

УДК 621.39

Метод расчета емкости буферных устройств коммутационного оборудования в пакетных сетях передачи данных

Д.А. БЛУДОВ¹, П.С. ВИХЛЯНЦЕВ¹, канд. техн. наук, А.Н. НАЗАРОВ², д-р техн. наук,
М.В. СИМОНОВ¹, канд. техн. наук

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦентрИнформ», г. Санкт-Петербург

²ООО «СмартТек», г. Москва

E-mail: a.nazarov06@bk.ru

Предложен метод расчета емкости выходных буферных устройств коммутационного оборудования пакетных сетей. Метод может быть использован для расчета сетей как с пакетами фиксированного объема, так и с пакетами со случайным объемом, подчиняющимся экспоненциальному распределению.

Ключевые слова: сеть Internet, коммутационное оборудование, буферизация, буфер, блокировка, вероятность, пакет, емкость, коммутатор, пуассоновский поток, среднее значение, дисперсия, алгоритм, стохастическая модель, преобразование Лапласа—Стилтьеса, плотность распределения, вероятностно-временные характеристики, очередь.

The capacity calculation method of output buffer devices of switching equipment of the packet networks has been offered. The method can be used to calculate networks with packets both a fixed volume and a random volume, that are subjected to the exponential distribution.

Keywords: Internet, switching equipment, buffering, buffer, lock, probability, package, capacity, switch, Poisson flow, average value, dispersion, algorithm, stochastic model, transformation, Laplace—Stiltes, distribution density, probability-time characteristic, queue.

Введение

Возрастающая популярность сети общего пользования Internet и корпоративных сетей Intranet привела к значительному росту сетевого трафика. За счет широко практикуемого доступа пользователей к удаленным ресурсам и серверам потоки данных становятся все менее локальными, а коммутация пакетов стала одной из самых популярных телекоммуникационных технологий.

Коммутация в сети Internet реализуется в виде пространственной коммутации, условно называемой классической, и временной коммутации, которая выполняется путем организации очередей из пакетов данных.

В коммутационном устройстве может быть реализован один из трех вариантов размещения и организации буферных устройств [1, 2]:

- входная буферизация;
- выходная буферизация;
- внутренняя буферизация (центральная или промежуточная).

Известно [1], что при входной буферизации, работающей по принципу «первым пришел — первым обслужен», пропускная способность коммутатора из-за блокировок в голове очереди может быть реализована только на 58%. С целью повышения пропускающей способности используют запоминающие устройства с произвольной выборкой в голове очереди. Практическая реализация такого

устройства требует значительного усложнения контроллера. Альтернативным вариантом является увеличение скорости работы коммутационной матрицы [1].

Внутренняя буферизация хорошо известна по ранним баньяновым коммутаторам [1, 2], но они отличаются плохими характеристиками по задержке и производительности и сложным управлением внутренними перегрузками.

По лучшим характеристикам (по задержке и производительности) выходная буферизация считается предпочтительной для всех распределений трафика [1].

Постановка задачи

Будем полагать, что обмен в сети осуществляется в форме пакетов, а суммарный поток, поступающий на выходной порт коммутационного оборудования, является пуассоновским потоком $A(t)$ с интенсивностью λ :

$$A(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \lambda > 0. \quad (1)$$

Длительность передачи пакета является случайной величиной (сл.в.) с функцией распределения (ф.р.) $B(t)$.

Обработка пакетов осуществляется в порядке их поступления. Количество мест ожидания в выходном буфере считаем неограниченным (система с неограниченной очередью). Требуется получить аналитические соотношения для среднего значения и дисперсии числа пакетов в выходном буфере.

Общее решение

Упрощенная стохастическая модель пребывания пакета в выходном порту коммутационного оборудования представлена на рис. 1.

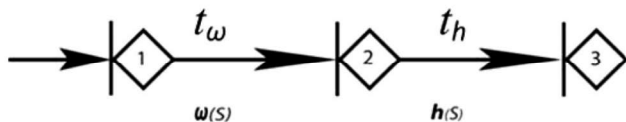


Рис. 1. Стохастическая модель пребывания пакета в выходном порту коммутационного оборудования, $\omega(s)$ и $h(s)$ — преобразование Лапласа—Стилтьеса (Л.—С.) функции распределения времени ожидания t_ω и времени передачи пакета t_h (стрелки указывают последовательность фаз обработки пакетов, пронумерованных от 1 до 3)

В процедуру обработки пакета в выходном порту входят два последовательных случайных процесса, соответственно характеризующиеся сл.в. времени ожидания t_ω и сл.в. времени передачи пакета t_h .

В силу аддитивности этих процессов случайная величина времени пребывания пакета в выходном порту равна $t_v = t_\omega + t_h$, а эквивалентная Q -функция имеет вид [4]:

$$Q(s) = v(s) = \omega(s)h(s),$$

где $v(s)$ — преобразование Лапласа—Стилтьеса (Л.—С.) ф.р. времени пребывания пакета в выходном порту; $\omega(s)$ и $h(s)$ — преобразования Л.—С. функции распределения времени ожидания t_ω и времени передачи пакета t_h .

Средние значения сл.в. t_v , t_ω и t_h представляют из себя их первые моменты $T_v = v_1$,

$$T_\omega = \omega_1, T_h = h_1. \text{ При этом } v_1 = -\frac{d}{ds} \left[\frac{v_1(s)}{v_1(0)} \right]_{s=0} = \omega_1 + h_1, \quad \omega_1 = -\frac{d}{ds} \left[\frac{\omega(s)}{\omega(0)} \right]_{s=0}, \quad h_1 = -\frac{d}{ds} \times \left[\frac{h(s)}{h(0)} \right]_{s=0}.$$

Дисперсия времени обслуживания $D[t_v] = D[t_\omega] + D[t_h]$ может быть выражена через первые и вторые моменты: $D[t_v] = \omega_2 - \omega_1^2 + h_2 - h_1^2$.

При принятом ограничении (1) на характер входящего потока при произвольном характере ф.р. длительности передачи пакета соотношение для преобразования Л.—С. ф.р. времени ожидания имеет вид [5]:

$$\omega(s) = \frac{s(1-\lambda h_1)}{s - \lambda[1-h(s)]}. \quad (2)$$

С учетом (2) выражения для средних значений и дисперсии сл.в. времени ожидания t_ω и времени пребывания пакета в выходном порту t_v примут вид:

$$T_\omega = \frac{\lambda h_2}{2(1-\lambda h_1)},$$

$$T_v = \frac{\lambda h_2}{2(1-\lambda h_1)} + h_1,$$

$$\omega_2 = \frac{\lambda h_2}{3(1-\lambda h_1)} + \frac{\lambda^2 h_2^2}{2(1-\lambda h_1)^2},$$

$$D[t_\omega] = \frac{\lambda h_3}{3(1-\lambda h_1)} + \frac{\lambda^2 h_2^2}{4(1-\lambda h_1)^2},$$

$$D[t_v] = \frac{\lambda h_3}{3(1-\lambda h_1)} + \frac{\lambda^2 h_2^2}{4(1-\lambda h_1)^2} + h_2 - h_1^2.$$

Для удельной нагрузки $\lambda h_1 < 1$ при пуассоновском потоке сообщений и дисциплины обслуживания «первым пришел — первым обслужен» первый и второй начальные моменты и количество пакетов в выходном буфере могут быть выражены следующим образом [6]:

$$q_1 = \lambda h_1 + \frac{\lambda^2 h_2}{2(1-\lambda h_1)}; \quad (3)$$

$$q_2 = \frac{\lambda^3 h_3}{3(1-\lambda h_1)} + \lambda^2 h_2 + \lambda h_1 \left[1 + \frac{\lambda^2 h_2}{1-\lambda h_1} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\lambda^2 h_2}{1-\lambda h_1} \right]^2 + \frac{\lambda^2 h_2}{2(1-\lambda h_1)}. \quad (4)$$

Дисперсия числа пакетов равна:

$$D[q] = \frac{\lambda^3 h_3}{3(1-\lambda h_1)} + \left(\frac{\lambda^2 h_2}{2(1-\lambda h_1)} \right)^2 + \lambda h_1 (1-\lambda h_1) + \frac{\lambda^2 h_2 (3-2\lambda h_1)}{2(1-\lambda h_1)}. \quad (5)$$

Следует отметить, что соотношения для первого и второго начальных моментов v_1 и v_2 и дисперсии $D[t_v]$ времени пребывания пакетов в выходном буфере коммутационного устройства, а также для первого и второго начального моментов q_1 и q_2 и дисперсии числа пакетов получены при условиях пуассоновского входящего потока пакетов и произвольном законе сл.в. времени передачи пакета $B(t)$.

Если предположить, что сл.в. времени передачи пакета t_h подчиняется гамма-распределению с плотностью

$$b(t) = \frac{\mu(\mu t)^{r_\beta-1} \exp(-\mu t)}{\Gamma(r_\beta)}, \quad T_\beta = \frac{r_\beta}{\mu},$$

где r_β и $1/\mu$ — параметры формы и масштаба; $\Gamma(r_\beta)$ — гамма-функция.

В этом случае первые три момента длительности передачи пакета

$$h_1 = T_\beta, \quad h_2 = h_1^2(1+1/r_\beta),$$

$$h_3 = h_1^3(1+1/r_\beta)(1+2/r_\beta).$$

При экспоненциальном виде распределения ф.р. $B(t)$ параметр $r_\beta = 1$, а при регулярном $r_\beta \rightarrow \infty$.

Таким образом, получены аналитические соотношения для времени пребывания пакета в очереди и количества пакетов в выходном буфере при пуассоновском процессе поступления пакетов в выходной буфер коммутационного оборудования при общих предположениях о ф.р. времени обслуживания (передачи) пакета из выходного буфера.

Анализ частных решений

Рассмотрим частные случаи работы коммутационного устройства при фиксированной (детерминированной) длине пакета и длине пакета, распределенной по экспоненциальному закону.

Детерминированная длина пакета

Время передачи пакета при $r_\beta \rightarrow \infty$ можно считать постоянным, тогда:

$$T_h = L/B; \quad h_2 = T_h^2; \quad h_3 = T_h^3, \quad (6)$$

где L — длина пакета в битах; B — битовая скорость передачи.

С учетом (6) при удельной нагрузке $\rho = \lambda h_1$ соотношения (3), (4) и (5) можно представить в виде:

$$q_1^{(D)} = \rho + \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}, \quad (7)$$

$$q_2^{(D)} = \frac{\rho^3}{3(1-\rho)} + \rho^2 + \rho \left(1 + \frac{\rho^2}{1-\rho} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho^2}{1-\rho} \right)^2 + \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}, \quad (8)$$

$$D[q^{(D)}] = \frac{\rho^3}{3(1-\rho)} + \left(\frac{\rho^2}{2(1-\rho)} \right)^2 + \rho(1-\rho) + \frac{\rho^2(3-2\rho)}{2(1-\rho)}, \quad (9)$$

где индекс D означает, что соотношения получены при детерминированной длине пакета.

Сравним полученные результаты с временными показателями устройства коммутации

при моделировании случайного процесса поступления пакетов равномерным распределением Бернулли.

Предположим, что пакеты имеют одинаковую длину, а моменты поступления пакетов по разным каналам синхронизированы. Это означает, что вся временная ось разбита на сегменты, длительности которых равны времени передачи пакета.

Пакеты поступают на N входов коммутационного оборудования в виде независимых испытаний Бернулли с параметром P и равномерно распределяются по K выходным буферам. В [3] получены аналитические выражения для первого, второго моментов и дисперсии количества пакетов в выходном буфере в стационарном режиме:

$$q_1 = P'(1) + \frac{P''(1)}{2(1-P'(1))}, \quad (10)$$

$$q_2 = \frac{P'''(1)}{3(1-P'(1))} + P''(1) + P'(1) \left(1 + \frac{P''(1)}{1-P'(1)} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{P''(1)}{1-P'(1)} \right)^2 + \frac{P''(1)}{2(1-P'(1))}, \quad (11)$$

$$D[q] = \frac{P'''(1)}{3(1-P'(1))} + \frac{1}{4} \left(\frac{P''(1)}{1-P'(1)} \right)^2 + P''(1)(1-P'(1)) + \frac{P''(1)(3-2P'(1))}{2(1-P'(1))}, \quad (12)$$

где $P'(1) = \frac{N}{K} P$, $P''(1) = \frac{N(N-1)}{K^2} P^2$, $P'''(1) = \frac{N(N-1)(N-2)}{K^3} P^3$.

Заметим, что соотношения для первого, второго моментов числа пакетов (10), (11) и дисперсии количества пакетов (12), полученные при моделировании процесса поступления пакетов в виде независимых испытаний Бернулли, практически совпадают с соотношениями (7)–(9), полученными для пуассоновского входящего потока.

Это дает основание полагать, что моделирование поступления пакетов детерминированной длины на N входов в виде независи-

мых испытаний Бернулли и их равновероятного распределения по K выходным портам можно считать вполне допустимым при $K > N$.

Длина пакета, распределенная по экспоненциальному закону

При $r_B = 1$ длительность обслуживания пакетов является сл.в. с экспоненциальной ф.р. $B(t) = 1 - e^{-\mu t}$, μ — интенсивность обслуживания пакетов, $\mu > 0$.

Первые три момента сл.в. времени обслуживания t_h равны:

$$h_1 = 1/\mu; h_2 = 2/\mu^2; h_3 = 6/\mu^3.$$

Среднее число пакетов и дисперсия числа пакетов в выходном порту коммутатора соответственно равны:

$$q_1^{(\Theta)} = \rho + \frac{\rho^2}{1-\rho}, \quad (13)$$

$$D[q^{(\Theta)}] = 2 \frac{\rho^3}{1-\rho} + \frac{1}{4} \left[\frac{2\rho^2}{1-\rho} \right]^2 + \rho(1-\rho) + \frac{\rho^2(3-2\rho)}{1-\rho}, \quad (14)$$

где индексом «Э» обозначено экспоненциальное распределение.

Расчет емкости выходного буфера

В IP-сетях длина передаваемых пакетов варьирует в зависимости от вида предоставляемых услуг. Так, для передачи телефонного трафика используются пакеты минимальной длины (с целью сокращения времени и джиттера задержки), для передачи файлов — пакеты максимальной длины, а для пакетов видеоприложений и данных — промежуточного значения длины [7].

В [7] предложен метод оценки R видов пакетов с помощью вероятностной смеси с распределением $B(t)$:

$$B(t) = \sum_{r=1}^R \frac{\lambda_r}{\lambda_R} B_r(t),$$

где λ_r/λ_R — удельная доля от нагрузки с распределением $B_r(t)$, $r = \overline{1, R}$.

К сожалению, такое распределение не является постоянным. Для практических расче-

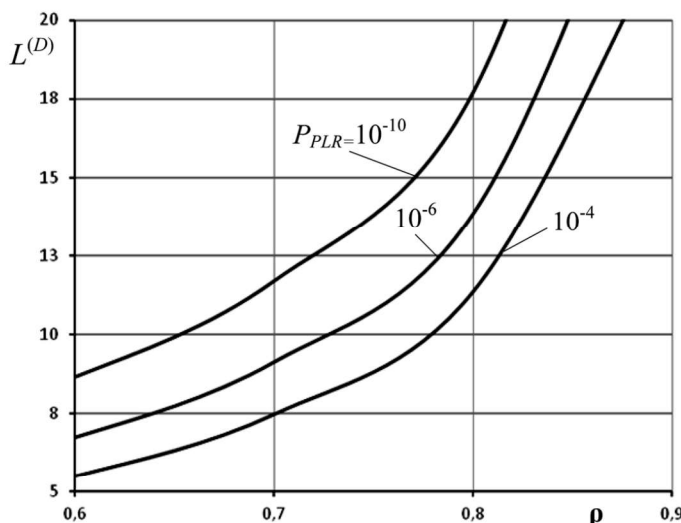


Рис. 2. Зависимость емкости выходного буфера $L^{(D)}$ от удельной нагрузки ρ при заданном значении вероятности потерь пакета P_{PLR}

тов достаточно получить нижнюю и верхнюю границы оценки параметров, задаваясь соответственно детерминированным и экспоненциальным временами обслуживания.

Известно, что при малых величинах потерь пакетов емкость выходного буфера практически не влияет на показатели функционирования узла коммутации. Поэтому расчетные соотношения для выходного буфера с бесконечной очередью (узел коммутации без потерь) можно применить к узлу коммутации с конечным объемом буфера. Погрешность расчетов при этом составит порядка десятых долей процента с асимптотическим уменьшением при увеличении буфера и уменьшении величины потерь пакетов [7].

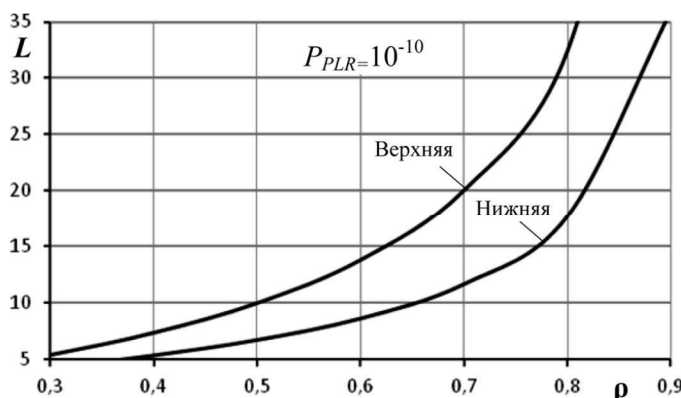


Рис. 3. Графики нижней и верхней оценок емкости выходного буфера в зависимости от удельной нагрузки ρ при заданном значении вероятности потерь пакета $P_{PLR} = 10^{-10}$

При заданном значении вероятности потерь P_{PLR} и соответствующем ей значении параметра u емкость выходного буфера рассчитывается по выражению [8]:

$$L = q_1 + u\sigma[q],$$

где $\sigma[q] = \sqrt{D[q]}$.

При постоянном (детерминированном) времени передачи пакета емкость буферного устройства (нижняя граница) равна:

$$L^{(D)} = q_1^{(D)} + u\sqrt{D[q^{(D)}]},$$

где среднее значение числа пакетов $q_1^{(D)}$ и дисперсия $D[q^{(D)}]$ рассчитываются по (7) и (9) соответственно.

На рис. 2 представлены кривые зависимости емкости выходного буфера $L^{(D)}$ от удельной нагрузки ρ при $P_{PLR} = 10^{-10}$; 10^{-6} и 10^{-4} и соответствующих им значениях $u = 6,361$; $4,753$ и $3,719$.

Так, при удельной нагрузке $\rho = 0,8$ емкость выходного буфера составляет 18 пакетов при вероятности потерь 10^{-10} . Повышение вероятности потерь на четыре порядка позволит снизить емкость буфера на четыре пакета.

Верхняя граница емкости выходного буфера имеет место при экспоненциальном распределении длительности передачи пакета и может быть рассчитана по формуле:

$$L^{(\infty)} = q_1^{(\infty)} + u\sqrt{D[q^{(\infty)}]},$$

где $q_1^{(\infty)}$ и $D[q^{(\infty)}]$ вычисляются по (13) и (14) соответственно.

На рис. 3 показаны нижняя и верхняя оценка емкости выходного буфера при $P_{PLR} = 10^{-10}$.

Оценка выигрыша при организации общего буфера

Суммарная емкость при организации общего буфера при вероятности потерь $P_{PLR} = 10^{-10}$ для K выходных буферов может быть рассчитана по выражению $L_{\Sigma} = K(q_1 + u\sigma[q])$, а организация общего буфера $L_{\text{общ}} = q_{\text{общ}} + u\sqrt{D[q_{\text{общ}}]}$, где $q_{\text{общ}} = Kq_1$; $D[q_{\text{общ}}] = KD[q]$.

Тогда выигрыш при организации общего буфера равен

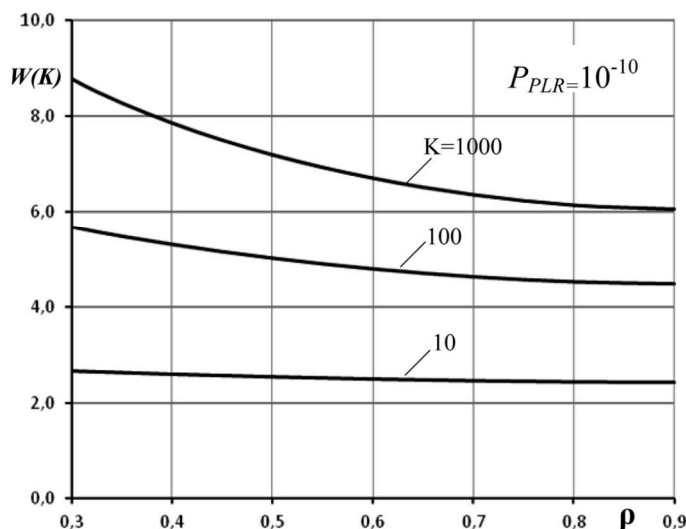


Рис. 4. Графики удельного выигрыша в емкости общего буфера $W(K)$ в зависимости от удельной нагрузки ρ при заданном значении вероятности потерь пакета $P_{PLR} = 10^{-10}$ для K выходных буферов (K принимает значения 10; 100; 1000)

$$W(K) = \frac{q_1 + u\sigma[q]}{q_1 + \frac{u\sigma[q]}{\sqrt{K}}}$$

Графики удельного выигрыша для детерминированного времени передачи пакета при $K = 10, 100$ и 1000 показаны на рис. 4.

Максимальный выигрыш достигается при организации общего буфера с K выходами при $K \rightarrow \infty$,

$$W_{\max}^{(D)} = 1 + \frac{u\sigma[q^{(D)}]}{q_1^{(D)}}$$

При удельной нагрузке $\rho = 0,8$ и вероятности потери пакета $P_{PLR} = 10^{-10}$ максимальный выигрыш составляет $W_{\max} = 7,39$.

Выводы

1. Модели процессов функционирования узлов коммутации с выходными буферными устройствами на основе частных случаев с детерминированной или экспоненциальной длительностью передачи пакетов являются практически идеальными аналогами поведения реальных коммутационных устройств

в сетях АТМ с постоянной длиной ячеек и сети *Internet*, построенной на технологии IP, в предположении, что длительности пакетов распределены по экспоненциальному закону.

2. Полученные соотношения для расчета среднего значения и дисперсии количества пакетов в выходном буфере коммутатора при постоянной длине пакета и пуассоновском потоке пакетов, поступающих в выходной буфер, практически полностью совпали с результатами, полученными для процессов поступления пакетов в виде независимых испытаний Бернулли.

3. Нижняя и верхняя оценка емкости выходного буфера могут использоваться для предварительных расчетов коммутационного оборудования сетей АТМ с ячейками постоянной длины (нижняя оценка) и IP-сетей (верхняя оценка) с экспоненциальным распределением длительности пакетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров А.Н., Симонов М.В. АТМ: Технология высокоскоростных сетей. М.: Радио и связь, ИТЦ «Эко-Трендз», 1999. 252 с.
2. Денисова Т.Б., Лихтциндер Б.Я., Назаров А.Н., Симонов М.В., Фомичев С.М. Мультисерверные АТМ-сети. М.: Эко-Трендз, 2005. 320 с.
3. Назаров А.Н. Модели и методы расчета структурно-сетевых параметров сетей АТМ. М.: Горячая линия—Телеком, 2002. 256 с.
4. Куделя В.Н., Привалов А.А., Петриева О.В., Чемиренко В.П. Методы математического моделирования систем и процессов связи / Под общ. ред. В.П. Чемиренко. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 368 с.
5. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. 600 с.
6. Климов Г.П. Стохастические системы обслуживания. М.: Наука, 1966. 243 с.
7. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: ООО «Политеком», 2010. 389 с.
8. Блудов Д.А., Вихлянцева П.С., Головкин В.А., Симонов М.В. Методика прогнозирования пропускной способности цифровых трактов доступа к сети Интернет при оказании государственных услуг в электронном виде // Телекоммуникации. 2011. № 11. С. 27—35.