

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДЕРЖЕК БЛОКОВ ДАННЫХ В МЕЖСЕТЕВЫХ УЗЛАХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Введение

В телекоммуникационной сети существенное влияние на эффективность передачи данных оказывают задержки пакетов в межсетевых коммуникационных устройствах. В процессе работы сети зачастую возникает проблема перегруженности сетевых коммутационных узлов. Причем причиной возникновения перегруженности может выступать как несоответствие скоростей работы различных устройств, так и несоответствие трафика между сетями. Эти факторы необходимо учитывать как при анализе функционирования существующих сетей, так и при проектировании новых. Актуальной задачей является разработка средств оценки времени задержки пакетов при передаче их через межсетевые соединения. Обычно решение данной задачи рассматривается как частный случай задачи управления потоками данных в сетях. В большинстве работ, посвященных рассмотрению данного вопроса, рассматриваются однородные вычислительные сети. Но управление потоком данных осуществляется одновременно на разных уровнях, как правило, на сетевом и транспортном. Неоднородность сетей, с которой приходится сталкиваться при установлении межсетевых соединений, требует уточнения моделей управления потоками данных в сетях.

Постановка задачи

Разработанный к настоящему времени математический аппарат теории расписаний и систем массового обслуживания позволяет с достаточной степенью адекватности моделировать временные параметры однородных вычислительных сетей. При анализе механизмов управления потоками данных в сетях широко применяются модели с очередями [1–3].

Рассмотрим проблему управления потоком данных из конца в конец для некоторого межсетевого соединения, проходящего через несколько разнородных сетей [4].

Решение

Предположим, что в рамках данного соединения осуществляется передача данных с использованием транспортного протокола с установлением соединения, например, ТСП, между абонентской станцией АС1, находящейся в локальной сети ЛВС1, и абонентской станцией АС2, находящейся в локальной сети ЛВС2 (рис. 1). Сеть ЛВС1 подключена к

некоторой частной глобальной сети ГВС1, использующей технологию ретрансляции кадров. Посредством шлюза данная сеть соединяется с публичной глобальной сетью ГВС2, работающей в соответствии с рекомендацией X.25. В сети X.25 организуется виртуальный канал, в рамках которого осуществляется управление потоком данных из конца в конец. Поток данных, принадлежащий соединению между абонентскими станциями АС1 и АС2, регулируется механизмом скользящего окна протокола ТСР в соответствии с [5]. Таким образом, можно говорить о наличии двух вложенных механизмов окна.

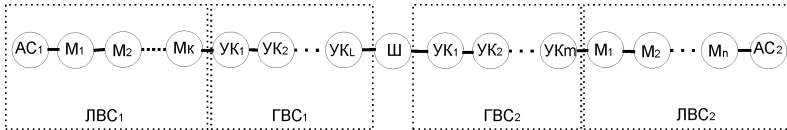


Рис. 1 – Передача данных с использованием транспортного протокола

Предполагая фиксированными межсетевые маршруты, данный фрагмент сети может быть представлен в виде множества вершин

$$S = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4,$$

где $S_1 = \bigcup_{i=1}^K s_i$ – участок соединения в ЛВС1;

$S_2 = \bigcup_{i=1}^L s_i$ – участок соединения в ГВС1;

$S_3 = \bigcup_{i=1}^M s_i$ – участок соединения в ГВС2;

$S_4 = \bigcup_{i=1}^N s_i$ – участок соединения в ЛВС2.

Абонентская система АС1 генерирует пакеты для абонентской системы АС2 согласно Пуассоновскому закону со средним значением интенсивности λ пакетов/с. Эти пакеты следуют через маршрутизаторы $M_i (i = \overline{1..K})$ сети ЛВС1 к узлу коммутации УК1 сети ГВС1. Далее они передаются по сети ГВС1 и ГВС2 с промежуточным хранением в узлах коммутации и достигают сети ЛВС2. При построении модели будем исходить из предположения о незначительности задержки передачи в локальной сети по сравнению с задержками в глобальных сетях. Таким образом, будем полагать, что рассматриваемое логическое соединение состоит из L каналов связи, находящихся в сети ГВС1, и M каналов связи в сети ГВС2. Каждый из этих каналов представляется как СМО и моделируется как FIFO очередь с экспоненциальным законом распределения времени обслуживания (рис. 2). Интенсивность обслуживания j -ой канальной очереди сети ГВС i для $i = 1, 2$ предполагается равной μ_{ij} пакетов/с.

Межсетевые пакеты, принадлежащие этому логическому соединению, передающиеся от источника к приемнику, будем называть вну-

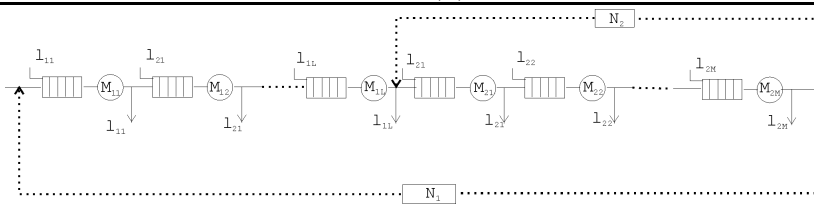


Рис. 2 – Очередь с экспоненциальным законом распределения времени обслуживания

тренними пакетами. В то же время нужно учитывать влияние пакетов, принадлежащих другим логическим соединениям, проходящим через те же узлы сети. Эти пакеты назовем внешними. Они также влияют на время задержки передачи для рассматриваемого логического соединения, так как совместно используют ресурсы узлов коммутации. Это можно рассматривать как взаимное влияние потоков. Полагаем, что появление внешних пакетов в очереди j -того узла i -той сети также имеет Пуассоновское распределение со средним значением λ_{ij} пакетов/с, независимое от поступления внутренних пакетов. Для того, чтобы учесть взаимное влияние потоков, полагаем, что любая канальная очередь обслуживает поток как внутренних, так и внешних пакетов, причем интенсивность обслуживания внешних пакетов соответствует интенсивности их поступления и равняется λ_{ij} , а интенсивность обслуживания внутренних пакетов равняется $\mu_{ij} - \lambda_{ij}$.

Как только пакет прибывает в место назначения, генерируется пакет подтверждения, который посылается источнику по обратному маршруту. Для адекватного представления механизма управления потоком из конца в конец сети X.25, вводится элемент N_2 , осуществляющий блокировку пакетов при заполнении окна в виртуальном канале. Аналогично для представления механизма скользящего окна протокола TCP вводится элемент N_1 .

Рассматриваемое логическое соединение может быть промоделировано с помощью сети массового обслуживания (СМО) без петель с потерями заявок. Учитывая сложность нахождения формального решения для полученной СМО, предлагается произвести приближенный анализ с применением метода эквивалентности Нортон. В соответствии с теоремой Нортон основным шагом эквивалентных преобразований является замещение сети одной СМО. Для анализа сети в изолированном состоянии, т.е. игнорируя ее взаимодействие с другими очередями, используется замкнутая модель сети. С целью согласования потока данных через составную сеть интенсивность обслуживания составной очереди устанавливается равной пропускной способности, полученной вдоль цепи обратной связи для каждого участка сети. Таким образом, интенсивность обслуживания составной очереди зависит от состояния (в зависимости от длины очереди составной очереди). После замещения сети составной очередью

результатирующая эквивалентная сеть анализируется для получения решения по целой сети.

Полагаем, что составная очередь имеет дисциплину обслуживания FIFO и экспоненциальное распределение времени обслуживания, одинаковое для всех типов пакетов в очереди. Поэтому применим иерархическую методику замещения Нортона к этой модели в два этапа. На первом этапе виртуальный канал сети ГВС2 замещается одной составной очередью с зависящим от состояния экспоненциальным распределением интенсивности обслуживания. На втором этапе эквивалентная сеть, результат первого этапа, снова заменяется очередью. Результатирующая модель имеет один поток внутренних пакетов и $L + M$ потоков внешних пакетов. На каждом этапе метод Нортона частично применяется только к потоку внутренних пакетов. Размер совокупности внутренних пакетов принимается меньшим, чем соответствующий размер окна.

Модель, построенная на первом этапе, - это смешанная сеть массового обслуживания с одним замкнутым потоком внутренних пакетов и M открытыми потоками внешних пакетов [6]. Модель, построенная на втором этапе, также является смешанной сетью массового обслуживания с одним закрытым потоком внутренних пакетов и L открытыми потоками внешних пакетов.

Пусть m_i будет числом внешних пакетов i -й очереди. Обозначим X_i относительное использование внутренние пакетами i -й очереди, которое является не единственной константой, пропорциональной $1/\mu_j$, и $\rho_i = \lambda 2i/\mu 2i$ абсолютное использование внешним пакетами очереди i для i от 1 до L .

Тогда стационарное распределение вероятности состояний представляется в виде [7]:

$$P(S) = \frac{1}{G(n)} \prod_{i=1}^L \frac{(ni + mi)!}{ni!mi!} X_i^{ni} \rho_i^{mi} (1 - \rho_i), \tag{1}$$

где

$$G(n) = \sum_{S \in \Omega(n)} \prod_{i=1}^L (X_i / (1 - \rho_i))^{n_i} \tag{2}$$

где $X_i / (1 - \rho_i)$ представляет собой эффективное относительное использование внутренние пакетов в очереди i .

Расчет коэффициентов $G(n)$ может быть произведен по алгоритму свертки Бузена, приведенному в работе [8]. В таком случае $G(n)$ вычисляется с использованием вспомогательной функции:

$$G(n) = g(n, L)$$

Причем:

$$g(n, l) = g(n, l - 1) + X_l \cdot g(n - 1, l), \tag{3}$$

где $g(n, 1) = X_1^n \forall n = \overline{0..N}$, $g(0, l) = 1 \forall l = \overline{0..L}$.

Из вероятности распределения уравнения (2) можно получить граничные вероятности:

$$P(n_i = k) = \frac{X^k}{G(n)(1 - p_i)} (G(n - k) - X_i G(n - k - 1)) \quad (4)$$

и

$$P(mi = l) = \sum_{k=0}^n \frac{(k+l)!}{k!l!} \rho_i^l (1 - \rho_i)^{k+1} P(ni = k). \quad (5)$$

Тогда ожидаемое число внутренних пакетов в очереди i получается из:

$$E(n_i) = \sum_{k=1}^n X_i^{*k} \frac{G(n - k)}{G(n)} \quad (6)$$

и ожидаемое число внешних пакетов в очереди i определяется функцией $E(ni)$:

$$E(m_i) = \frac{\rho_i}{(1 - \rho_i)} [1 + E(n_i)] \quad (7)$$

В работе [9] показано, что влияние внутренних пакетов на ожидаемое число внешних пакетов увеличивает его в $1 + E(ni)$ раз. Будем считать, что пропускная способность внешних пакетов в очереди i соответствует коэффициенту λ_i , – интенсивности поступления внешних пакетов. Тем не менее, пропускная способность внутренних пакетов одна и та же в каждой очереди, и получается из:

$$\gamma_2(n) = \mu_{2i} X_i \frac{G(n - 1)}{G(n)} \quad (8)$$

Таким образом, вычисление этих значений завершит анализ для каждой внутренней модели. Так как алгоритм требует значение $G(n - i)$ для вычисления $G(n)$, вычисление $G(Ni)$ порождает целый ряд значений $G(1), G(2), \dots, G(Ni)$ для $i = 1, 2$. Поэтому вспомогательные функции $g(n, m)$ заданные уравнениями (2) и (3), предпочтительнее вычислять с помощью алгоритма свертки Бузена.

Используя формулу Литтла и формулу для ожидаемого числа внутренних пакетов, можно получить ожидаемое значение полной задержки в системе без потерь:

$$E(D) = \frac{1}{\lambda} \cdot \left[\sum_{n=1}^{N_1-1} \frac{n\lambda^n}{\prod_{j=1}^n \gamma_1(j)} + \frac{\lambda^{N_1} \{ \lambda + N_1 [\gamma_1(N_1) - \lambda] \}}{[\gamma_1(N_1) - \lambda]^2 \prod_{j=1}^{N_1-1} \gamma_1(j)} \right] p_0 \quad (9)$$

Производительность системы без потерь равна введенному коэффициенту λ , так как нет потерь. Полная задержка D состоит из четырех компо-

нент $D_u, D_1, DguD2$, которые показывают задержки в пользовательском буфере ввода, первой сети, шлюзе и второй сети соответственно. Сетевые задержки D_1 и D_2 в действительности подразумевают задержку прохождения первой и второй сети. Однако задержка прохождения системы соединения D_t является суммой $D_1, DguD2$. Задержка в пользовательском буфере ввода может быть получена также на основании формулы Литтла:

$$E(D_u) = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\lambda^{N_1+1} p_0}{[\gamma_1(N_1) - \lambda]^2 \prod_{j=1}^{N_1-1} \gamma_1(j)} \quad (10)$$

Ожидаемая задержка прохождения $E(D_t)$, определенная [10] как средняя задержка для внутренних пакетов, вошедших в объединенные сети, получится вычитанием $E(D_u)$ из $E(D)$.

В свою очередь, задержка прохождения может быть прямо получена как:

$$E(D_t) = \frac{1}{\lambda} \left[\sum_{n=1}^{N_1-1} np_n + N_1 P_H \right], \quad (11)$$

где выражение в квадратных скобках представляет ожидаемое число внутренних пакетов в соединенных сетях.

Зная число внутренних пакетов в шлюзе, мы имеем:

$$E(D_g) = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\sum_{n=N_2+1}^{N_1-N_2} \left[\sum_{i=1}^{n-N_2} iP(n_{K+1} = N_2 + i) \right] p_n + \sum_{i=1}^{N_1-N_2} iP(n_{K+1} = N_2 + i) P_H \right), \quad (12)$$

где P_H – вероятность задержки в пользовательском буфере ввода.

Подобным образом получается и задержка передачи для сети 2:

$$E(D_2) = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\sum_{n=1}^{N_2-1} \left[\sum_{i=1}^n iP(n_{K+1} = i) \right] p_n + \sum_{n=N_2}^{N_1-1} \left[\sum_{i=1}^{N_2-1} iP(n_{K+1} = i) + N_2 \sum_{i=N_2}^n P(n_{K+1} = i) \right] p_n + \left[\sum_{i=1}^{N_2-1} iP(n_{K+1} = i) + N_2 \sum_{i=N_2}^{N_1} P(n_{K+1} = i) \right] P_H \right) \quad (13)$$

Внешняя модель системы с потерями, которая применяется нами для моделирования сети FR, есть M/M/1/N1 очередь с коэффициентом обслуживания, зависящим от состояния:

$$\mu_1^{(c)}(n) = \gamma_1(n), n \leq N_1 \quad (14)$$

где n показывает число внутренних пакетов во внешней модели.

На основании формулы Литтла ожидаемую полную задержку можно представить в виде:

$$E(D) = \frac{\sum_{n=1}^{N_1} \frac{n\lambda^{n-1}}{K(n)}}{1 + \sum_{n=1}^{N_1-1} \frac{\lambda^n}{K(n)}}, \quad (15)$$

где $K(n)$ – нормирующий коэффициент, который определяется по формуле:

$$K(n) = \prod_{i=1}^n \mu_{ij} X_j \frac{G(i-1)}{G(i)} \quad (16)$$

Вывод

Таким образом, предложенные математические модели стохастических процессов происходящих в телекоммуникационной сети позволяют определить временные задержки в коммутационных устройствах, а именно: мостах, шлюзах и маршрутизаторах.

Литература

1. Min, J Flow and congestion control of interconnected networks PhD dissertation, Polytechnic University, Brooklyn, NY (January 1991)
2. Chandy, K M and Sauer, C H 'Approximate methods for analyzing queueing network models of computing systems', Comput. Surv., Vol 10 No 3 (September 1978) pp 281-317
3. Fdida, S. Perros, H G and Wilk, A 'Semaphore queues: Modeling multi-layered window flow control mechanisms', IEEE Trans. Comimm., Vol 38 No 3 (March 1990) pp 309-317
4. Кулаков Ю.А., Левицкий Ю.Н. Анализ временных характеристик неоднородных вычислительных сетей // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМС НАН України. - Київ. - 2003. Вип.. 21. – С.93-101.
5. Clark D. D. Window and Acknowledgement Strategy in TCP// RFC 813 MIT Laboratory for Computer Science, Computer Systems and Communications Grup, 1982. -22p.
6. JeongKy Min. Perfomance of end-to-end flow control in LAN/WAN interconnection // Computer communications, vol. 17, 5, 1994. – pp.348-362.
7. Buzen, J P 'Computational algorithm for closed queueing networks with exponential servers', Commun. ACM. Vol 16 (September 1973) pp 527-531.
8. Шварц М. Сети связи: Протоколы, моделирование и анализ: в 2-х ч. Ч. II: Пер. с англ. –М.: Наука, 1992. –272 с.

9. Кулаков Ю.О., Левицький Ю.М., Абу Ара Махмуд Малик. Підвищення ефективності обробки інформації в комутаційних вузлах глобальних мереж // Наукові вісти НТУУ ”КПІ”. - Київ, 1999. - 2. - С.56-61.
10. Клейнрок Л. Коммуникационные сети: стохастические потоки и задержки сообщений: пер. с англ./ под ред. А.А. Первозванского. –М.: Наука. 1970. -256с.

Отримано 17.03.2009 р.