тические выражения, позволяющие определить оптимальные значения потоков в линиях связи при заданной матрице тяготений между узлами сети. В качестве уравнения связи использован объективно существующий закон сохранения потоков в узлах коммутации сети.

2. Полученные значения оптимизируемых показателей сети удовлетворяют требованиям точности при проведении инженерных расчетов.

3. Предлагаемый математический аппарат расчета параметров F_{ij}, V_{ij}, $\overline{T}_{зад}^{\min}$ можно использовать при расчете сетей любой топологической структуры и произвольной связности.

Таким образом, решена задача определения основных оптимизационных показателей телекоммуникационной сети и получены аналитические выражения, позволяющие осуществить их обоснованный выбор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов Н.Н., Шмалько А.В. Терминология сетей синхронной цифровой иерархии // Сети и системы связи. – 1996. – № 8. – С. 58–63.
2. Линец Г.И., Фомин Л.А., Будко П.А., Гахова Н.Н. и др. Определение пропускной способности сетей связи при ограниченных канальных ресурсах // Сб. науч. тр.: Системы обработки информации. – Харьков: НАНУ, 2000. – № 3. – С. 59–64.
3. Фомин Л.А., Будко П.А., Гахова Н.Н. и др. Определение ресурса памяти узлов коммутации сети передачи данных // Сб. науч. тр.: Системы обработки информации. – Харьков: НАНУ, 2000. – № 2(8). – С. 102–104.
4. Фомин Л.А., Будко П.А., Ватага А.И. Об одном подходе к оптимизации сетей связи // Электроника. – 2003. – № 4. – С. 17–24.
5. Блэк Ю. Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы. – М.: Мир, 1990. – 506 с.
6. Фомин Л.А., Турко С.А., Ватага А.И. и др. Аналитическое решение задачи оптимального распределения потоков в сети передачи данных // Сб. науч. тр.: Системы обработки информации. – Харьков: НАНУ, 2002. – № 2(18). – С. 3–12.
7. Фомин Л.А., Будко П.А., Гахова Н.Н. Информационные аспекты внутренней организации телекоммуникационных систем // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2003. – № 6. – С. 10–19.
8. Kleinrock L. Queuing systems. Vol. 2: Computer applications. – N.Y.: Wiley, 1976.
9. Линец Г.И., Фомин Л.А., Будко П.А., Ватага А.И. Учет влияния спектральных свойств трафика на параметры сети с технологией АТМ // Электросвязь. – 2001. – № 11. – С. 24–26.
10. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989. – 544 с.

Поступила 09.10.2006 г.

УДК 621.394.74

УЧЕТ СВОЙСТВ САМОПОДОБИЯ НАГРУЗКИ В СЕТЕВЫХ СТРУКТУРАХ

Л.А. Фомин, Г.И. Линец*

Ставропольский военный институт связи Ракетных войск
*Ставропольский институт управления
E-mail: kbytw@mail.ru

Получены основные соотношения, позволяющие оценить влияние самоподобной нагрузки на эффективность использования сетевых ресурсов. Показано, что в оптимальном случае по критерию минимума среднего времени задержки пакетов степень загрузки каналов увеличивается, а объем буферной памяти в узлах коммутации снижается.

Введение

Развитие инфраструктуры современных сетей связи направлено на масштабное внедрение высокоскоростных технологий и новых телекоммуникационных услуг на основе использования пакетной передачи информации для трафика, образованного приложениями различных типов. Важной особенностью таких сетей является освоение новых масштабов времени, которые требуют решения целого ряда научных и практических задач, связанных с созданием принципиально новой измерительной техники для ее испытания, пересмотра основных положений теории телетрафика, направленных на расчет сетевой нагрузки. При этом традиционные методы расчета объема оборудования (особенно емкости накопителей коммутационных узлов), основанные на марковских моделях, приводят к значительной недооценке степени загрузки имеющихся ресурсов сети.

1. Состояние вопроса

Многочисленные исследования свойств трафика современных телекоммуникационных сетей позволили обнаружить явления структурного сходства статистических характеристик пакетной нагрузки при его измерении для различных масштабов времени (явления самоподобия). К числу объектов, для которых обнаружены подобные явления, относятся: пакетная передача данных в цифровых сетях с интеграцией служб; локальные вычислительные сети семейства Ethernet; сети общеканальной сигнализации; видеопередача с переменной скоростью по сетям, использующим технологию асинхронной передачи (ATM), и др. Требования к накопителям, которые предъявляет классическая теория телетрафика, являются довольно жесткими из-за сильной долгосрочной зависимости нагрузки в каналах связи при передаче самоподобного трафика (характеризуется значениями параметра Херста) [1]. В настоящее время установилось мнение: если необходимо передать по сети большую самоподобную нагрузку, то нужно предусмотреть наличие накопителей в узлах коммутации гораздо большей емкости, чем это требуется на основании расчетов классической теории телетрафика. Предварительный анализ показал, что при оптимизации сетей связи по критерию минимума среднего времени задержки пакетов, при возрастании нагрузки в сети необходимо снижать объем буферной памяти в узлах коммутации. Это приводит к сокращению времени пребывания пакетов в очереди, и, в свою очередь, требует применения каналов с более высокой пропускной способностью.

2. Постановка задачи

В сетях связи предполагается планирование трафика проводить заранее на основе существующих вероятностных и прогнозных моделей [2] и на их основе получать матрицу тяготения информационных потоков узлов сети с предполагаемыми данными о передаваемых объемах информации наряду с другой, служебной информацией. В этих условиях особую актуальность приобретает проблема получения достоверных сведений об объемах необходимых сетевых ресурсов для достижения требуемых значений вероятностно-временных характеристик информационного обмена пользователей сети.

В данной статье для систем массового обслуживания (СМО) двух типов получены аналитические зависимости, показывающие степень влияния на основные показатели сети возрастание самоподобной нагрузки. Рассмотрены случаи возрастания нагрузки сети, это же **Постановка задачи:**

- только за счет свойств самоподобия трафика при различных значениях показателя Херста в одноканальной СМО, с возможностью повторного вызова;
- за счет роста нагрузки в сети и с учетом свойств самоподобия передаваемого трафика в многоканальной СМО.

Для получения вероятностно-временных характеристик информационного обмена пользователей сети, в основе которых используются модели узлов коммутации в виде СМО, и в которых очереди пакетов на входе в каждый канал организуются в согласованную очередь, необходимо изменить методику расчета основных показателей сети так, чтобы она учитывала и влияние самоподобного трафика, особенно при перегрузке сети. Чтобы учесть влияние самоподобия передаваемого трафика на информационный обмен в сети, введем функцию $f(H)$, где H – показатель Херста. При H=0,5 свойства самоподобия нагрузки отсутствуют. Но при увеличении H до единицы – влияние самоподобия усиливается. Это объясняется тем, что с ростом параметра H усиливается инерция изменчивости используемых статистических данных сетевого уровня при решении оптимизационных задач. Для учета влияние самоподобия нагрузки в сети воспользуемся подходом, который описан в [3]. Тогда интенсивность поступающих на обслуживание заявок можно представить в виде:

$$\lambda_c = \lambda f(H),$$

где λ – интенсивность поступающего на обслуживание потока заявок при отсутствии самоподобия.

Для решения оптимизационной задачи и получения результатов в численном виде необходимо определить закон изменения функции $f(H)$. Если использовать линейный закон изменения функции $f(H)$ от показателя Херста H и положить $f(H)$=1 при H=0,5, то $f(H)$ можно представить в виде $f(H)$=2H [2]. В дальнейшем, будем использовать данный закон для учета свойств самоподобия нагрузки в сети.

3. Решение задачи

При решении многих сетевых задач большинство авторов ограничиваются рассмотрением изолированных СМО различных видов. Полученные таким образом результаты справедливы для расчета параметров и качественных показателей канального уровня (звена передачи данных). Однако такой подход не позволяет проводить оценку структурно-сетевых параметров и решать задачи сетевого уровня. Для решения задач сетевого уровня необходимо сеть моделировать в виде многоканальной рассредоточенной системы, которая имеет сложную топологическую структуру и ограниченную связность.

Представляет практический интерес решение сетевой задачи, в которой проведена оптимизация информационных потоков в линиях связи, либо – оптимизация пропускных способностей ветвей связи по критерию минимума среднего времени задержки $\overline{T}_{зад}$. Для выхода на сетевой уровень при решении оптимизационной задачи воспользуемся формулой Литтла:

$$\overline{T}_{зад} = \frac{1}{\gamma} \sum_{j=1}^{v} \overline{N}_j (F, V), \tag{1}$$

где F, V – поток каждой ветви и ее пропускная способность; γ – общий трафик сети; N_j – общее число заявок на обслуживание и в очереди канала j; v – номер ветви сети.

Для анализа и сравнения результатов моделирования, рассмотрим вначале хорошо изученную модель сети, где каждое звено моделируется в виде СМО

M/M/1/n с возможностью повторного вызова. Производящая функция стационарных вероятностей для такой системы определяется зависимостью [3]:

$$P(z) = P_0 \frac{\pi(1-z)}{\pi + \delta z - z[h(\lambda - \lambda z)]^{-1}} = P_0 A(z).$$

где: P_0 – вероятность отсутствия требований в системе; λ – интенсивность входящего потока требований; π – вероятность отсутствия повторных вызовов; δ=1–π – вероятность поступления вызова на повторное обслуживание;

$$A(z) = \frac{\pi(1-z)}{\pi + \delta z - z[h(\lambda - \lambda z)]^{-1}}.$$

Преобразование Лапласа-Стильтьеса для экспоненциальной функции распределения времени обслуживания имеет вид:

$$h(s) = \int_0^\infty \exp(-st)dx(t) = \frac{\mu}{s+\mu},$$

где: μ – интенсивность обслуживания вызовов.

Путем несложных преобразований, получаем:

$$A(z) = \frac{\pi}{\pi - \rho_0 \cdot z} = \frac{1}{1 - \rho_c \cdot z} = \sum_{j=0}^{\infty} \rho_c^j \cdot z^j,$$

где $\rho_c^j = \dfrac{\lambda}{\pi\mu} f(H)$ – коэффициент загрузки канала с учетом самоподобия и возможностью повторного вызова.

Следовательно, коэффициенты a^k, определяющие стационарные вероятности нахождения в системе *k* требований, равны:

$$a_k = [\rho_c]^k,$$

вероятность отсутствия требований в системе определяется выражением:

$$P_0 = \sum_{a=0}^{m+1} \rho_c^a, \quad a = \overline{0...m},$$

где *m* – общее число заявок в системе.

Стационарные вероятности нахождения в системе *k* требований определяются выражением:

$$P_k = P_0 \cdot a_k.$$

Средняя очередь в СМО данного типа равна:

$$\overline{N}_a = \frac{1-\rho_c}{1-\rho_c^{m+1}} \sum_{i=1}^{m} i \cdot \rho_c^i, \quad i = \overline{1...m},$$

где ρ_c^i – степень загрузки канала *i*-го звена.

Вероятность отказа в обслуживании по причине занятости каналов и буферов определяется выражением:

$$P_{отк} = P_{m+1} = P_0(\rho_c)^{m+1}.$$

Определим среднее число заявок, находящихся в очереди:

$$\overline{r} = \rho_c^2 P_0 \sum_{a=1}^{m} a \rho_c^{a-1}. \qquad (3)$$

Среднее число заявок, находящихся на обслуживании равно:

$$\overline{z} = \rho_c (1 - P_0 \rho_c^{m+1}). \qquad (4)$$

Определим среднее число заявок, находящихся в СМО:

$$\overline{N} = \overline{r} + \overline{z}. \qquad (5)$$

Подставляя в (5) значения (3) и (4), получим среднее число заявок в СМО в следующем виде

$$\overline{N} = \rho_c^2 P_0 \sum_{\alpha=1}^{m} \alpha \rho_c^{\alpha-1} + \rho_c (1 - P_0 \rho_c^{m+1}). \qquad (6)$$

Зафиксируем вероятность отказа на данном уровне:

$$P_{отк} \le P_{отк}^{доп}, \qquad (7)$$

тогда:

$$P_{отк}^{доп} = P_0 \rho_c^{m+1},$$

откуда находим P_0

$$P_0 = \rho_c^{-(m+1)} P_{отк}^{доп}. \qquad (8)$$

Используя выражения (6–8), получим:

$$\overline{N} = P_{отк}^{доп} \sum_{\alpha=1}^{m} \alpha \rho_c^{-(m-\alpha)} + \rho_c (1 - P_{отк}^{доп}). \qquad (9)$$

Выражение (9) справедливо для каждого узла и каждого направления передачи. Поэтому для сети, имеющей заданную топологическую структуру, для произвольного направления *i* имеем:

$$\overline{N}_i = P_{отк}^{доп} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \rho_{ci}^{-(m_i-\alpha)} + \rho_{ci} (1 - P_{отк}^{доп}).$$

С учетом (9) среднее время задержки (1) во всей сети равно

$$\widehat{T}_{зад} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^{k} \left[P_{отк}^{доп} \sum_{\alpha=1}^{m_i} \alpha \rho_{ci}^{-(m_i-\alpha)} + \rho_{ci} (1 - P_{отк}^{доп}) \right]. \qquad (10)$$

Результаты расчетов для представления функции *f*(*H*)=2*H*, выполненные по формуле (2), приведены на рис. 1. Рис. 1 определяет зависимость длины средней очереди заявок $\overline{N}_a$ (ось *y*) от коэффициента загрузки канала ρ_c (ось *x*) для различных значений показателей Херста *H* и вероятностей повторного вызова π.

Из рис. 1 следует, что для обслуживания самоподобной нагрузки в СМО *M/M/*1*/m* необходимо использовать буфер большего объема при тех же значениях загрузки канала, что совпадает с результатами, приведенными в [1].

Дифференцируя (10) по ρ_{ci} и приравнивая производную нулю, получим *n* уравнений, которые позволяют получить коэффициенты загрузки канала для каждого направления передачи:

$$\frac{\partial \widehat{T}_{зад}}{\partial \rho_{ci}} = 0.$$

В силу сепарабельности функции $T_{зад}$ запишем условие:

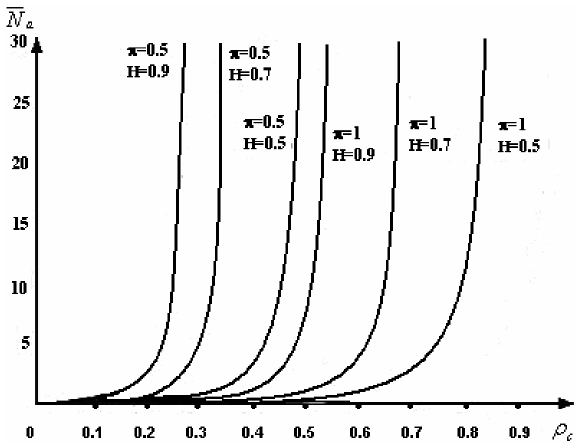

Рис. 1. *Зависимость объема буфера от загрузки каналов*

$$\frac{\partial \hat{T}_{зад}}{\partial \rho_{ci}}=\frac{d\bar{N}_i}{d\rho_{ci}}=0.$$

Дифференцирование (10) дает n уравнений, которые позволяют определить коэффициенты загрузки каждого звена оптимальным образом:

$$\sum_{a=1}^{m_i}(m_i-a)a\rho_c^{-(m_i-a+1)}=1-P^{доп}_{отк};\quad i=\overline{1,k}. \qquad (11)$$

Однако по условиям задачи, приемлемыми значениями являются только те из них, которые удовлетворяют условию:

$$P^{доп}_{отк}=\rho_c^{(m+1)}\rho_0=\rho_c^{(m+1)}[\sum_{\alpha=1}^{m+1}\rho_c^{\alpha}]^{-1}.$$

Преобразуем выражение (11) к виду ($P^{доп}_{отк}$<<1):

$$P^{доп}_{отк}=\sum_{a=1}^{m_i}(m_i-a)a\rho_c^{-(m_i-a+1)}.$$

Сравнивая выражения (7) и (11), получим:

$$\rho_c^{-1}=\sum_{\alpha=1}^{m_i}[\alpha(m_i-\alpha)-\rho_{c_i}]\,\rho_{c_i}^{\alpha-1}. \qquad (12)$$

В практически реализуемых топологических структурах сетей связи используются структуры, содержащие пучки каналов в каждом направлении передачи. Поэтому целесообразно исследовать влияние самоподобной нагрузки на сеть, в которой каждое звено моделируется многоканальной СМО с ограниченной очередью типа *M/M/n/m*. Для такой модели среднее время задержки для всей сети определяется выражением [3]:

$$T_{зад}=\frac{1}{\gamma}\sum_{i=1}^{k}[P^{доп}_{i\,отк}\sum_{\alpha=1}^{m_i}\alpha\chi_{ci}^{-(m_i-\alpha)}+n_i\,\chi_{ci}\,(1-P^{доп}_{i\,отк})].$$

В выражении (12) значения χ_c определяются из решения уравнения:

$$\frac{n_i!}{(n_i\chi_{ci})^n}\sum_{\alpha=0}^{n_i}\frac{(n_i\chi_{ci})^\alpha}{\alpha!}=\sum_{\alpha=1}^{m_i}\left[\frac{\alpha(m_i-\alpha)}{n_i}-\chi_{ci}\right]\chi_{ci}^{\alpha-1},$$
$$i=\overline{1...k}, \qquad (13)$$

где: $\chi_{ci}=\rho_{ci}/n_i$ – степень загрузки канала в многоканальной СМО.

Кривые зависимости ${}^{пр}\chi_c^{опт}=f(m_i,n_i)$ приведены на рис. 2. На рис. 2 ось χ_c соответствует степени загрузки каналов в многоканальной СМО; ось m – число мест в очереди буферов в узлах коммутации, n – число каналов.

4. Анализ полученных результатов

Анализ показывает, что приемлемые значения степени загрузки каналов ${}^{пр}\chi_{ci}^{опт}$ не зависят от требуемого значения вероятности отказа и являются

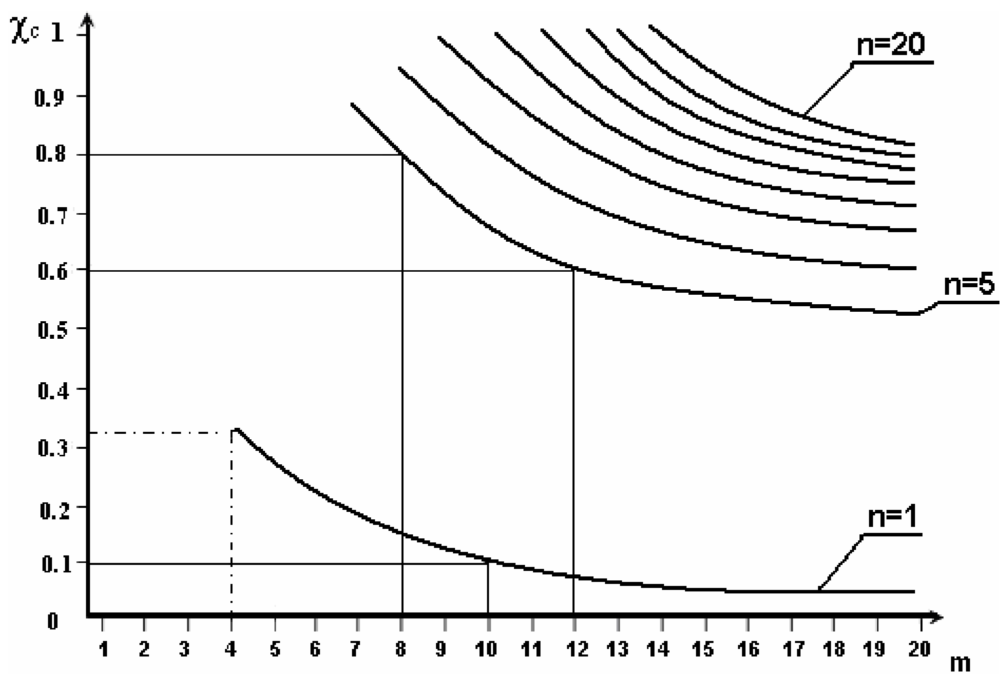

Рис. 2. *Зависимость коэффициента загрузки канала от объема буфера*

функциями дискретных значений числа каналов (n_i) и числа мест в очереди буферов в узлах коммутации (m_i).

Каждое уравнение системы (13) является функцией переменной χ_{ci}. Это дает возможность определять приемлемые оптимальные значения ${}^{пр}\chi_{ci}^{опт}$ для звеньев сети независимо друг от друга:

$$^{пр}\chi_{ci}^{опт} = \frac{\lambda_i}{n_i \mu_i} = \frac{L\lambda_i}{n_i L \mu_i} = \frac{F_i}{V_i n_i} = f(m_i, n_i),$$

где L – фиксированная длина пакета (ячейка ATM); – суммарный поток на входе i-го звена; V_i – пропускная способность каждого канала в направлении i.

Оптимизация по χ_{ci} позволяет варьировать величинами V_i и n_i в зависимости от класса передаваемого трафика в соответствии с матрицей нагрузок, предоставляя пользователю любую совокупность каналов по его требованию с переменной шириной битовых скоростей передачи, формируя виртуальный канал с переменной пропускной способностью независимо от требуемой вероятности отказа. При этом среднее время доставки пакетов будет оставаться минимальным. Решение уравнений (13) упрощается для изотропной сети, в которой приемлемая степень загрузки каналов не зависит от направления передачи. Опуская индекс i при параметре χ_c, получим:

$$^{пр}\chi_{c}^{опт} = \frac{F_i}{V_i n_i} = f(m_i, n_i).$$

Для учета самоподобной нагрузки в изотропной сети достаточно значение коэффициента загрузки каналов χ_c умножить на величину $2H$. Поскольку показатель Херста изменяется в пределах H=0,7...0,9, то значение χ_c необходимо умножить на этот коэффициент, выбрав его соответствующее значение. Анализ кривых показывает, что с ростом степени загрузки каналов сети объем буферной памяти узлов коммутации снижается. Оптимальные значения ρ_c дают минимум функционалу (10). Они получены путем вычисления из уравнений (12) (условие оптимальности) для одноканальной СМО с возможностью повторного вызова и имеют верхний предел ρ_c=0,328. Данному значению загрузки канала (n=1) соответствует объем буфера m=4 (рис. 2). Увеличение объема буфера ведет к снижению степени загрузки канала. Например, при m=10, получим χ_c=0,1.

Это подтверждает сделанное ранее предположение о том, что с увеличением самоподобной нагрузки в сети и для минимизации среднего времени задержки объем буферной памяти узлов коммутации необходимо снижать, увеличивая при этом степень загрузки каналов.

В сети, имеющей несколько каналов в каждом направлении передачи, эта тенденция сохраняется. Например, при числе каналов n=5 (рис. 2) при возрастании нагрузки со значения χ_1=0,6 до χ_2=0,8, ур. (12), число мест в очереди снижается в полтора раза (с 12 до 8). Этот результат подтверждает сделанное ранее предположение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман В.И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика // Электросвязь. – 1999. – № 1. – С. 11–14.
2. Турко С.А., Фомин Л.А., Будко П.А. Оптимизация пропускной способности звеньев Ш-ЦСИС при ограниченных сетевых ресурсах // Электросвязь. – 2002. – № 2. – С. 17–19.
3. Петров М.Н. Вероятностно-временные характеристики в сетях и системах передачи интегральной информации. – Красноярск: КГТУ, 1997. – С. 35–39.
4. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. – М.: Радиотехника, 2003. – 497 с.

Поступила 10.11.2006 г.