

Национальный исследовательский
Томский государственный университет
Кемеровский государственный университет
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН
Российский университет дружбы народов
Филиал Кемеровского государственного университета
в г. Анжеро-Судженске

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
(ИТММ–2016)**

**Материалы XV Международной конференции
имени А. Ф. Терпугова
12–16 сентября 2016 г.**

Часть 1

Издательство Томского университета

2016

6. Иовлев Д. И. Выбор модели TCP для сетей MANET. Влияние одноуровневого принципа организации сетей на протокол TCP // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 123–127.

7. Романов С. В. Симуляторы беспроводных MANET-сетей / С. В. Романов, А. Н. Жолобов, Д. Е. Прозоров // Инфокоммуникационные технологии. – 2012. – № 3. – С. 28–33.

DOI: 10.17223/9785751124335/36

ВЛИЯНИЕ КОНВЕЙЕРНОГО ЭФФЕКТА НА ЗАДЕРЖКУ МУЛЬТИПАКЕТНОГО СООБЩЕНИЯ В МНОГОЗВЕННОМ ТРАНСПОРТНОМ СОЕДИНЕНИИ

В. В. Кокшенев, П. А. Михеев, С. П. Сущенко, Р. В. Ткачев

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Введение. Операционные характеристики современных компьютерных сетей в значительной мере определяются транспортным протоколом и его параметрами – шириной окна и длительностью тайм-аута ожидания сквозных подтверждений [1, 2]. Моделирование транспортного соединения и анализ его вероятностно-временных характеристик в различных условиях выполнялись в [2–15]. Современные транспортные протоколы содержат большое разнообразие механизмов управления перегрузками [3]. Имеется широкий спектр исследований [3–9] в области управления параметрами транспортного протокола с целью предупреждения и обхода перегрузок, ориентированный на построение моделей диагностики перегрузки по различным индикаторам [3] и адаптации протокольных параметров к изменяющейся сетевой нагрузке и связности, уровню потерь, активности взаимодействующих абонентов и другим условиям передачи данных. В [10] предложен анализ влияния достоверности передачи пакетов в отдельных звеньях и блокировок конечной буферной памяти в транзитных узлах транспортного соединения на его быстродействие. Важнейшим показателем качества обслуживания абонентов является задержка сообщений пользователей в транспортном соединении, которая в значительной мере определяется конвейерным эффектом, проявляющимся при передаче мультипакетных сообщений в многозвенном тракте передачи данных в виде параллельного переноса различных пакетов сообщения на различных участках пути. Известные подходы [11–15] к анализу задержки абонентских сообщений позволяют изучать влияние длительности тайм-аута ожидания подтверждений и размера пакета на операционные характеристики процесса передачи данных в детерминированном [11–13] либо стохастическом [14, 15] тракте передачи данных. В указанных работах предложены методы анализа операционных характеристик процесса передачи мультипакетных сообщений в детерминированном и одиночных пакетов в стохастическом многозвенном трактах передачи данных при переносе сквозных квитанций

в информационных и служебных пакетах встречного потока. Однако результаты получены при существенных ограничениях на параметры протокола и условия передачи. Кроме того, зависимости для сквозной задержки мультипакетных сообщений в стохастическом многозвенном транспортном соединении не получены. Естественным развитием и обобщением результатов [11–15] является изучение механизма конвейерного переноса мультипакетных сообщений в многозвенных трактах с искажениями на отдельных участках переприема. В данной работе предложен подход к построению распределения времени передачи мультипакетного сообщения в многозвенном виртуальном канале, состоящем из двух и трех участков переприема с искажениями, на основе которого проводится анализ влияния длины тракта передачи данных, размера мультипакетного сообщения, уровня искажений и длительности сквозного тайм-аута неприема квитанции на вероятностно-временные характеристики процесса транспортировки данных.

Модель транспортного соединения. При наложении фактора искажений протокольных блоков данных и механизма решающей обратной связи [2] (повторных передач искаженных блоков) на конвейерный эффект, имеющий место для процесса переноса информационных потоков по многозвенным (многофазным) трактам, виртуальное соединение можно интерпретировать как стохастический конвейер, в котором время обработки на отдельных фазах является случайным. Поскольку на уровне сквозной передачи мультипакетных сообщений прикладных систем актуальной задачей является определение длительностей интервалов ожидания сквозных подтверждений (сквозных тайм-аутов), то важным аспектом становится вероятностное описание процесса сквозного информационного переноса на транспортном уровне. Исчерпывающее описание такого конвейера задает распределение времени сквозной доставки прикладных сообщений адресату, позволяющее получать вероятностно-временные характеристики протокольных управляющих процедур транспортного уровня. Рассмотрим процесс передачи сообщения, состоящего из $N > 1$ пакетов, в транспортном соединении, состоящем из $D > 1$ участков переприема с одинаковым быстроедействием. Будем полагать, что информационные пакеты сообщения и квитанции, переносимые в информационных пакетах встречного потока, имеют одинаковый размер, передаются в каждом звене согласно управляющей процедуре стартстопного протокола [2], а цикл передачи пакета в каждом звене от начала вывода его в линию связи до момента получения квитанции на канальном уровне составляет T . Вероятность искажения n -го пакета сообщения на d -м участке переприема будем обозначать через R_{nd} , $n = 1, N, d = 1, D$. Тогда время безошибочной передачи n -го пакета по d -му межузловому соединению является случайной величиной, кратной длительности цикла T и распределенной по геометрическому закону с параметром $1 - R_{nd}$. Предполагается также, что отправка пакета на каждом уча-

стке пере приема виртуального канала начинается только после того, как он без искажений был передан по предыдущему участку соединительного пути. Считаем, что сквозная транспортировка данных организована следующим образом. На передачу сообщения удаленному адресату и получение от него ответной квитанции выделяется тайм-аут длительностью S интервалов размера T . При неполучении сквозной квитанции за время тайм-аута отправитель организует повторную сквозную передачу. Количество сквозных повторных передач полагаем неограниченным.

Вероятностно-временные характеристики процесса доставки сообщения адресату. Найдем вероятность доставки мультипакетного сообщения адресату по многозвенному виртуальному каналу ровно за $k \geq N + D - 1$ интервалов длительности T . Определим функцию вероятностей $p(k, N, D)$ через вероятности искажений R_{nd} для набора параметров $N=2, D=2$. Поскольку процесс передачи (в том числе повторной передачи) первого и второго пакетов сообщения на втором и первом участках пере приема соответственно совмещен, то возможны два сценария развития событий, когда первый пакет на втором участке передан либо до, либо после корректного завершения передачи второго пакета в первом звене:

$$p(k, 2, 2) = \prod_{n,d=1}^{2,2} (1 - R_{nd}) \sum_{i=0}^{k-3} R_{11}^i \sum_{j=0}^{k-3-i} R_{21}^j \left\{ \sum_{l=0}^{j-1} R_{12}^l R_{22}^{k-3-i-j} + \sum_{m=0}^{k-3-i-j} R_{12}^{j+m} R_{22}^{k-3-i-j-m} \right\}.$$

Для статистически однородного тракта передачи данных и однородного информационного потока $R_{nd} = R, n=1,2, d=1,2$ данная зависимость вероятностей времени доставки сообщения удаленному абоненту с использованием выражений конечных сумм показательно-степенных функций [16] преобразуется к следующему виду:

$$p(k, 2, 2) = (1 - R)^3 R^{k-3} \left\{ 2 \binom{k-1}{2} - (k-2) \frac{1+R}{1-R} + \frac{R(1+R)(1-R^{k-2})}{(1-R)^2} \right\}.$$

Для наборов параметров $N=3, D=2$ и $N=2, D=3$ вариативность развития событий еще выше, поскольку при этом усиливается конвейерный эффект совмещения передач различных пакетов сообщения на различных участках пути. При $N=3, D=2$ первый пакет может быть передан во втором звене до завершения передачи на первом этапе пути либо второго, либо третьего пакетов, либо после завершения приема в транзитном узле третьего пакета. Кроме того, второй пакет сообщения может достичь адресата либо до, либо после передачи третьего пакета в первом звене. С учетом комбинаторики вероятностных траекторий событий получения различных пакетов сообщения адресатом функция вероятности доставки трехпакетного сообщения по двухзвенному тракту за заданное время $k \geq N + D - 1$ определится в виде

$$p(k, 3, 2) = \prod_{n,d=1}^{3,2} (1 - R_{nd}) \sum_{i=0}^{k-4} R_{11}^i \sum_{j=0}^{k-4-i} R_{21}^j \sum_{l=0}^{k-4-i-j} R_{31}^l \left\{ \sum_{m=0}^{j-1} R_{12}^m \times \left(\sum_{g=0}^{l-1} R_{22}^g R_{32}^{k-4-i-j-l} + \sum_{g=0}^{k-4-i-j-l} R_{22}^{g+l} R_{32}^{k-4-i-j-l-g} \right) + \sum_{m=0}^{l-1} R_{12}^{m+j} \times \left(\sum_{g=0}^{l-1-m} R_{22}^g R_{32}^{k-4-i-j-l} + \sum_{g=0}^{k-4-i-j-l} R_{22}^{g+l-m} R_{32}^{k-4-i-j-l-g} \right) + \sum_{m=0}^{k-4-i-j-l} R_{12}^{m+j+l} \sum_{g=0}^{k-4-i-j-l-m} R_{22}^g R_{32}^{k-4-i-j-l-m-g} \right\}$$

Для набора параметров $N=2$, $D=3$ функция вероятностей аналогично определится вариантами передачи первого пакета на втором и третьем участках переприема либо до, либо после завершения передачи второго пакета либо в первом, либо во втором звене транспортного соединения:

$$p(k, 2, 3) = \prod_{n,d=1}^{2,3} (1 - R_{nd}) \sum_{i=0}^{k-4} R_{11}^i \sum_{j=0}^{k-4-i} R_{21}^j \left\{ \sum_{m=0}^{j-1} R_{12}^m \sum_{l=0}^{k-4-i-j} R_{22}^l \times \left(\sum_{g=0}^{j-m+l-1} R_{13}^g R_{23}^{k-4-i-j-l} + \sum_{g=0}^{k-4-i-j-l} R_{13}^{l+g+j-m} R_{23}^{k-4-i-j-l-g} \right) + \sum_{m=0}^{k-4-i-j} R_{12}^{m+j} \sum_{l=0}^{k-4-i-j-m} R_{22}^l \times \left(\sum_{g=0}^{l-1} R_{13}^g R_{23}^{k-4-i-j-m-l} + \sum_{g=0}^{k-4-i-j-m-l} R_{13}^{l+g} R_{23}^{k-4-i-j-m-l-g} \right) \right\}$$

При $R_{nd} = R$, применяя соотношения [16], нетрудно убедиться в том, что данные соотношения совпадают:

$$p(k, 3, 2) = p(k, 2, 3) = (1 - R)^4 R^{k-4} \left\{ 3 \binom{k-1}{3} - 2 \binom{k-2}{2} \frac{1+R}{1-R} \left(1 + \frac{R^{k-2}}{2} \right) + (k-2) \frac{R(1+2R)(1-R^{k-3})}{(1-R)^2} \right\}$$

Таким образом, имеет место пространственно-временная симметрия процесса информационного переноса однородного потока пакетов в статистически однородном тракте передачи данных, заключающаяся в инвариантности вероятностно-временных характеристик процесса доставки мультипакетных сообщений в многозвенных виртуальных каналах к взаимно симметричным значениям N и D . Найдем среднее время $\bar{N}(S, N, D)$ доставки сообщения до адресата, выраженное в длительностях T , за время S при условии получения его удаленным абонентом:

$$\bar{N}(S, N, D) = \frac{\bar{n}(S, N, D)}{\sum_{k=N+D-1}^S p(k, N, D)}, \bar{n}(S, N, D) = \sum_{k=N+D-1}^S kp(k, N, D).$$

Для наборов значений размера сообщения и длины тракта передачи данных $N=D=2$; $N=3, D=2$ и $N=2, D=3$, отсюда получаем:

$$\begin{aligned} \bar{n}(S, 2, 2) &= \frac{1-R^{S-2}}{1-R^2} \left[3+4R - (3-2R^2)R^S \right] - (S-2)R^{S-2} \left[S(1-R)(1+S(1-R)) + (1+R)^2 R^S \right], \\ \bar{n}(S, 3, 2) = \bar{n}(S, 2, 3) &= \frac{1-R^{S-3}}{1-R} \left[4 + \frac{2R}{1+R} - \frac{R^2}{(1+R)^3} - R^{S-1} \frac{12+16R-10R^2-18R^3+3R^4+6R^5}{(1+R)^3} \right] - \\ &(S-3)(1-R)^3 R^{S-3} \left[\frac{(S-3)^3}{2} + 4(S-3)^2 + (S-3) \frac{21-38R+23R^2}{2(1-R)^2} + \frac{11-20R+29R^2-14R^3}{(1-R)^3} \right] + \\ &(S-3)(1-R)^2 R^{2S-4} \left[\frac{(S-3)^2}{2} + (S-3) \frac{9+4R-4R^2}{2(1-R^2)} + \frac{26+24R-19R^2-16R^3+3R^4}{2(1-R^2)^2} \right] \end{aligned}$$

Для тайм-аута минимальной длительности $S=D+N-1$ среднее условное время доведения сообщения до адресата совпадает с длительностью тайм-аута. При $S = \infty$ среднее время доставки сообщения принимает вид

$$\bar{N}(\infty, 2, 2) = \frac{3}{1-R} + \frac{R}{1-R^2}; \bar{N}(\infty, 3, 2) = \bar{N}(\infty, 2, 3) = \frac{4}{1-R} + \frac{R}{1-R^2} \left[2 - \frac{R}{(1+R)^2} \right].$$

Таким образом, в случае неограниченной длительности тайм-аута среднее время доведения сообщения до адресата определяется суммой средних задержек пакетов в детерминированном конвейере [11] при времени передачи в каждой фазе, равной средней задержке пакета в отдельном звене $1/(1-R)$, и величины, пропорциональной интенсивности искажений: $R / (1 - R^2)$.

Анализ сквозных операционных показателей передачи сообщения. Время протокольного цикла передачи сквозной передачи состоит из времени доведения сообщения удаленному абоненту и времени получения квитанции источником информации. Поскольку при неполучении квитанции за время тайм-аута S отправитель передает сообщение повторно, а число повторных передач не ограничено, то средняя сквозная задержка, выраженная в количестве интервалов длительности T , составит:

$$\bar{T}(N, D, S) = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ (i-1)S + \bar{S}(S, N, D) \right\} \left[1 - F(S, N, D) \right]^{i-1} F(S, N, D), \quad \text{где}$$

$$F(S, N, D) = \sum_{k=N+2D-1}^S \sum_{i=N+D-1}^{k-D} p(i, N, D) p(k-i, 1, D),$$

$$\bar{S}(S, N, D) = \frac{\bar{s}(S, N, D)}{F(S, N, D)}, \quad \bar{s}(S, N, D) = \sum_{k=N+2D-1}^S k \sum_{i=N+D-1}^{k-D} p(i, N, D) p(k-i, 1, D).$$

При минимальной длительности тайм-аута $S_M = N + 2D - 1$ средняя сквозная задержка определяется выражением $\bar{T}(N, D, S_M) = \frac{N + 2D - 1}{(1-R)^{DN+D}}$.

При неограниченном росте S задержка совпадает с условным средним ожидания квитанции и приводит к соотношениям

$$\bar{T}(2,2,\infty) = \frac{5}{1-R} + \frac{R}{1-R^2}; \bar{T}(3,2,\infty) = \frac{6}{1-R} + \frac{2R}{1-R^2} - \frac{R^2}{(1-R^2)(1-R)^2};$$

$$\bar{T}(2,3,\infty) = \frac{7}{1-R} + \frac{2R}{1-R^2} - \frac{R^2}{(1-R^2)(1-R)^2};$$

Первое слагаемое в этих выражениях определяет задержку в детерминированном конвейере мультипакетного сообщения и сквозной ответной квитанции при времени передачи в отдельной фазе, равном $1/(1-R)$ и соответствующем среднему времени передачи пакета в отдельном межузловом соединении. Вклад остальных слагаемых пропорционален R и R^2 , и для реальных уровней искажений в высококачественных каналах связи ими можно пренебречь. Численные исследования показывают, что при трехкратном превышении S над минимальной длительностью тайм-аута S_M и $R \leq 0,5$ значения сквозной задержки практически совпадают с $\bar{T}(N,D,\infty)$. Отсюда следует, что для практических расчетов при $S \geq 3S_M$

и низком уровне искажений R в качестве среднего времени передачи мультипакетного сообщения в многозвенном тракте можно использовать аналитическое выражение для задержки в детерминированном конвейере с временем передачи в отдельной фазе, равной средней задержке пакета в отдельном звене: $\bar{T}(N,D,\infty) = \frac{N+2D-1}{1-R}$.

Заключение. В работе построена стохастическая модель процесса передачи мультипакетного абонентского сообщения в многозвенном транспортном соединении, отличающаяся учетом конвейерного эффекта в тракте с искажениями на отдельных участках переприема. Предложенная модель позволяет анализировать влияние длительности тайм-аута на вероятностно-временные характеристики транспортного протокола. Обнаружено свойство пространственно-временной симметрии стохастического процесса информационного переноса однородного потока пакетов в статистически однородном тракте передачи данных, проявляющееся в инвариантности вероятностно-временных показателей доставки сообщений удаленному абоненту к взаимно симметричным значениям размера сообщения N и длины транспортного соединения D . Установлено, что основной вклад в предельное значение средней задержки сообщения в транспортном соединении с искажениями на отдельных участках переприема, соответствующее неограниченной длительности тайм-аута, вносит время передачи мультипакетного сообщения и получения ответной квитанции в детерминированном конвейере при времени передачи в отдельной фазе, равной средней задержке пакета. Вклад остальных составляющих в сквозную за-

держку пропорционален интенсивности пакетных искажений R , которыми для качественных каналов связи можно пренебречь. Показано, что при трехкратном превышении размера тайм-аута ожидания сквозной квитанции над минимальной длительностью S_m и низком уровне искажений в каналах связи транспортного соединения для практических расчетов в большинстве случаев можно использовать соотношение предельной задержки в стохастическом конвейере.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации № 1.511.2014/К.

Литература

1. Fall K., Stevens R. TCP/IP Illustrated. – Vol. 1: The Protocols (2nd Edition) // Addison-Wesley Professional Computing Series. – 2012. – P. 1017.
2. Богуславский Л.Б. Управление потоками в сетях ЭВМ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.
3. Calleari C., Giordano S., Pagano M., Pepe T. A survey of congestion control mechanisms in Linux TCP // Communications in Computer and Information Science: Distributed Computer and Communication Networks 17th International Conference, DCCN 2013, Moscow, Russia, October 7–10, 2013. Revised Selected Papers Vishnevsky V.; Kozyrev D.; Larionov A. (Eds.). – 2014. – P. 28–42.
4. Дунайцев Р. А., Кучерявый Е. А. Улучшенная и дополненная PFTK-модель для протокола TCP Reno // Электросвязь. – 2005. – № 3. – С. 27–31.
5. Bogoiavlenskaia O. Discrete Model of TCP Congestion Control Algorithm with Round Dependent Loss Rate // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. – 2015. – Vol. 9247 of the series Lecture Notes in Computer Science. – P. 190–197.
6. Giordano S., Pagano M., Russo F., Secchi R. Modeling TCP Startup Performance // Journal of Mathematical Sciences. – 2014. – Vol. 200, is. 4. – P. 424–431.
7. Kravets O.Ya. Mathematical Modeling of Parameterized TCP Protocol // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74, № 7. – P. 1218–1224.
8. Wang J., Wen J., Han Y. et al. Achieving high throughput and TCP Reno fairness in delay-based TCP over large networks // Frontiers of Computer Science. – 2014. – Vol. 8, is. 3. – P. 426–439.
9. Nikitinskiy M. A., Chalyy D. Ju. Performance analysis of trickles and TCP transport protocols under high-load network conditions // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. – Vol. 47, № 7. – P. 359–365.
10. Сущенко С. П. О влиянии блокировок буферной памяти на производительность многозвенного тракта передачи данных // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 7. – С. 66–79.
11. Сущенко С. П. Метод выбора рациональной длины пакета сети пакетной коммутации // АВТ. – 1984. – № 3. – С. 24–28.
12. Сущенко С. П. Параметрическая оптимизация сети пакетной коммутации // АВТ. – 1985. – № 2. – С. 43–49.
13. Сущенко С. П. Анализ сквозной задержки сообщения в многозвенном виртуальном канале // АВТ. – 1989. – № 3. – С. 52–64.
14. Сущенко С. П. Влияние длительности сквозного тайм-аута на задержку данных в виртуальном канале // АВТ. – 1991. – № 6. – С. 36–40.

15. Сущенко С. П. Анализ влияния длительности сквозного тайм-аута на операционные характеристики виртуального канала // АВТ. – 1995. – № 4. – С. 43–66.

16. Сущенко С. П. Аналитическая вычислимость сумм произведения показательных и степенных функций // Математическое моделирование и теория вероятностей: сб. науч. трудов ТГУ. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. – С. 253–256.

DOI: 10.17223/9785751124335/37

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ АБОНЕНТСКОГО ТРАФИКА НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРУЮЩЕГО СОЕДИНЕНИЯ

П. А. Михеев, С. П. Сущенко

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Введение. Важнейшими элементами компьютерных сетей являются подсети абонентского доступа, реализуемые с помощью звездообразных маршрутизируемых сетевых фрагментов и технологий построения проводных и беспроводных локальных сетей. Наиболее массовые технологии построения современных проводных локальных сетей (ЛВС) основаны на методе случайного множественного доступа к разделяемой множественным абонентам среде передачи данных [1]. Данный метод обеспечивает простую топологию сети, однако при высоких нагрузках и большом числе абонентов операционные характеристики сети катастрофически ухудшаются [2]. Для повышения реального быстродействия ЛВС используется метод логической структуризации сети, основанный на сегментировании ее с помощью технологии коммутируемого доступа [1]. Кроме повышения производительности ЛВС, логическая структуризация с помощью коммутаторов упрощает управление сетью, увеличивает ее гибкость и повышает безопасность работы с прикладными данными в различных сегментах сети. Техническая реализация коммутаторов допускает схемы построения на основе коммутационной матрицы, разделяемой многовходовой памяти, общей шины и композиции различных архитектур. Различают три режима коммутации протокольных блоков данных: коммутация с промежуточной (полной) буферизацией, сквозная коммутация с буферизацией заголовка кадра до адреса назначения (на лету) и гибридная сквозная коммутация с буферизацией всего заголовка и поля данных кадра минимально разрешенного стандартом размера, обеспечивающая возможность фильтрации конфликтов [1]. Характерно применение коммутационных устройств в качестве концентратора, аккумулирующего трафик от настольных систем к файл-серверам, серверам баз данных и серверам приложений. В задачах синтеза структуры и параметров локальных сетей передачи данных важнейшим является сбалансированный выбор быстродействия каналов к прикладным серверным системам общего назначения, числа абонентов, подключаемых к таким приложениям, и технических параметров комму-