

УДК 621.394

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОПУСКНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ ЛИНИЙ СВЯЗИ КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОСВЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Г.И. Линец

Ставропольский институт управления

E-mail: kbytw@mail.ru

Получены аналитические зависимости, позволяющие определить среднее минимальное время задержки пакета и осуществить обоснованный выбор пропускных способностей линий связи при существующей матрице тяготений узлов сети.

Введение

Существующие корпоративные сети, являясь системами коллективного пользования, эксплуатируются, прежде всего, как коммерческие структуры [1]. Проблема эффективного использования ресурсов не может быть решена только за счет привлечения большого количества пользователей, создающих достаточный трафик. Необходимо разработка оптимизационных процедур, позволяющих оценивать возможности сети по обеспечению требуемых вероятностно-временных характеристик информационного обмена [2, 3]. Определение оптимальных значений потоков в линиях связи сети, если известна матрица пропускных способностей и определены множители Лагранжа, не вызывает особых трудностей. Иначе обстоит дело, если необходимо решить обратную задачу (задачу синтеза), когда в явном виде выразить значения пропускных способностей линий связи сети через потоки исходной матрицы тяготения узлов не представляется возможным. В статье использован метод косвенной оптимизации, позволяющий решить задачу оптимизации двух переменных, одна из которых может выступать в качестве исходных данных. Наиболее эффективен данный метод в случае, когда исследуемая функция не содержит экстремума, но является выпуклой. Тогда может быть проведена ее условная оптимизация. Получены аналитические зависимости, позволяющие определить среднее минимальное время задержки пакета и осуществить обоснованный выбор пропускных способностей линий связи при существующей матрице тяготений потоков узлов сети. Использование метода условной оптимизации в данной задаче решает проблему выбора вида функции, связывающей независимые переменные условием в виде объективно существующей взаимосвязи между оптимизируемыми переменными. Это позволяет интерпретировать результаты решения задачи в виде законов для сети и оценивать таким образом ее потенциальные возможности.

Постановка задачи

На сетевом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем выделим основной показатель сети – среднее время задержки пакета $\bar{T}_{\text{зад}}$ и определим для модели сети М/М/1 среднее минимальное время задержки $\bar{T}_{\text{зад}}^{\min}$ пакета путем оптими-

зации потоков F . В качестве исходных данных используем пропускные способности V линий связи и уравнения функции вида $\psi(\bar{F})=0$, то есть:

$$\bar{T}_{\text{зад}}^{\min} = \min_F \bar{T}_{\text{зад}}(V, F);$$

$$\psi(\bar{F}) = 0,$$

где $\bar{F}$ – значения потоков в магистральных линиях, связанные определенной зависимостью.

Для сетей связи с коммутацией пакетов постоянной длины L (например, ячейки технологии асинхронной передачи пакетов) в качестве исходных данных используем матрицу тяготения $\|F_{ij}\|$, где $F_{ij}=L \cdot \lambda_{ij}$ – величина потока, планируемая для передачи по линии связи между узлами i и j ; λ_{ij} – интенсивность потока заявок (пакетов) на входе/выходе линии связи между узлами i и j .

Требуется определить оптимальные значения пропускных способностей линий связи сети $\|V_{ij}^{\text{опт}}\|$. Они будут считаться оптимальными при условии равенства исходных матриц смежности планируемой нагрузки $\|F_{ij}\|$ между узлами матрицы тяготения (S и T) и рассчитанными матрицами смежности оптимальных потоков $\|F_{ij}^{\text{опт}}\|$ между этими узлами ($\|F_{ij}\|=\|F_{ij}^{\text{опт}}\|$).

Решение задачи

Необходимо реализовать функциональную зависимость $V_{ij}=f(F_{ij}^{\text{опт}})$. Данная задача является задачей синтеза. Для ее решения в качестве функционала оптимизации используем среднее минимальное время задержки пакета [5–7]:

$$\bar{T}_{\text{зад}} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i,j} \frac{F_{ij}}{V_{ij} - F_{ij}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где F_{ij} – величина потока в линии связи звена сети между узлами i и j ; V_{ij} – величина пропускной способности линии связи сети между узлами i и j ; γ – трафик сети при передаче начального потока F_j^0 (согласно матрице тяготения) от узла S к узлу T .

В качестве уравнения связи при условной оптимизации (1) используем объективно существующий закон для каждого узла коммутации сети – закон сохранения потоков:

$$\sum_{j=1}^{p-1} F_{ij} = a F_j^0, \quad i \neq j, \quad (2)$$

где $F_{ij} = -F_{ji}$ – поток в ветви ij ; F_j^0 – начальный поток, принадлежащий узлу j ; p – связность узла j , равная числу смежных ему ветвей;

$$a = \begin{cases} 1 & \text{при } j = S, \\ 0 & \text{при } j \neq S, \\ -1 & \text{при } j = T, \end{cases}$$

где S – узел-источник, T – узел-получатель.

В [4] доказаны теоремы 1 и 2, определяющие основное содержание метода косвенной оптимизации. Для пояснения сути метода косвенной оптимизации приведем их содержание без доказательств.

Рассмотрим произвольную функцию $z = F(\bar{x}, \bar{y})$, где $\bar{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ и $\bar{y} = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)$ являются независимыми переменными, заданными проекциями векторов $\bar{x}$ и $\bar{y}$, причем функция z имеет экстремум и является аддитивной. Каждый член суммы $z = k \sum_{i,j} f(x_i, y_j)$ является функцией одной пары проекций векторов x_i и y_j , т. е. выполняется свойство сепарабельности.

Теорема 1. Результат оптимизации дифференцируемой сепарабельной функции $F(\bar{x}, \bar{y})$, содержащей экстремумы по обоим переменным в пределах области определения с точностью до некоторой постоянной, не зависит от выбора независимой переменной $\bar{x}$ или $\bar{y}$, по которой производится оптимизация.

Теорема 2. Если сепарабельная, содержащая экстремумы по обоим переменным в пределах области определения, функция $F(\bar{x}, \bar{y})$ – гладкая, то результат оптимизации не зависит от выбора независимой переменной, по которой производится оптимизация.

Отметим, что функция $F(\bar{x}, \bar{y})$ будет гладкой в том случае, если все члены суммы $f(x_i, y_j)$ будут гладкими функциями. На основании теорем 1 и 2 можно решать задачи оптимизации двух переменных $F(\bar{x}, \bar{y})$, одна из которых, например, $\bar{y}$, может выступать в качестве исходных данных y_0 . Производя оптимизацию по параметрам y_0 , можно преобразовать функцию $F(\bar{x}, \bar{y}_0)$ так, чтобы координаты точки оптимума совпадали с координатами конца вектора $\bar{y}_0 = (y_{01}, \dots, y_{02}, \dots, y_{0n})$, заданного своими проекциями. Таким образом, целенаправленно варьируя независимыми переменными, можно совместить координаты оптимальных точек функции $F(\bar{x}, \bar{y})$ с выбранными координатами вектора $\bar{y}$, проекции которого известны и могут быть заданы в качестве исходных данных. Если функция $F(\bar{x}, \bar{y})$ имеет экстремум, преимущества рассматриваемого метода в явном виде не просматриваются. Однако, если функция $F(\bar{x}, \bar{y})$ не содержит экстремума, но является выпуклой, то тогда может быть произведена ее условная оптимизация. Для этого необходимо задать ограничивающие условия в виде функции, связывающие независимые переменные для той переменной, по которой производится оптимизация. При этом возникает проблема выбора вида этой функции в виде объективно существующей

взаимосвязи между оптимизируемыми переменными, либо, по сути, отражающей характер решаемой задачи. Например, если оптимизируемой переменной является $\bar{x}$, а переменная $\bar{y}$ задана своими проекциями, которые, кроме того, связаны функциональной зависимостью, в то время как для переменных x_i такой зависимости не существует или она неизвестна, то согласно приведенным выше теоремам 1 и 2 оптимизация может быть проведена по переменным $\bar{y}$ с тем же результатом.

С учетом сути метода косвенной оптимизации, изложенной выше, решим поставленную задачу. Для ее решения используем метод множителей Лагранжа [8, 9], согласно которого функционал оптимизации, в соответствии с выражениями (1) и (2), примет вид:

$$\Phi = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^v \frac{F_{ij}}{V_{ij} - F_{ij}} + \sum_{j=1}^v P_j \sum_{j=1}^{v-1} F_{ij} + a F_j^0, \quad (3)$$

где P_j – множители Лагранжа.

Поскольку закон сохранения потока справедлив для всех узлов сети, то всегда для одного из узлов сумма потоков является линейной комбинацией потоков всех остальных узлов. Поэтому, в выражении (3) имеет место $j = \overline{1, (v-1)}$. Для получения симметричного решения это обстоятельство может не учитываться, полагая $j = \overline{1, v}$. Однако, учет этого допущения должен быть выполнен после решения задачи оптимизации путем задания $P_v = 0$. Для определения оптимальных значений потоков F_{ij}^{opt} , обеспечивающих минимум функционала (1), вычислим частные производные

$$\partial \Phi / \partial F_{ij} = 0. \quad (4)$$

Дифференцирование по всему множеству значений $i, j = \overline{1, v}$ предполагает, что начальная топологическая структура сети является полносвязной. Вычисление производных (4) приводит к системе уравнений вида:

$$\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij})^2} = \gamma (P_j - P_i), \quad i, j = \overline{1, v},$$

причем $i \neq j, \quad P_v = 0. \quad (5)$

Число этих уравнений определяется количеством ветвей графа и для полносвязной сети равно $k = v(v-1)/2$, откуда значения потоков для каждой ветви определяются выражением

$$F_{ij}^{opt} = V_{ij} - \sqrt{\frac{V_{ij}}{\gamma(P_j - P_i)}}. \quad (6)$$

Множители Лагранжа P_i и P_j найдем путем подстановки (6) в (2):

$$\sum_{i=1}^v \left(V_{ij} - \sqrt{\frac{V_{ij}}{\gamma(P_j - P_i)}} \right) = a F_j, \quad j = \overline{1, v-1} \quad (7)$$

и совместного решения системы (7). Однако, в силу иррациональности уравнений системы (7), попытка ее решения приводит к системе нелинейных уравнений высокого порядка, равного удвоенному

значению числа узлов сети. Аналитическое решение такой системы известными математическими методами не представляется возможным. Для определения множителей Лагранжа проведем их линеаризацию путем разложения левой части выражения (5) в ряд Тейлора в окрестности точки F_{ij}^0 [10]. В результате разложения

$$\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} \quad (8)$$

получим систему линейных алгебраических уравнений относительно F_{ij}^0 :

$$\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} + \frac{2V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^3} (F_{ij}^{opt} - F_{ij}^0) = \gamma (P_j - P_i), \quad (9)$$

где

$$F_{ij}^0 = \alpha V_{ij},$$

α – коэффициент, определяющий точку разложения F_{ij}^0 на оси V_{ij} . Он может изменяться в пределах $0 \leq \alpha \leq 1$.

Функция (9) после преобразований приводится к виду:

$$F_{ij}^{opt} = b_{ij} - (P_i - P_j) a_{ij}, \quad (10)$$

$$a_{ij} = \gamma \frac{(V_{ij} - F_{ij}^0)^3}{2V_{ij}}, \quad (11)$$

где

$$b_{ij} = \frac{3F_{ij}^0 - V_{ij}}{2}. \quad (12)$$

После подстановки (10)–(12) в (2) получим систему уравнений, которую представим в матричной форме:

$$A \cdot X = C, \quad (13)$$

где A , X и C – матрицы коэффициентов a_{ij} , множителей Лагранжа P_{ij} и свободных членов b_{ij} соответственно.

Если матрица невырожденная, то уравнение (13) имеет решение:

$$X = A^{-1} \cdot C, \quad (14)$$

где A^{-1} – обратная матрица матрицы A . Таким образом, множители Лагранжа P_{ij} можно определить по методу Крамера или путем перемножения обратной матрицы A^{-1} на матрицу C , а оптимальные значения потоков F_{ij}^{opt} – по выражению (10). Величину трафика сети γ определим количеством пакетов, поступающих в сеть в единицу времени (или количеством пакетов, покидающих сеть в единицу времени). Т. е., трафик сети γ считается постоянной величиной и не влияет на величину F_{ij}^{opt} . Поэтому, в расчетах F_{ij}^{opt} по выражению (10) величина трафика δ может быть принята за единицу, или определяться из выражения

$$\gamma = \alpha_{np}^* \cdot \sum_{ij=1}^k V_{ij}, \quad (15)$$

где α_{np}^* – приемлемый коэффициент α , определяющий выбор точки разложения F_{ij}^0 при оптимальном распределении начального потока F_j^0 между парой

узлов и матрицы тяготения; $\sum_{j=1}^k V_{ij}$ – общая пропускная способность всех k -линий связи при оптимальном распределении начального потока F_j^0 между парой узлов S и T .

Трафик, определяемый выражением (15), отличается от оптимального трафика, полученного в результате распределения начального потока F_j^0 между парой узлов S и T . Он дает примерное представление о величине оптимального трафика в сети. Для расчета $\bar{T}_{300}^{\min}$ по выражению (1) необходимо рассчитать истинное значение трафика:

$$\gamma = \sum_{ij=1}^k F_{ij}^{opt},$$

то есть, после определения матрицы оптимальных потоков между узлами S и T .

Решение задачи оптимального распределения потоков даже в линейном приближении с использованием выражений (10)–(14) оказывается достаточно сложным. Это объясняется существенной зависимостью области допустимых значений оптимальных потоков в каждой ветви графа сети ($0 \leq F_{ij}^{opt} \leq V_{ij}$) от положения начальной точки F_{ij}^0 , в которой осуществляется разложение (7) в ряд Тейлора. Оценка точности разложения исследуемой функции проведена с использованием коэффициента a , который определяется отношением F_{ij}^0/V_{ij} . Такое представление упрощает интерпретацию результатов, так как соответствует по смыслу величине относительной нагрузки на линии связи сети (степени загрузки канала). Выбор приемлемых значений единого для сети коэффициента α_{np}^* должен осуществляться в интервале α_{np} , величина которого определяется двумя условиями. Первое условие – условие сходимости ряда Тейлора [3]:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n + R_n(x), \quad (16)$$

остаточный член, которого равен

$$R_n(x) = f(x) - T_n(x) = 0, \quad \text{при } n \rightarrow \infty, \quad (17)$$

где $T_n(x)$ – правая часть выражения (16), n – степень производной.

Для разлагаемого в ряд функционала (8) выражения (16) и (17) принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} &= \frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} + \dots + \\ &+ \frac{\left[\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} \right]^{(n)}}{n!} (F_{ij} - F_{ij}^0)^n + R_n(x), \\ \frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} &- \frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} - \dots - \\ &- \frac{\left[\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} \right]^{(n)}}{n!} (F_{ij} - F_{ij}^0)^n = 0. \end{aligned}$$

Условие сходимости ряда (17) будет выполняться, если $(V_{ij} - F_{ij}^0) \geq 1$, т. е. $V_{ij} - \alpha V_{ij} \leq 1$, или $\alpha_{np} \leq 1 - (1/V_{ij})$ для отдельной ветви связи. Для сети в целом, имеем

$$\alpha_{np}^* \leq 1 - \frac{1}{V_{ij}^{\min}}.$$

Второе условие определяется допустимой областью возможных изменений оптимальных потоков при заданной матрице пропускных способностей $\|V_{ij}\|$ линий связи. При этом учитывается максимально допустимая нагрузка на используемые виды линий связи (кабельные линии связи, волоконно-оптические линии связи, эфир), т. е.

$$0 \leq F_{ij}^{opt} \leq V_{ij}. \quad (18)$$

Для определения интервала приемлемых значений a (a_{np}^*) по второму условию, из выражений (13) выразим значения множителей Лагранжа по правилу Крамера и подставим их в выражения для определения оптимальных потоков (10). Из полученных значений выразим зависимости $\alpha_{ij} = f(F_{ij}^{opt})$.

Рассмотрим особенности выбора точки разложения F_{ij}^0 выражения (8) в ряд Тейлора, когда пропускные способности звеньев сети значительно отличаются друг от друга, воспользовавшись графиками, характерными для двух узлов сети. График выражения (8) для каждого из звеньев сети имеет вид (рис. 1).

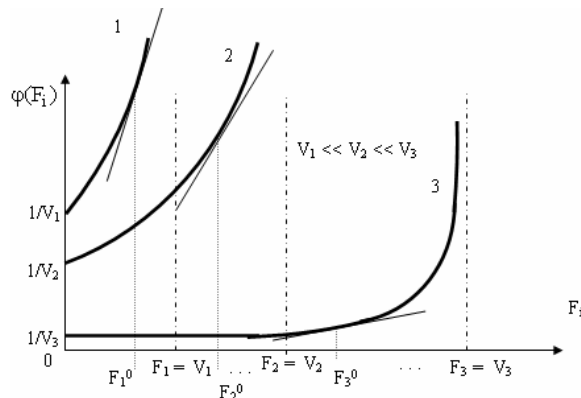


Рис. 1. Выбор точки разложения F_{ij}^0

В этом случае, при выборе единой точки разложения F_{ij}^0 для сети, путем выбора α_{np}^* (на рис. 1 $\alpha_{np}^* \approx 0,7$), оптимальное распределение потоков может привести к невыполнению условия (18) в отдельных ее звеньях, по причине выбора точки разложения на различных участках кривых 1–3, в том числе недостаточно линейных (кривая 2). Такие ситуации возможны, если пропускные способности звеньев сети значительно отличаются друг от друга по величине (не менее чем на порядок), что не характерно для транспортных магистралей сетей. Если условие (18) не выполняется после оптимального распределения потоков для отдельных звеньев сети, то необходимо: а) подбором α_{np}^* попытаться найти общую область допустимых значений потоков в сети; б) перераспределить планируемый ресурс V_{ij} и повторить расчеты по оптимальному распределению потоков.

Пример. Рассмотрим определение оптимальных потоков на примере графа сети, состоящей из двух узлов (рис. 2).

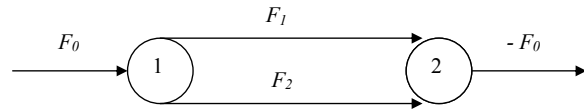


Рис. 2. Граф сети из двух узлов коммутации

Дано: $F_0 = 1400$ бит/с — величина входящего начального потока узла источника S ; F_1 и F_2 — значения потоков в первой и второй смежных ветвях графа сети; F_0 — величина исходящего начального потока узла получателя T ; $V_1 = 1000$ бит/с — пропускная способность первой линии связи; $V_2 = 500$ бит/с — пропускная способность второй линии связи; $\gamma = 1400$ бит/с — общий трафик сети.

Определить: величину оптимальных потоков F_1^{opt} и F_2^{opt} линий связи сети.

Функционал оптимизации для представленной модели сети имеет вид

$$\bar{T}_{зад} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{F_1}{V_1 - F_1} + \frac{F_2}{V_2 - F_2} \right), \quad (19)$$

а уравнение связи для двух узлов, при условной оптимизации функционала (19),

$$F_1 + F_2 = F_0.$$

Сформулированную задачу решим тремя способами: первый — с использованием геометрического метода; второй — с использованием разработанного программного обеспечения; третий — с использованием метода неопределенных множителей Лагранжа. Полученные оптимальные значения параметров сети и сравнительная характеристика погрешностей расчетов представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. Значения оптимальных параметров сети

Способы решения	Оптимальные параметры сети		
	F_1^{opt} , бит/с	F_2^{opt} , бит/с	$T_{зад}^{min}$, с
Геометрический метод	942,10	458,90	0,01939
С использованием разработанного программного обеспечения	940,11	459,89	0,02060
Метод неопределенных множителей Лагранжа	940,00	457,58	0,01889

Таблица 2. Сравнительная характеристика погрешностей расчетов

Сравнительная характеристика способов решения	Погрешности параметров сети, %		
	δF_1^{opt}	δF_2^{opt}	$\delta T_{зад}^{min}$
Второй относительно первого	0,21	0,22	6,24
Третий относительно первого	0,22	0,29	2,58
Второй относительно третьего	0,01	0,50	9,00

Во всех трех случаях результаты по своим значениям отличаются незначительно.

Выводы

1. Для модели сети М/М/1 с использованием метода косвенной оптимизации получены анали-

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.

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.

3. Предлагаемый математический аппарат расчета параметров F_{ij} , V_{ij} , $T_{зад}^{min}$ 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.

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. Бергсекас 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 тра-

диционные 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, отно-