Уточнение эффективности использования транспортного кодирования для экспоненциального распределения задержки пакетов

Сергеев А.В., ст.преп. кафедры безопасности информационных систем

ГУАП, slaros@vu.spb.ru

Афанасьев М.М., магистр кафедры безопасности информационных систем

ГУАП, af-mm@yandex.ru

Аннотация

В последнее время появляется все большее число приложений и сервисов для работы которых требуется взаимодействие если не в реальном времени, то с низкой задержкой. Требование по низкой задержке присутствуют не только в существующих стандартах IoT, сетях пятого поколения, но и в рекомендации ITU-T для следующего поколения, Tactile Internet [1]. В данной работе производится уточнение выигрыша при использовании транспортного кодирования [2] для трафика критичного к задержке, рассматривается прямая и обратная задача, оценивается влияние транспортного кодирования на джиттер [3].

Введение

Для видов трафика критичных к задержке, таких как систем безопасности (аудио, видео, команды управления), системы дистанционного управления, VoIP и др., можно выделить несколько параметров:

1. Максимально допустимая задержка (latency acceptable) - t_{max} (например, для VoIP это 250 мс [3]);

2. Джиттер (jitter), разброс максимальной и минимальной задержки от средней задержки - $t'_{avg} - t'_{min}, t'_{max} - t'_{avg}$ [3].

Рассматриваются прикладной, транспортный и сетевой уровни сети, для которых стандартными методами уменьшения задержки являются:

1. Настройка маршрутизации пакетов в сети;
2. Настройка приоритизации пакетов в сети (QoS);
3. Использование буфера для борьбы с джиттером;
4. и др.

Альтернативным методом уменьшения задержки является использование транспортного кодирования, впервые предложенного Г.А. Каботянским и Е.А. Круком, рассматриваемое в работах [2] [4] [5].

В данной работе производится уточнение эффективности использования транспортного кодирования для экспоненциального распределения задержки пакетов.

1 Транспортное кодирование

1.1 Модель сети

В работе [2] рассматривается известная модель сети Л.Клейнрока [6] с дополнительными допущениями.

Сеть содержит M каналов и N узлов. Все каналы бесшумные и абсолютно надежные, пропускные способности каналов одинаковые и равны C. В узлах сети проводится обработка принятых пакетов, включающая выбор маршрутов, хранение пакетов, установление очередей и т.д., обработка в узлах является безошибочной и мгновенной.

Пакеты поступающие в i-ый узел сети и предназначенные для j-ого узла, представляют собой пуассоновский поток со средним γ_{00} (пакетов/секунду). Величина

$$\gamma_0 = N\gamma_{00}$$

представляет внешний трафик i-ого узла, а величина

$$\gamma = N\gamma_0 = N^2\gamma_{00}$$

полный внешний трафик сети.

Для размещения сообщений в сети имеются буферы неограниченной емкости, так что в сети нет потерь.

Все сообщения, поступающие в сеть, разбиты на k пакетов длины m. Внутри сети длины пакетов удовлетворяют введенному в [6] предположению о независимости: всякий раз, когда сообщение принимается в узле внутри сети, независимо с плотностью распределения

$$P(b) = \mu e^{-\mu b}, b \geq 0,$$

выбирается его новая длина b'.

Поток пакетов, проходящих по каналам, является пуассоновским со средним значением λ_0 (пакетов/секунду). Полный внутренний трафик сети

$$\lambda = M\lambda_0.$$

Обозначим через ρ величину нагрузки каналов сети, тогда средняя задержка отдельного пакета:

$$\bar{t}(\rho) = \frac{\lambda}{\mu C\gamma}\frac{1}{1-\rho}. \tag{1}$$

В описанную модель введем еще два допушения:

1. Будем полагать, что задержки пакетов в сети независимы и распределены экспоненциально со средним значением $\bar{t}(\rho)$

$$F_\rho(t) = 1 - e^{-t/\bar{t}(\rho)}, t \geq 0. \tag{2}$$

2. Управление потоком в сети таково, что увеличение внешнего трафика сети приводит к такому же увеличению нагрузки ее отдельных каналов.

1.2 Кодирование сообщений

В работе [2] был предложен следующий метод организации транспортного кодирования: исходные пакеты при поступлении в сеть содержать m символов. Рассмотрим пакеты как элементы поля $GF(2^m)$ и будем кодировать сообщения 2^m-ичным максимальным (n,k)-кодом (например, кодом Рида-Соломона). Тогда k-пакетному сообщению будет соответствовать n пакетов, которые мы назовем кодированным сообщением. Для передачи сообщения в сеть будем отправлять соответствующее кодированное сообщение, что соответствует возрастанию сетевого трафика в $n/k = 1/R$ раз.

Известно, что слово максимального (n,k) - кода может быть восстановлено по любым k информационным символам. Следовательно, для сборки сообщения при описанном выше методе передачи достаточно получить на приемном узле любые k его пакетов.

Среднее время прихода некодированного сообщения равно k-порядковой статистике $\overline{T}_{k:k}$, а среднее время прихода кодированного сообщения $\overline{T}_{k:n}$.

2 Постановка задачи

Уточнение параметров транспортного кодирования при экспоненциальном распределении времени задержки пакетов (2) для трафика критичного к задержкам.

Далее под прямой и обратной постановкой задачи будем понимать:

1. Прямая постановка задачи: минимизация прихода пакета позже, чем t_{max};

2. Обратная постановка задачи: нахождения оптимальных параметров кода при фиксированной вероятности времени прихода сообщения позже, чем t_{max}.

2.1 Модель трафика критичного к задержке передачи сообщения

Рассмотрим модель трафика описываемую следующими параметрами:

1. t_{max} -максимально допустимое время прихода для сообщения;

2. $p = Pr\{\overline{T}_{k:n} > t_{max}\}$ - объем сообщений пришедших после t_{max};

3. k - число пакетов в сообщении.

С учетом допущения (2) для данной модели сети, время прихода пакета является случайной величиной распределеной по экспоненциальному закону. Говорить о каком либо методе гарантирующем приход сообщений до t_{max} нельзя, можно говорить только о минимизации значения параметра p.

2.2 Среднее время прихода пакета

Средняя задержка отдельного пакета (1) зависит от многих параметров, таких как суммарная интенсивность внутреннего трафика λ, суммарная интенсивность внешнего трафика γ, μ, пропускная способность канала C. Из этого выражения видно, что при $\rho = 0$ выражение $\frac{\lambda}{\gamma\mu C}$ представляет собой начальную задержку пакета в пустой сети, а выражение $\frac{1}{1-\rho}$ увеличивающий коэффициент, зависящий только от ρ. Таким образом, абсолютные значения этих параметров не важны, важно лишь значение начальной задержки в пустой сети. Обозначим начальную задержку через $\bar{t}_s$ и перепишем (1) как

$$\bar{t}(\rho) = \bar{t}_s \frac{1}{1-\rho}. \tag{3}$$

Для всех последующих измерений положим $\bar{t}_s = 2$. Данное значение было выбрано таким образом, чтобы для рассматриваемого значения $t_{max} = 9$ рассматриваемая модель сети не могла обеспечить доставку сообщения в среднем за время меньшее t_{max} , при некоторой интенсивности использования канала ρ. Отметим, что единица измерения времени является абстрактной величиной, в зависимости от конкретной задачи она может быть выражена в нужных единицах.

2.3 Прямая постановка задачи

Зафиксируем значение t_{max}, какова вероятность $p(\rho)$, что сообщение пришло позже чем t_{max} при некотором заданном значении нагрузки на канал ρ?

Для последующих вычислений положим $k = 8$.

$$\bar{t}(\rho/R) = \bar{t}(\rho)\frac{1-\rho}{1-\frac{\rho}{R}}$$

$$a = -\frac{t_{max}}{\bar{t}(\rho/R)} = -\frac{t_{max}(1-\frac{\rho}{R})}{t(\rho)(1-\rho)}$$

$$p = 1 - Pr\{\overline{T}_{k:n} \leq t_{max}\} = 1 - \sum_{i=k}^{n} C_n^i (1-e^a)^i e^{a(n-i)}, n = \frac{1}{R}$$

На рисунке 1 показана вероятность потери сообщений при использовании разных скоростей кода для случая когда $t_{max} = 9$:

1. Без использования транспортного кодирования при интенсивности использования канала $\rho = 0.44$ вероятность потери сообщений составляет $p = 0.5$;
2. При скорости кода $R = 0.9, p = 0.25$;
3. При скорости кода $R = 0.8, p = 0.15$;
4. При скорости кода $R = 0.7, p = 0.1$.

При значении параметра $p = 0.1$ без транспортного кодирования можно обеспечить выполнения целевых показателей модели трафика с максимальной интенсивностью использования канала $\rho_{max} \approx 0.04$, а с использованием транспортного кодирования со скоростью кода $R = 0.7$, этот параметр удалось увеличить до $\rho_{max} \approx 0.44$.

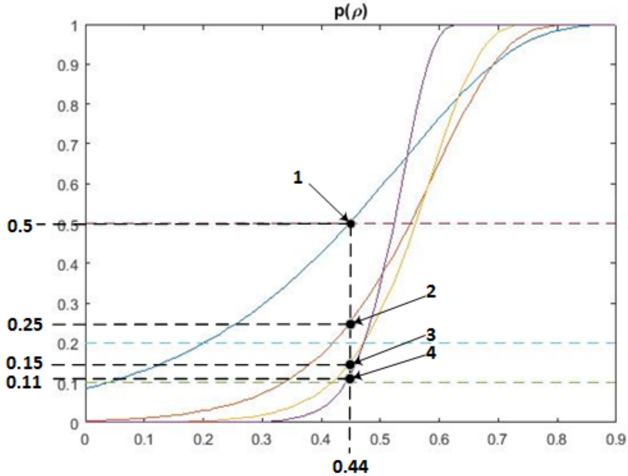

Рис. 1: Прямая постановка задачи при $t_{max} = 9$

2.4 Влияние транспортного кодирования на джиттер

Для оценки влияния транспортного кодирования на джиттер произведем вычисление дисперсии и среднеквадратичного отклонения средней задержки сообщения. С учетом допущения (2) об экспоненциальном законе распределения времени задержки пакета, можно получить:

$$M[T] = \bar{t}(\rho)$$

$$D[T] = \bar{t}(\rho)^2$$

Дисперсия k-порядковой статистики [7]:

$$D[T_{k:n}] = D[T] \sum_{i=n-k+1}^{n} i^{-2} = \bar{t}(\rho \backslash R)^2 \sum_{i=n-k+1}^{n} i^{-2}$$

$$D[T_{k:k}] = D[T] \sum_{i=1}^{k} i^{-2} = \bar{t}(\rho)^2 \sum_{i=1}^{k} i^{-2}$$

Выигрыш по среднеквадратичному отклонению:

$$f(R) = \frac{\sigma[T_{k:k}]}{\sigma[T_{k:n}} = \frac{\sqrt{D[T_{k:k}]}}{\sqrt{D[T_{k:n}]}} = \frac{\bar{t}(\rho)\sqrt{\sum_{i=1}^{k} i^{-2}}}{\bar{t}(\rho\backslash R)\sqrt{\sum_{i=n-k+1}^{n} i^{-2}}} = \frac{(1-\rho\backslash R)\sqrt{\sum_{i=1}^{k} i^{-2}}}{(1-\rho)\sqrt{\sum_{i=n-k+1}^{n} i^{-2}}}$$

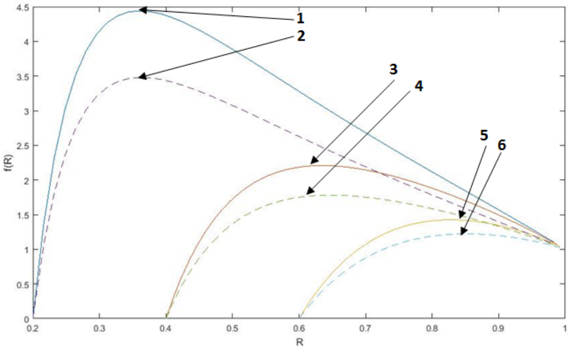

Рис. 2: Выигрыш по среднеквадратичному отклонению

На рисунке 2 показан график оценки выигрыша по среднеквадратичному отклонению в зависимости от интенсивновсти использования канала и полученная в работе [2] оценка выигрыша по средней задержке сообщения. На рисунке отмечены следующие графики:

1. График выигрыша по $\sigma[\overline{T}_{k:n}]$ при $\rho = 0.2$;
2. График выигрыша по $M[\overline{T}_{k:n}]$ при $\rho = 0.2$;
3. График выигрыша по $\sigma[\overline{T}_{k:n}]$ при $\rho = 0.4$;
4. График выигрыша по $M[\overline{T}_{k:n}]$ при $\rho = 0.4$;
5. График выигрыша по $\sigma[\overline{T}_{k:n}]$ при $\rho = 0.6$;
6. График выигрыша по $M[\overline{T}_{k:n}]$ при $\rho = 0.6$.

Как видно из полученных графиков, транспортное кодирование позволяет уменьшить среднеквадратичное отклонение, что говорит и о уменьшении джиттера. Так, например, при интенсивности использования канала $\rho = 0.2$ и скорости кода $R = 0.36$, выигрыш по среднеквадратичному отклонению составил ≈ 4.5 раза, в то время как выигрыш по средней задержке сообщения [2] составил ≈ 3.5.

2.5 Обратная постановка задачи

Зафиксируем значение t_{max} и вероятность p, что сообщение пришло позже чем t_{max}. Какой код нужно использовать, чтобы выдержать целевое значение $p(\rho)$?

$$a = -\frac{t_{max}}{\bar{t}(\rho/R)} = -\frac{t_{max}(1-\frac{\rho}{R})}{t(\rho)(1-\rho)}$$

$$p \geq 1 - \sum_{i=k}^{n} C_n^i (1-e^a)^i e^{a(n-i)}, n = k \dots n_{max}$$

где n_{max} - некоторое максимальное значение количества пакетов из которых состоит сообщение, для последующих вычислений $n_{max} = 100$.

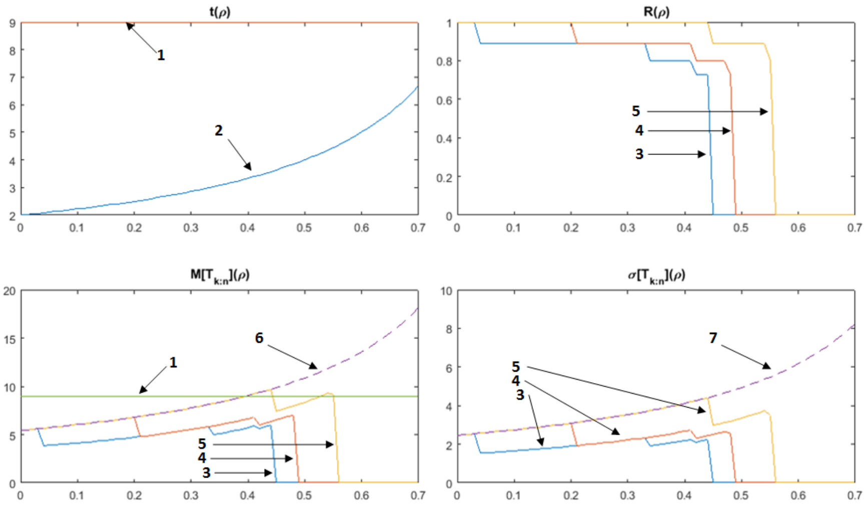

Рис. 3: Обратная постановка задачи при $t_{max} = 9$

На рисунке 3 показаны графики для случая $t_{max} = 9$:

1. Уровень t_{max};
2. Задержка пакета в зависимости от нагрузки на канал $\bar{t}(\rho)$;
3. Средняя задержка сообщения $M[\overline{T}_{k:n}](\rho)$, среднеквадратичное отклонение $\sigma[\overline{T}_{k:n}](\rho)$, скорость кода $R(\rho)$ при $p = 0.1$;
4. Средняя задержка сообщения $M[\overline{T}_{k:n}](\rho)$, среднеквадратичное отклонение $\sigma[\overline{T}_{k:n}](\rho)$, скорость кода $R(\rho)$ при $p = 0.2$;

5. Средняя задержка сообщения $M[\overline{T}_{k:n}](\rho)$, среднеквадратичное отклонение $\sigma[\overline{T}_{k:n}](\rho)$, скорость кода $R(\rho)$ при $p = 0.5$;
6. Средняя задержка сообщения $M[\overline{T}_{k:n}](\rho)$ при $R = 1$;
7. Среднеквадратичное отклонение $\sigma[\overline{T}_{k:n}](\rho)$ при $R = 1$.

Можно видеть, что с увеличением нагрузки на канал ρ происходит уменьшение скорости кода для выполнения целевых показателей трафика, однако после достижения некоторого ρ_{max}, транспортное кодирование уже не может обеспечить выполнения целевых показателей.

Заключение

В данной работе предложена новая модель трафика критичного к задержке, состоящей из максимально допустимой задержки t_{max} и вероятности события, что сообщения придет позже, чем $t_{max}, p = Pr\{\overline{T}_{k:n} > t_{max}\}$. Произведено уточнение эффективности использования транспортного кодирования для данной модели трафика.

Для рассматриваемых параметров модели сети ($t_s = 2$) и модели трафика ($t_{max} = 9, k = 8, n_{max} = 100$), было установлено, что транспортное кодирование позволяет:

1. Уменьшить значение джиттера. При интенсивности использования канала $\rho = 0.2$ и скорости кода $R = 0.36$, выигрыш по среднеквадратичному отклонению составил ≈ 4.5 раза, в то время как выигрыш по средней задержке сообщения [2] составил ≈ 3.5;
2. Увеличить максимальную интенсивность использование канала ρ_{max} при котором будут выдержаны целевые значения модели трафика. При значении параметра $p = 0.1$ без транспортного кодирования можно обеспечить выполнения целевых показателей модели трафика с максимальной интенсивностью использования канала $\rho_{max} \approx 0.04$, а с использованием транспортного кодирования со скоростью кода $R = 0.7$, этот параметр удалось увеличить до $\rho_{max} \approx 0.44$.;
3. Уменьшить вероятность p того, что сообщение придет после t_{max} при фиксированной интенсивности использования канала ρ. Без использования транспортного кодирования, при $\rho = 0.44$ вероятность потери сообщения составляет $p = 0.5$, а при использовании транспортного кодирования со скоростью кода $R = 0.7$ этот параметр составляет $p = 0.1$.

Дальнейшие направления исследования включают:

1. Уточнение эффективности использования транспортного кодирования для более реалистичной модели сети, включающую такие параметры как: размер MTU, длина пакета в байтах, задержку пакета в миллисекундах и т.д.;

2. Рассмотрение реального протокола критичного к задержкам передачи сообщений.

Список источников

[1] ITU-T Technology Watch Report - “The Tactile Internet”, August 2014. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/gen/T-GEN-TWATCH-2014-1-PDF-E.pdf

[2] Крук Е.А. - “Комбинаторное декодирование линейных блоковых кодов”: дис. ... д-ра техн. наук., 1999.

[3] А.В.Росляков, М.Ю.Самсонов, И.В.Шибаева - “IP телефония”. М.: Эко-Трендз, 2003.

[4] Каботянский Г.А., Крук Е.А. - “Кодирование уменьшает задержку” // X Всесоюз. школа-семинар по вычислительным сетям. Ч.2.М.-Тбилиси, 1985. С. 23-26.

[5] Каботянский Г.А., Крук Е.А. - “Об избыточном кодировании на транспортном уровне сети передачи данных” // Помехоустойчивое кодирование и надежность ЭВМ. М.: Наука, 1987. С. 143-150.

[6] Л.Клейнрок - “Вычислительные системы с очередями”. М.: Мир, 1979.

[7] Г.Дейвид - “Порядковые статистики”. М.: Наука, 1979.