кодер или декодер стандарта MPEG использует в потоке последовательность кадров типа I и следующих за ними кадров типа P или B. Группа изображений – это некоторое количество кадров в промежутке между следующими друг за другом кадрами типа I.

Кодирование последовательности изображений в потоке MPEG позволяет значительно снизить требования к пропускной способности сети доступа. Обратной стороной снижения нагрузки на сеть является зависимость качества изображения от надежности доставки пакетов по сети. Утеря кадра типа I может привести к внедрению в передачу явно видимых ложных изображений (так называемых артефактов), таких как пикселизация, укрупнение составных частей видеоизображения и т.п., что серьезно ухудшает качество видеопросмотра.

Проблему пакетных потерь в IP-сети обычно связывают с принципиальной "ненадежностью" протокола IP, а ее решение – с высокоэффективными механизмами защиты от потерь.

СЕТИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Решить проблему надежности доставки пакетов призвана архитектура IP-сети нового поколения (IP-NGN), предложенная компанией Cisco для широковещательного телевидения. Она предусматривает возможность доставки потоков реального времени по двум альтернативным путям, причем как от одиночного, так и от двойного источника идентичного видеоконтента [1] (рис.1). При этом клиент может получать идентичный видеоконтент по двум отдельным путям. При возникновении ошибки в видеопотоке получатель может переключиться с одного потока или источника на другой. Такая схема позволяет избежать перерывов в видеотрансляции, которые могут возникнуть вследствие затрат времени на пересчет маршрута или в результате потерь кадров типа I в видеопотоке. Чтобы архитектура dual-live была эффективной, первичный и вторичный видеисточники должны быть географически разнесены.

Однако такое решение не является каким-либо общим инструментом надежной доставки информации приложений реального времени по IP-сети. Кроме того, оно не позволяет предоставлять услуги широковещательной трансляции IPTV по IP-сети с уровнем потерь пакетов выше 10^{-5} . Этот недостаток исключает возможность использования IP-сетей обычной архитектуры, а также беспроводных сетей. В беспроводных сетях пакеты теряются не только из-за перегрузок, но и вследствие замираний, то есть в них уровень потерь значительно выше, чем в проводных сетях. Кроме того, потери носят произвольный харак-

тер, что является особенно критичным для трансляции видеопрограмм.

Все эти проблемы требуют поиска новых решений по гарантированной доставке пакетов информации в реальном времени по IP-сети как перспективного механизма для дальнейшего наращивания объема телекоммуникационных услуг на рынке сервисов приложений реального времени [2].

ГАРАНТИРОВАННАЯ ДОСТАВКА ПАКЕТОВ В IP-СЕТИ

Для приложений реального времени механизмы протокола TCP (Transmission Control Protocol) оказываются непригодными, так как они обеспечивают доставку данных, но не гарантируют время их доставки. Протокол UDP (User Datagram Protocol), используемый приложениями реального времени, обеспечивает быстроту, но не гарантирует доставку данных. Возникает закономерный вопрос: есть ли другие механизмы, обеспечивающие как быстроту, так и гарантированность доставки потоков данных реального времени по IP-сети?

Сегодня применяется два основных подхода. Первый из них состоит в поддержании всех необходимых параметров сети на требуемом уровне за счет глобального усовершенствования сетевого оборудования. Именно на этом подходе в основном и базируется решение по надежной доставке потоков широковещательной видеотрансляции в IP-NGN компании Cisco (см. рис.1).

Второй подход основан на использовании механизмов, которые обеспечивали бы приемлемое качество при малой зависимости от характеристик сети. Среди них наиболее распространено приоритетное обслуживание, которое поддерживается во множестве сетей. Это целый набор функций, который обеспечивает приоритет определенным типам данных в сети, таким как аудио или видео, по сравнению с менее чувствительной к задержкам информации, что позволяет влиять на уровень потерь пакетов приложений реального времени.

В 2010 году мировой ежемесячный объем IP-трафика составил 20,2 экзабайта. Эксперты указывают, что до 2015 года он вырастет до 80,5 экзабайта в месяц, с темпами роста 32% (CAGR). Причем 90% будет составлять видеотрафик [6]. То есть для приложений реального времени обеспечить требуемый уровень потерь будет все труднее, а механизма приоритетного обслуживания уже и сейчас недостаточно для обеспечения видеотрансляции с качеством восприятия хотя бы на уровне современных кабельных или спутниковых телевизионных сервисов.

Учитывая разнообразие приложений реального времени, необходим универсальный инструмент, который обеспечивал бы как время, так и вероятность доставки информации по IP-сети. Для этого предлагается метод [2], суть которого (рис.2) в следующем – сервер гарантированной доставки отправляет как сам пакет, так и его копии по независимым кратчайшим маршрутам. Под независимыми мы понимаем маршруты, не имеющие общих элементов.

Сервер гарантированной доставки на основании информации о состоянии сети формирует несколько независимых маршрутов до каждого получателя аудио- и видеоконтента. Данный механизм может использоваться совместно с процедурой маршрутизации от

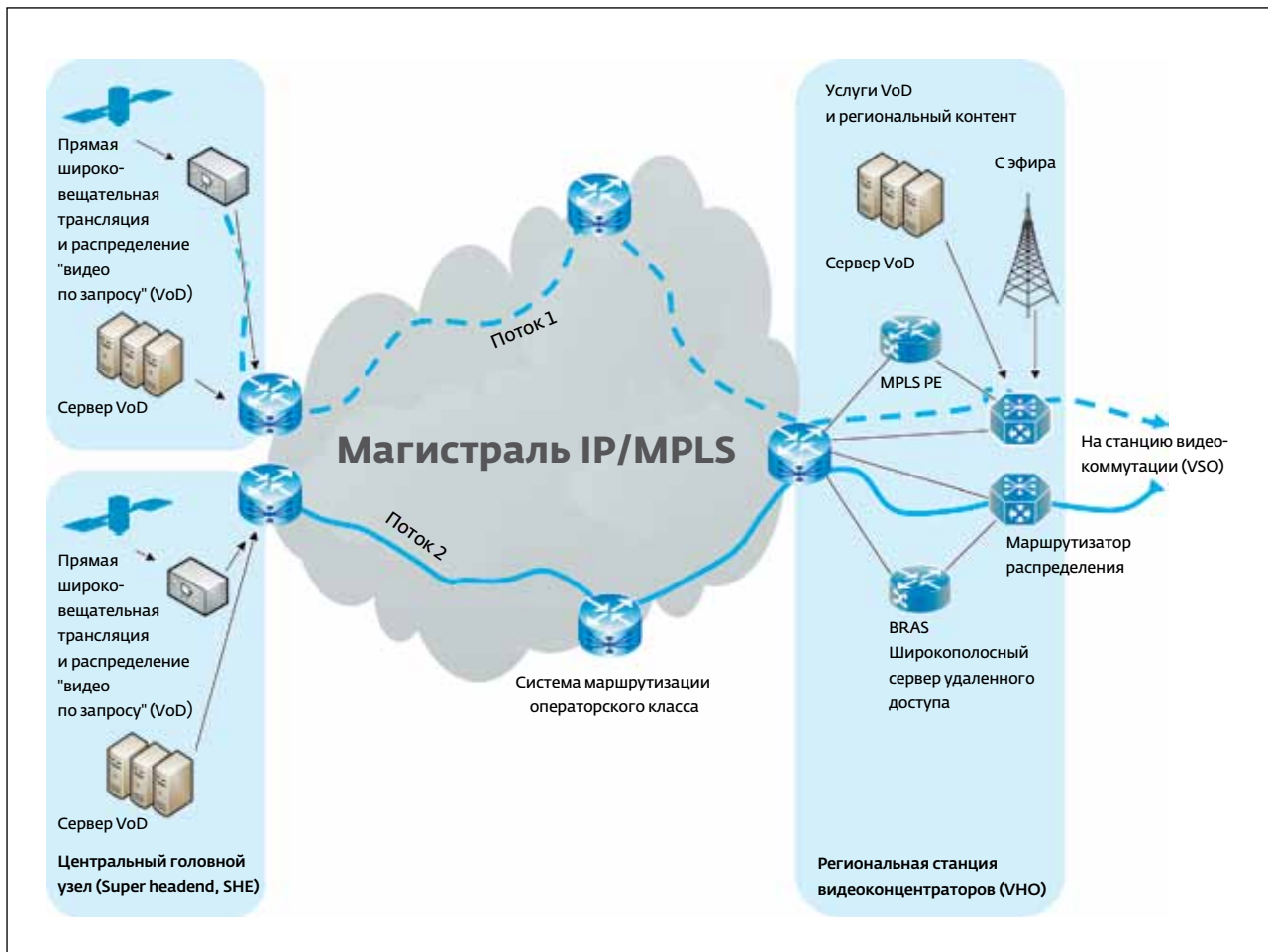


Рис.1. Схема IP-NGN для видеотрансляций

источника (Source Routing). В соответствии с этой процедурой в отправляемом в сеть пакете задается полный маршрут его следования через все промежуточные маршрутизаторы.

Данный механизм получения услуги реального времени требует, чтобы на стороне клиента аудио- и видеоконтент мог быть восстановлен из нескольких потоков. При этом потоки не обязательно должны быть идентичными. Например, вариации в совокупности потоков пакетов с кадрами **I**, **P** и **B** обеспечат возможность полного восстановления видеоконтента.

Предложенный механизм гарантирует как время, так и вероятность доставки пакета, не предъявляя дополнительных требований к вероятностно-временным характеристикам сети.

Поскольку метод предполагает передачу пакетов и их копий по разным сетевым маршрутам, критерием доставки пакета является наличие хотя бы одного из нескольких маршрутов доставки. Очевидно, что приращение вероятности доставки пакета тем больше, чем меньше общих элементов в различных маршрутах. Наибольший эффект проявляется при доставке пакета и его копий по независимым маршрутам. В этом случае вероятность доставки пакета $H_{st} = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot \dots \cdot (1 - P_m)$, где P_i – вероятность доставки пакета по любому маршруту, $m = \|M\|$ – мощность множества маршрутов между источником и получателем.

P_m можно вычислить по формуле последовательного соединения:

$$P_m = P_{1m} \cdot P_{2m} \cdot \dots \cdot P_{jm},$$

где p_{jm} – вероятность корректной работы j -го элемента m -го маршрута за время прохождения пакета. Формула учитывает все возможные причины потери пакета – перегрузки и отказы элемента, искажения и т.д. Так, для обеспечения двумя независимыми маршрутами приемлемого качества восприятия видеоизображения HDTV максимально гарантируемый уровень потерь пакетов 10^{-3} в IP-сети будет достаточным.

Разработка универсального инструмента гарантированной доставки информации реального времени придаст совершенно новые свойства IP-сетям даже с обычной архитектурой.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ГАРАНТИРОВАННОЙ ДОСТАВКИ ПАКЕТОВ В IP-СЕТИ

Механизм гарантированной доставки пакетов базируется на варианте управления потоками, отличным от механизма, существующего в IP-сетях. Он предусматривает отправку источником s пакетов информации в адрес получателя t по "совокупности независимых маршрутов". Необходимость предоставления услуг реального времени миллионам потребителей подразумевает нали-

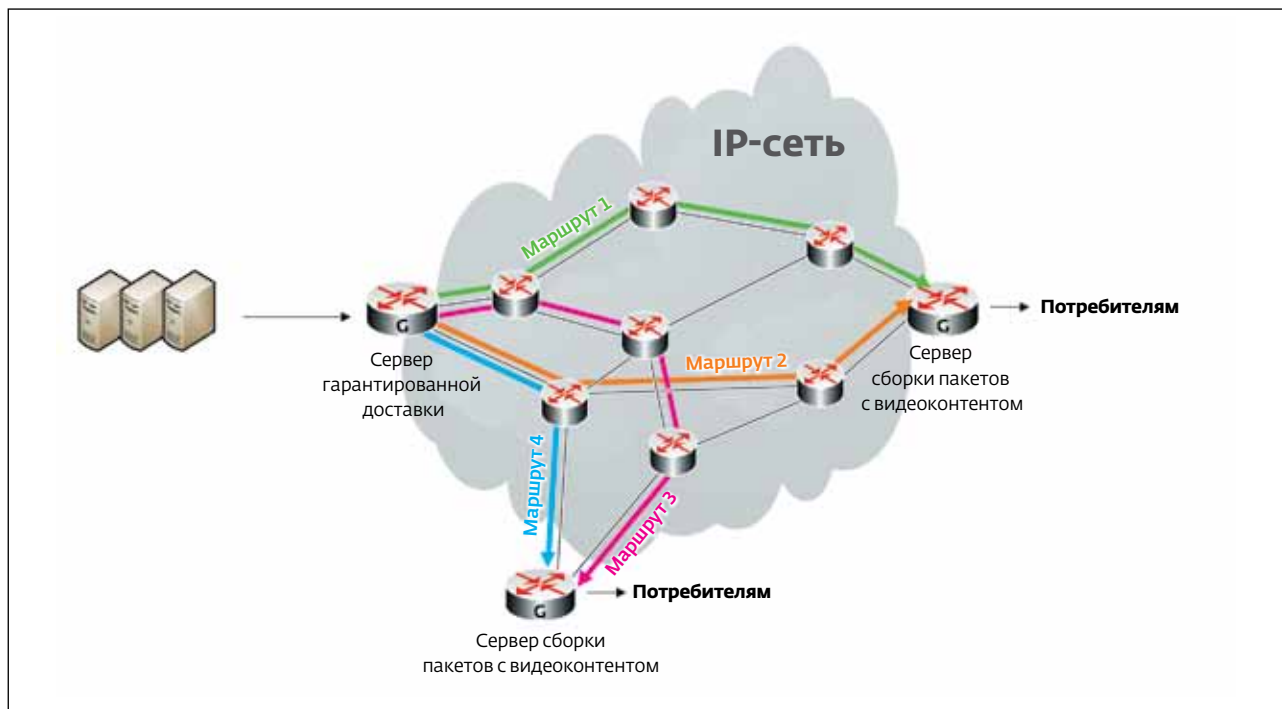


Рис.2 **Схема гарантированной доставки пакетов для видеотрансляций**

чие динамических процедур выработки таких маршрутов до каждого получателя. В математическом плане постановка задачи выработки нескольких независимых маршрутов может быть сформулирована на языке теории графов.

Заданы граф $G[N, A]$ с выделенными вершинами s и t , а также положительные целые числа J и K ($J, K \leq |N|$). Требуется найти в графе $G[N, A]$ не менее J маршрутов из s в t , попарно не имеющих общих узлов и включающих не более K дуг. Задача в данной постановке известна [3, 4] под названием "максимальное количество ограниченных непересекающихся путей" и входит в список NP полных задач.

Однако это не является обстоятельством "непреодолимой силы". В работе [5] предложен метод трансформированного перебора путей в графе, который позволяет на каждой своей итерации сократить число элементарных операций в $(p-1)/(2p-3)$ раз, где $p = 2 \dots (n-1)$ – длина пути (номер итерации), n – число вершин в графе, $n \geq 3$.

Метод трансформации – это своего рода логический шаблон, автоматически выделяющий и группирующий все результаты перебора на графе. При этом элементарные пути, у которых первая и последняя вершины совпадают, а набор вершин между ними одинаков, объединяются по правилу объединения множеств. Это позволяет, не снижая точности перебора, сократить количество результатов за счет участия в переборе сочетаний элементарных путей, а не каждого пути в отдельности.

Предлагаемый механизм гарантированной доставки пакетов по IP-сети может применяться для приложений реального времени, к которым можно отнести системы управления технологическими процессами, управление промышленным оборудованием, распре-

деленное интерактивное моделирование, аудио- и видеоконференции, передачу видео для немедленного воспроизведения, удаленную медицинскую диагностику, телефонию, некоторые игры и т.д. Также его можно рекомендовать к использованию в существующих и создаваемых сетях, обеспечивающих функционирование командных и контрольных центров, систем и центров управления, систем электронного документооборота и т.д., которые предъявляют повышенные требования к вероятностно-временным характеристикам доставки команд, сигналов управления, информации состояния, технологических сигналов и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Захаров М.** Требования к IP-сетям нового поколения для организации масштабируемого и надежного сервиса широковещательной трансляции IPTV. – Cisco, 2007, www.cisco.com/web/RU/downloads/IP_NGN_requirements.pdf
2. **Апарина Е. Ю., Бегаев А.Н., Куделя В.Н.** Проблемы и решения по доставке информации приложений реального времени в IP-сетях. – Информационные технологии, 2011, №7.
3. **Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П.** Сети коммутации пакетов. /Под ред. В.С.Семенихина. – М.: Радио и связь, 1986.
4. **Гэри М., Джонсон Д.** Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. – М.: Мир, 1982.
5. **Куделя В.Н.** NP-проблема и математическое обеспечение управления сетью. – Информация и космос, 2010, №3.
6. **Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2010--2015.** Cisco, June 2011, www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html