ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ПРОПУСКНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

А.А. Морозов, В.М. Гостев, Р.Ф. Хабибуллин

Настоящая работа является непосредственным продолжением [1]. В ней приводятся результаты экспериментов по оценке предельных пропускных способностей и временных характеристик различных вариантов сети передачи данных (СПД) гипотетической корпоративной территориальной компьютерной сети в пределах Республики Татарстан. Для вычисления оценок временных задержек используются модели и методы, представленные в [1].

Топологическая структура СПД представляется множеством $V=\{v_1,...,v_n\}$ узлов коммутации (УК) СПД на маршрутизаторах, соединенных множеством U каналов передачи данных (КПД) на дуплексных линиях связи: каждая линия связи, соединяющая, например, узлы коммутации $v_i \in V$ и $v_j \in V$, задает два канала (направления) передачи данных - $(v_i,v_j) \in U$ и $(v_j,v_i) \in U$. Заданы пропускные способности каналов, измеряемые в бит/сек, и пропускные способности УК (маршрутизаторов), измеряемые количеством обрабатываемых пакетов в секунду. Размеры всех пакетов, передаваемых по сети, считаются одинаковыми и равными h бит, причем в размер пакета входит размер заголовка h_0 бит.

Пусть p_{kl}^0 - средняя интенсивность потока данных из УК v_k в УК v_l (в бит/сек), порожденного внешними обращениями к СПД, $k,l=\overline{1,n}$. Тогда для любых $v_k, v_l \in V$ средняя интенсивность потока из v_k в v_l с учетом заголовков пакетов составит:

$$p_{kl} = \frac{p_{kl}^0}{1-h_0/h}; \; k,l=1,...,n. \qquad (1)$$

Предполагается, что в СПД используется фиксированная однопутевая маршрутизация, т.е. пакеты из одного УК до другого проходят по одному и тому же заранее выбранному (фиксированному) маршруту. Задание маршрутов передачи пакетов для всех пар узлов в сети однозначно определяет распределение потоков данных по сети, т.е. средние интенсивности потоков данных через все компоненты сети. Рассматривая (моделируя) КПД и УК как системы массового обслуживания (СМО) типа M/M/1 или

M/D/1, можно оценить средние задержки на каждом канале и в каждом узле коммутации. Считая, что задержки пакета на каналах и в узлах коммутации СПД являются независимыми случайными величинами, можно оценить межузловые средние задержки при передаче пакета через сеть для каждой пары УК $v_k, v_l \in V$, а также среднюю задержку пакета при передаче по СПД (см. [1]). Таким образом, для заданной конкретной сети передачи данных временные характеристики СПД и их оценки зависят от нагрузки на сеть, определяемой матрицей нагрузки $P^0 = (p_{kl}^0)$, а также от используемой маршрутизации и размеров пакета и заголовка.

Моделирование нагрузки на сеть

Если заданы маршрутизация и параметры пакетов, то знание матрицы нагрузки $P^0 = (p_{kl}^0)$ позволяет рассчитать оценки всех временных характеристик СПД. Матрица P^0 может быть получена с помощью непосредственных измерений в сети. Но реальная нагрузка динамична, все время меняется, соответственно изменяются и задержки. Поэтому при проектировании и моделировании функционирования СПД желательно оценить зависимость ее временных характеристик от величины и характера нагрузки на СПД. Для получения таких оценок можно задавать различные значения матрицы P^0.

Матрица нагрузки P^0 может быть полностью (поэлементно) задана непосредственно. Однако, можно также для целей оценки характеристик сети приближенно смоделировать межузловые потоки следующим способом.

Зададим для каждой вершины $v_k \in V$ числовой параметр w_k, отражающий “вес” этого УК в образовании потока по сети: $w_k \in (0,1)$, $\sum_{k=1}^{n} w_k = 1$. Таким образом, чем более интенсивным предполагается участие УК в обмене данными по сети с другими УК, тем больше выбирается его вес.

Зададим параметр p_0, с помощью которого будет определяться величина в бит/сек суммарной интенсивности внешней нагрузки - потока, переносимого сетью. Будем считать, что средний поток данных из v_k в v_l, порожденный внешними обращениями к СПД, равен $p_{kl}^0 = w_k w_l p_0$ для $k,l = \overline{1,n}$. Тогда суммарный внешний поток, обслуживаемый сетью,

$$p^0 = \sum_{k=1}^{n} \sum_{l=1}^{n} p_{kl}^0 , \qquad (2)$$

и, учитывая, что $\sum_{k=1}^{n} w_k = 1$, выполняется $p^0 = p_0$. Таким образом, задание весов w_k определяет характер распределения нагрузки на СПД, а p_0 - величину ее суммарной интенсивности.

Отметим, что при таком способе моделирования элементы $p_{kk}^0 \neq 0$, $k=\overline{1,n}$. Поток p_{kk}^0 в этом случае можно интерпретировать как сумму потоков, которыми обмениваются между собой через УК СПД $v_k \in V$ компоненты сегмента компьютерной сети, подсоединенного к этому УК, и которые не передаются по СПД, а только создают дополнительную нагрузку на этот УК.

Чтобы рассматривать только потоки, которые переносятся каналами связи СПД, можно дополнительно положить $p_{kk}^0 = 0$ для $k=\overline{1,n}$, тогда для p^0, определенного в (2), будет иметь место $p^0 < p_0$, т.е. суммарный моделируемый поток p^0, переносимый сетью, окажется меньше заданной величины p_0, и разница между ними будет зависеть от конкретного набора величин w_k, $k = \overline{1,n}$.

Для того, чтобы результирующая интенсивность суммарного потока p^0 в (2) оказалась равной заданной величине p_0 при условии $p_{kk}^0 = 0$ для $k=\overline{1,n}$, рассмотрим третий вариант моделирования нагрузки. Положим

$$p'_{kl} = w_k w_l p_0,\ k, l = \overline{1,n},\ k \neq l, \text{ и } p'_{kk} = 0,\ k = \overline{1,n}.$$

Вычислим $\hat{p} = \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} p'_{kl}$ и зададим

$$p_{kl}^0 = p'_{kl} p_0 / \hat{p},\quad k, l = \overline{1,n}.$$

Теперь, как нетрудно проверить, суммарная интенсивность потока p^0 через сеть действительно равна p_0, т.е. $p^0 = \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} p_{kl}^0 = p_0$. В описанных ниже экспериментах и расчетах использовался этот последний вариант моделирования нагрузки на сеть.

Во всех трех рассмотренных вариантах моделирования матрицы нагрузки на сеть $P^0 = (p_{kl}^0)$ интенсивность p_{kl} потока из v_k в v_l с учетом заголовков пакетов определится в соответствии с (1), а суммарная интенсивность потока по сети с учетом заголовков пакетов составит $p = \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} p_{kl}$.

Таким образом, для задания матрицы нагрузки $P^0 = (p_{kl}^0)$ и соответствую-

щей матрицы межузловых потоков $P=(p_{kl})$ вместо n^2 элементов достаточно задать $n+1$ параметров: p_0, $w_1,...,w_n$.

Построенная матрица $P^0=(p_{kl}^0)$ задает симметричную нагрузку на сеть: $p_{kl}^0=p_{lk}^0$, $k,l=\overline{1,n}$, т.е. межузловые потоки во встречных направлениях равны. Для современных условий, когда в компьютерной сети выделяются специализированные серверы приложений и баз данных, или когда одни УК в зависимости от расположения являются преимущественно отправителями, а другие - преимущественно получателями передаваемых через сеть данных, типична несимметричная нагрузка. Для моделирования несимметричной нагрузки на СПД припишем каждому узлу $v_k \in V$ параметр $\delta_k>0$, $k=\overline{1,n}$, и положим $\alpha_{kl}=\delta_k/(\delta_k+\delta_l)$. Очевидно, что для $k \neq l$ выполняется $\alpha_{kl}+\alpha_{lk}=1$, суммарный поток через узел $v_k \in V$ при обменах с УК $v_l \in V$ равен $p_{kl}^0+p_{lk}^0=2p_{kl}^0$, и если в качестве нового значения p_{kl}^0 возьмем величину $2\alpha_{kl}p_{kl}^0$, $k, l=\overline{1,n}$, то α_{kl} будет отражать долю потока, выходящего из узла v_k и предназначенного узлу $v_l \in V$, в его суммарном обмене с узлом $v_l \in V$.

Очевидно, что если $\delta_k \neq \delta_l$, то $\alpha_{kl} \neq \alpha_{lk}$, и тогда $p_{kl}^0 \neq p_{lk}^0$, причем их разница тем больше, чем больше различие между δ_k и δ_l. Таким образом, чем больше δ_k по отношению к другим δ_l, тем в большей степени узел v_k выступает отправителем пересылаемых по сети данных.

Базовый пример СПД для экспериментов

В качестве базового примера для проведения экспериментов была взята гипотетическая сеть передачи данных, содержащая 26 узлов коммутации, расположенных, в основном, в крупных населенных пунктах Республики Татарстан. Топологическая структура этой сети представлена на рис. 1. Подчеркнем, что это только условный пример. Предполагаемый характер распределения нагрузки на сеть задается весовыми коэффициентами узлов коммутации w_k, $k=\overline{1,n}$ (приведены в скобках после их наименования), которые были выбраны примерно пропорционально численности населения в соответствующих населенных пунктах. Пропускные способности каналов и узлов подбирались под предполагаемый характер нагрузки. Узлы коммутации СПД построены на основе маршрутизаторов трех типов производительностью 20000 пакетов/сек, 3000 пакетов/сек и 1000 пакетов/сек. На рисунке они обозначены кружками соответствующего размера. Значения пропускных способностей узлов соответствуют относительно недорогим популярным моделям маршрутизаторов с учетом

их реальной (а не паспортной) производительности. Суммарная пропускная способность узлов коммутации 165000 пакетов/сек. С помощью условных обозначений на рисунке показаны также пропускные способности каналов передачи данных. Значения пропускных способностей каналов были выбраны из ряда значений пропускных способностей выделенных каналов, предоставляемых в аренду Управлением электрической связи РТ “Таттелеком”.

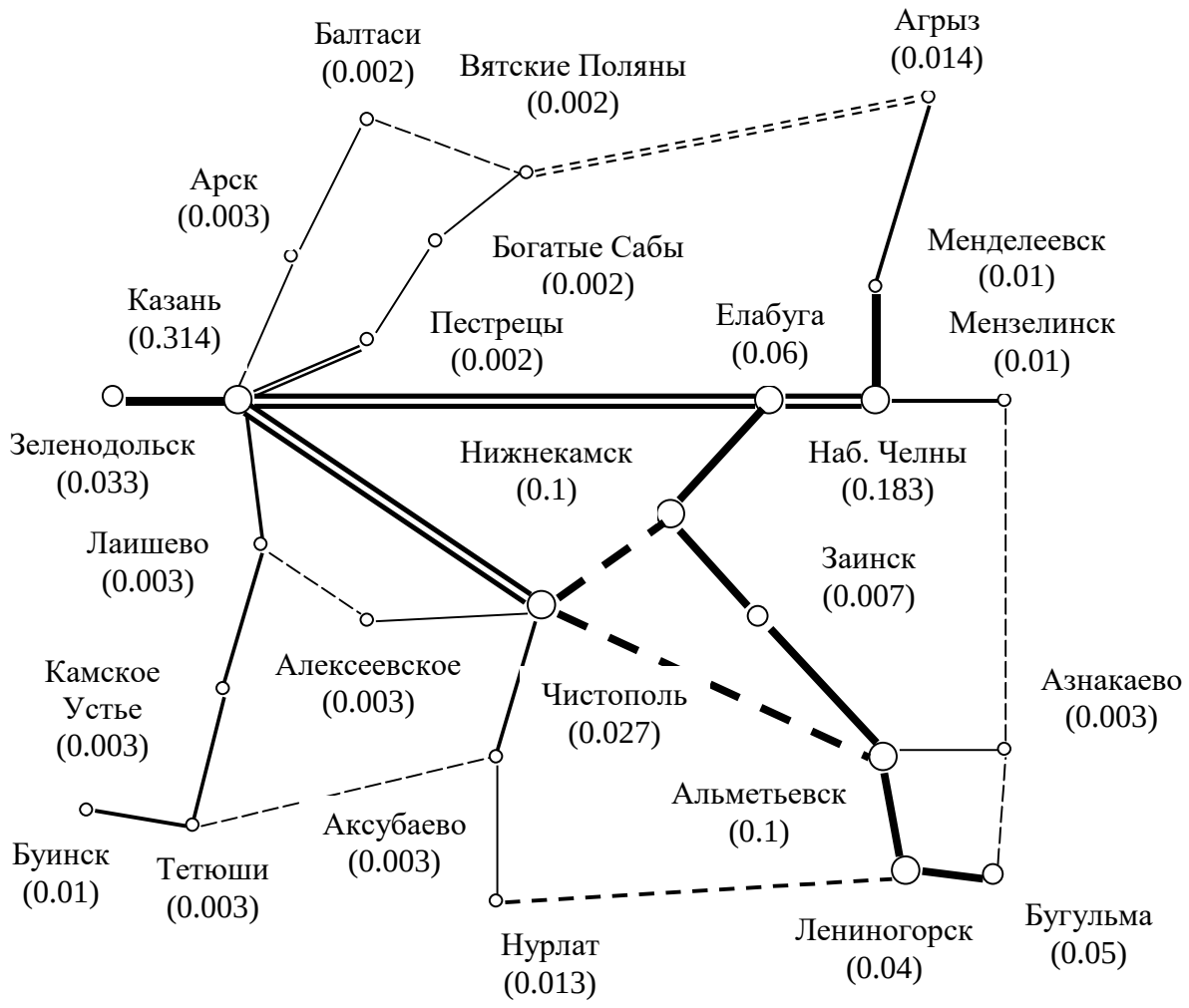

Рис. 1. Топологическая структура СПД

Условные обозначения пропускных способностей линий связи:

— 32 Кбит/с ═ 64 Кбит/с — 128 Кбит/с ▬ 1024 Кбит/с ═ 2048 Кбит/с

В процессе построения базового примера выбирались различные реалистичные по стоимости и техническим возможностям значения пропускных

способностей для узлов коммутации и каналов передачи данных. Базовый пример, рассматриваемый в настоящей работе, дал один из наилучших результатов из всех рассмотренных вариантов выбора пропускных способностей каналов и узлов для предполагаемого характера нагрузки на сеть в пределах принятых стоимостных и технических ограничений. Разумеется, при других возможностях можно было бы, вероятно, получить лучшие результаты.

Рассматривались 4 варианта топологической структуры этой сети, имеющих одно и то же множество узлов коммутации и различающихся совокупностью каналов передачи данных:

ТД - древовидная топологическая структура, множество каналов передачи данных которой представлено на рис. 1 сплошными линиями - всего 25 дуплексных каналов с суммарной пропускной способностью 28992 Кбит/сек.

ТМК - структура типа звездно-кольцевой с малым кольцом, в которой к древовидной структуре ТД добавлен канал, соединяющий Чистополь и Нижнекамск - 26 дуплексных каналов с суммарной пропускной способностью 31040 Кбит/сек.

ТБК - структура типа звездно-кольцевой с большим кольцом, в которой к древовидной структуре ТД добавлен канал, соединяющий Чистополь и Альметьевск - 26 дуплексных каналов с суммарной пропускной способностью 31040 Кбит/сек.

ТП - ячеистая структура, включающая полностью все каналы, представленные на рис. 1 - всего 34 дуплексных канала с суммарной пропускной способностью 33792 Кбит/сек.

Для проведения экспериментальных расчетов была использована созданная в ИПИ АН РТ и Казанском государственном университете система комплексного моделирования и оценки сетей передачи данных территориальных компьютерных сетей КОСМО (см. [2]). Эта система позволяет для заданных вариантов топологической структуры сети передачи данных и пропускных способностей каналов и узлов и для различных вариантов внешней нагрузки на СПД, как по характеру распределения нагрузки, так и по ее величине, а также для различных способов маршрутизации данных по сети и при различных параметрах передаваемых пакетов рассчитать оценки временных задержек на всех компонентах СПД (каналах передачи данных и узлах коммутации). Расчеты проводятся для обеих моделей компонентов СПД как систем массового обслуживания типа M/M/1 и типа M/D/1. На этой основе вычисляются оценки межузловых средних задержек при передаче пакетов по СПД, в том числе их канальные и узловые составляющие, а также оценки интегральных временных характеристик СПД - средней и максимальной задержек при передаче пакета по сети.

Оценка предельных пропускных способностей СПД и их временных характеристик

При выбранном способе моделирования нагрузки на СПД веса узлов коммутации (УК) $w=(w_1,...,w_n)$ и параметры асимметрии $\delta=(\delta_1,...,\delta_n)$ определяют характер распределения нагрузки на сеть, а параметр p_0 - ее суммарную величину. С ростом p_0, при неизменных w и δ и способе маршрутизации, нагрузка на сеть увеличивается, увеличиваются потоки передаваемых данных по каналам и узлам СПД, что приводит к росту в них временных задержек пакетов, пока потоки по отдельным каналам и узлам не достигнут их пропускных способностей. При этом происходит насыщение этих каналов и узлов, временные задержки пакетов на них становятся бесконечными, и наступает потеря надежности доставки пакетов адресатам. Суммарную нагрузку p_0 на сеть, при которой это происходит, будем называть предельной и обозначать через $\overline{p}_0$ - она характеризует предельную пропускную способность (ППС) сети при заданном характере распределения нагрузки и заданном (выбранном) способе маршрутизации, так как условие надежности доставки пакетов адресатам является обязательным условием нормального функционирования СПД.

Заметим, что для древовидной структуры ТД распределение потоков по сети определяется однозначно, т.к. из любого УК v_k в любой другой $v_l \in V$ существует единственный путь. Для топологий типа звездно-кольцевой из любого УК в любой другой УК сети существует не более двух простых путей. Для ячеистой топологии ТП, как правило, существует множество маршрутов для передачи данных из одного УК в другой, поэтому ППС таких СПД зависит также от используемой маршрутизации (распределения потоков данных по сети).

В первой серии экспериментов для различных топологий СПД и при различных способах маршрутизации для ячеистой топологии ТП изучалась зависимость средних временных задержек пакетов при передаче по сети от увеличения суммарной нагрузки p_0 на сеть при неизменном ее характере, и определялась предельная суммарная нагрузка (ППС) $\overline{p}_0$.

Для ячеистой топологии ТП методы маршрутизации определялись следующим образом. Для всех дуг $(v_i,v_j)\in U$ выбирались длины d_{ij}, и потоки данных направлялись по путям минимальной длины, т.е. поток p_{kl} из узла v_k в узел v_l передавался по кратчайшему пути. Различные методы маршрутизации различались способом выбора d_{ij} для всех дуг (каналов) сети. Использовались следующие способы маршрутизации:

- МР - в качестве d_{ij} выбираются расстояния по прямой от УК v_i до УК v_j, $(v_i, v_j) \in U$, т.е. потоки направляются по путям с минимальными расстояниями;

- МК - выбираются d_{ij}=1 для всех каналов $(v_i, v_j) \in U$, т.е. потоки направляются по путям с минимальным количеством каналов;

- МПК - длины дуг определяются пропускными способностями соответствующих каналов: $d_{ij} = 1 + c_{cp} / c_{ij}$, где c_{ij} - пропускная способность канала $(v_i, v_j) \in U$, c_{cp} - средняя пропускная способность каналов, т.е. $c_{cp} = \frac{1}{2m} \sum_{(v_i, v_j) \in U} c_{ij}$ (здесь m - число линий связи);

- МПКУ - длины дуг определяются пропускными способностями каналов и узлов: $d_{ij} = 1 + c_{cp} / c_{ij} + q_{cp} / q_j$, где q_j - пропускная способность УК $v_j \in V$, q_{cp} - средняя пропускная способность узлов, т.е. $q_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} q_j$;

- МЭ - наиболее эффективный из опробованных вариант фиксированной однопутевой маршрутизации (может быть, не самый лучший) для заданной нагрузки, который удалось подобрать опытным путем с использованием различных алгоритмов и доводки “вручную”.

Типичные результаты расчетов для базового примера с симметричной нагрузкой, характер которой определяется заданными весами узлов коммутации (см. рис. 1), приведены в таблицах 1 и 2. В табл. 1 приведены результаты при размере пакетов h=1000 бит и размере заголовка h_0=192 бит (т.е. как по протоколу TCP). В табл. 2 приведены результаты для пакетов размером h=424 бит при h_0=40 бит (пакеты протокола ATM).

В верхней части таблиц в первом столбце перечислен ряд значений величины суммарной нагрузки на сеть p_0 в Кбит/сек, и для каждого из них в соответствующей строке для топологий сети ТД, ТМК, ТБК, ТП приведены вычисленные оценки средних временных задержек пакета при передаче по сети (в секундах, включая задержки на каналах и в узлах коммутации). Для экономии места приведены результаты, полученные при моделировании компонентов СПД как СМО типа M/M/1, поскольку для M/D/1 они принципиально не отличаются, а ППС совпадают для обеих моделей. Для топологий ТМК и ТБК в таблицах приведены результаты для наилучшей маршрутизации, а для топологии ТП - при использовании соответствующих методов маршрутизации - МР, МПК, МПКУ, МЭ.

В нижней части таблиц для каждой топологии и маршрутизации в строке $\tilde{p}_0$ указаны значения суммарной нагрузки, близкие к предельной (ППС) и отличающиеся от нее меньше, чем на 10 Кбит/сек.

В последующих строках нижней части таблиц для суммарной нагрузки $\tilde{p}_0$ приведены:

$t(\tilde{p}_0)$ - средняя задержка пакета при передаче по сети;

$t_{\max}(\tilde{p}_0)$ - максимальная из средних межузловых задержек;

$\rho'(\tilde{p}_0)$ - средний коэффициент загрузки каналов, вычисленный как отношение суммарного потока по всем каналам к суммарной пропускной способности каналов;

$\rho''(\tilde{p}_0)$ - средний коэффициент загрузки узлов коммутации, вычисленный как отношение суммарного потока по всем узлам коммутации к суммарной пропускной способности УК.

Табл. 1.

p_0	ТД	ТМК	ТБК	ТП, МР	ТП,МПК	ТП,МПКУ	ТП,МЭ
500	0.007	0.007	0.007	0.012	0.006	0.006	0.006
1000	0.008	0.008	0.007	0.016	0.006	0.006	0.006
1500	0.009	0.009	0.008	0.035	0.007	0.007	0.007
2000	0.010	0.010	0.009	∞	0.007	0.008	0.007
2500	0.013	0.011	0.010	∞	0.008	0.009	0.008
3000	0.020	0.014	0.011	∞	0.009	0.010	0.009
3500	∞	0.018	0.014	∞	0.011	0.013	0.010
4000	∞	0.032	0.020	∞	0.015	0.024	0.012
4500	∞	∞	∞	∞	0.026	∞	0.014
5000	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.018
5500	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.032
6000	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.375
$\tilde{p}_0$	3210	4220	4340	1640	4700	4170	6020
$t(\tilde{p}_0)$	0.532	0.496	0.375	0.225	0.317	0.369	1.291
$t_{\max}(\tilde{p}_0)$	1.270	2.449	30.163	6.314	7.010	1.636	51.160
$\rho'(\tilde{p}_0)$	0.426	0.512	0.463	0.157	0.465	0.403	0.602
$\rho''(\tilde{p}_0)$	0.099	0.128	0.119	0.044	0.129	0.114	0.167

Приведенные результаты показывают, что ячеистая топология ТП имеет существенные преимущества перед древовидной и звездно-кольцевыми топологиями. Так, суммарная пропускная способность КПД для топологии ТП (33792 Кбит/сек) всего на 16.5% больше суммарной пропускной способности каналов для древовидной топологии ТД (28992 Кбит/сек), в то время как даже достигнутая (возможно не максимальная) ППС ячеистой сети почти на 90% выше ППС древовидной сети ТД в первом примере и более чем вдвое - во втором. Хотя и в меньшей степени, то же самое касается и СПД с топологией типа звездно-кольцевой. В рассмотренных примерах суммарная пропускная способность каналов для топологии ТП лишь на 9% больше суммарной пропускной способности каналов топологий ТМК и ТБК (31040 Кбит/сек), в то время как ППС ячеистой сети ТП более чем на 40% превышает ППС ТМК и ТБК в первом

примере, а во втором примере в 2.23 раза больше, чем у ТМК и в 1.37 раза больше, чем у ТБК.

Табл. 2.

p_0	ТД	ТМК	ТБК	ТП, МР	ТП,МПК	ТП,МПКУ	ТП,МЭ
500	0.003	0.003	0.003	0.006	0.003	0.003	0.003
1000	0.004	0.004	0.003	0.007	0.003	0.003	0.003
1500	0.004	0.004	0.004	0.011	0.003	0.003	0.003
2000	0.005	0.005	0.004	∞	0.003	0.004	0.003
2500	0.006	0.006	0.004	∞	0.004	0.004	0.004
3000	∞	∞	0.005	∞	0.004	0.004	0.004
3500	∞	∞	0.006	∞	0.005	0.005	0.005
4000	∞	∞	0.007	∞	0.006	0.006	0.005
4500	∞	∞	0.009	∞	0.007	0.011	0.006
5000	∞	∞	∞	∞	0.011	∞	0.007
5500	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.009
6000	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.013
6500	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.030
$\tilde{p}_0$	2980	2980	4860	1840	5270	4670	6640
$t(\tilde{p}_0)$	0.649	0.648	0.089	0.114	0.188	0.359	0.137
$t_{\max}(\tilde{p}_0)$	1.778	1.778	6.819	3.254	4.194	1.229	2.766
$\rho'(\tilde{p}_0)$	0.353	0.323	0.462	0.154	0.458	0.403	0.581
$\rho''(\tilde{p}_0)$	0.193	0.190	0.282	0.103	0.304	0.270	0.386

Заметим, что несмотря на низкие коэффициенты средней загрузки каналов и узлов, для древовидной структуры ТД предельные результаты не могут быть улучшены за счет перераспределения потоков. То же относится к СПД со звездно-кольцевой структурой, в то время как для ТП, может быть, возможно улучшение ППС за счет применения более эффективной маршрутизации, о чем косвенно и говорит относительно невысокая средняя загрузка каналов. Приведенные результаты типичны - в некоторых других рассмотренных реалистичных вариантах задания пропускных способностей каналов, близких к приведенным, ППС для СПД с ячеистой топологией ТП более чем в три раза превышала ППС для древовидной топологии ТД и обеих звездно-кольцевых ТМК и ТБК.

Отметим также, что при одинаковой нагрузке средние временные задержки в ячеистой сети существенно меньше, чем в древовидной сети или в сети типа звездно-кольцевой.

Как показывают приведенные в табл. 1 и 2 данные, простые методы маршрутизации на ТП, как правило, работают неудовлетворительно, поскольку распределение потоков может быть существенно улучшено. Особенно это относится к МК и МР. В таблицах даже не приведены данные для маршрутизации МК, показавшей особенно плохие результаты. Так, например, для первого варианта выбора размеров пакета и заголовка ППС

сети с топологией ТП и с использованием маршрутизации МК составила всего около 450 Кбит/сек. Такое же положение имело место и во всех других экспериментах.

Из приведенных результатов видно, что при выбранных размерах пакетов и заголовка и при выбранном характере нагрузки линии связи загружены значительно сильнее, чем узлы, и даже для маленьких пакетов АТМ узлы остаются достаточно слабо загруженными. Поэтому нет смысла повышать производительность УК. Узким местом являются каналы, и прежде всего, каналы на периферии. Именно за счет повышения их пропускных способностей может быть улучшена ППС сети при заданном характере распределения нагрузки.

Влияние характера распределения нагрузки

Во второй серии экспериментов изучалось поведение предельной пропускной способности (ППС) сети при изменении характера нагрузки. Изменение характера нагрузки моделировалось как за счет изменения весовых коэффициентов *w*, так и при различных видах асимметричного характера нагрузки за счет изменения параметров δ.

Были рассмотрены, как основные, следующие 4 варианта задания характера распределения симметричной нагрузки с помощью весовых коэффициентов *w*:

I. Базовый пример - весовые коэффициенты w_k, $k=\overline{1,n}$, взяты примерно пропорционально численности населения (см. рис. 1).

II. Весовые коэффициенты УК получены возведением в квадрат весов базового примера I с последующей нормировкой, обеспечивающей выполнение условия $\sum_{k=1}^{n} w_k = 1$. Заметим, что при этом резко возрастает дифференциация узлов - основной объем данных передается между крупными пунктами, остальные слабее участвуют в формировании суммарного траффика.

III. Весовой коэффициент УК Казань и всех других УК, кроме расположенных на большом кольце (Елабуга, Нижнекамск, Заинск, Альметьевск, Чистополь) уменьшены на 20%, веса УК на большом кольце взяты одинаковыми.

IV. Веса всех УК на большом кольце, включая Казань, взяты одинаковыми, веса остальных УК оставлены как в базовом примере.

Для каждого варианта задания характера нагрузки с помощью весовых коэффициентов *w* рассмотрены случай симметричной нагрузки (все δ_k одинаковы, $k=\overline{1,n}$) и три варианта задания асимметричной нагрузки с помощью параметров δ:

A_1. $\delta_k = w_k$, $k = \overline{1,n}$, т.е. потоки от крупных узлов к более мелким узлам преобладают над потоками от мелких к крупным. Заметим, что обратный случай, когда $\delta_k = 1/w_k$, $k = \overline{1,n}$, даст такой же результат с точки зрения ППС, т.к. представляет собой его полное зеркальное отражение, а каналы СПД имеют одинаковую пропускную способность в обеих направлениях.

Действительно, если $\delta_k = w_k$, то $\alpha_{kl} = w_k / (w_k + w_l)$. Если же $\delta_k = 1/w_k$, то $\alpha'_{kl} = \frac{1}{w_k} / (\frac{1}{w_k} + \frac{1}{w_l}) = \frac{w_l}{w_k + w_l} = \alpha_{lk}$ и $\alpha'_{lk} = \alpha_{kl}$, т.е. для каждой пары узлов $v_k, v_l \in V$ при одной и той же величине $p^0_{kl} + p^0_{lk}$ интенсивности обмена данными между ними, доли передаваемых и принимаемых данных меняются друг с другом.

A_2. Узлы коммутации Казань, Наб.Челны, Альметьевск - самые крупные отправители ($\delta_k = 5$); у других УК, расположенных на большом кольце, $\delta_k = 2$, а у остальных узлов $\delta_k = 1$.

A_3. В СПД выделяются отдельные крупные узлы - преимущественно отправители данных: Казань, Наб.Челны, Альметьевск ($\delta_k = 5$), и отдельные крупные узлы - преимущественно получатели данных: Чистополь, Елабуга, Заинск ($\delta_k = 0.2$), для остальных узлов $\delta_k = 1$.

В табл. 3 приведены результаты экспериментальных расчетов и найденные ППС для этих вариантов нагрузки на сеть для пакетов размером 1000 бит с заголовком 192 бит.

Из приведенных результатов видно, что хотя изменение характера нагрузки может приводить как к увеличению ППС, так и к ее уменьшению, для основных случаев симметричной нагрузки наибольшую стабильность проявила, как и следовало ожидать, СПД с ячеистой топологией ТП, и там, где это было возможно, она дала увеличение ППС. Наихудшим образом проявили себя древовидная топология ТД и звездно-кольцевая топология с малым кольцом ТМК. Там, где ТП дала увеличение ППС, топологии ТД и ТМК дали ухудшение результатов, или они остались на прежнем уровне.

Звездно-кольцевая топология с большим кольцом ТБК в одном случае (вариант II) дала уменьшение ППС по сравнению с вариантом нагрузки I, в двух других случаях (варианты III и IV) - увеличение ППС, при этом увеличение ППС у ТБК произошло в меньшей пропорции, чем у ТП.

Эксперименты показывают также весьма существенное ухудшение ППС при асимметричном характере нагрузки по сравнению с соответствующим симметричным вариантом для всех топологий. И хотя у топологии ТП больше возможностей справиться с асимметричным характером нагрузки за счет перераспределения потоков, ухудшение ППС у ТП и ТБК

по сравнению с соответствующим симметричным вариантом нагрузки произошло примерно в одинаковых пропорциях, хотя в одном случае (вариант III) уменьшение ППС у ТП произошло в существенно большей пропорции, чем у ТБК. Правда, все равно ППС для ТП остается существенно выше, чем для ТБК (и, тем более, ТД и ТМК).

Табл. 3.

Выбор w	Выбор δ	ТД	ТМК	ТБК	ТП, МЭ
I	симметр.	3210	4220	4340	6020
	A_1	2270	2270	2270	3270
	A_2	2690	2960	2960	4080
	A_3	2690	3240	3240	4480
II	симметр.	2430	2430	2430	6470
	A_1	1250	1250	1250	3320
	A_2	1380	1510	1510	4020
	A_3	1570	1570	1570	4160
III	симметр.	3200	3820	4950	7510
	A_1	2600	2830	2830	4040
	A_2	2720	3350	3770	5190
	A_3	2650	3260	4380	6240
IV	симметр.	3210	3480	4620	6410
	A_1	2420	2420	2420	3500
	A_2	2750	3250	3310	4570
	A_3	2810	3280	4370	5730

Отметим, однако, что такие результаты получаются при применении в СПД с ячеистой топологией ТП эффективного метода маршрутизации потоков, дающего наилучшее распределение потоков, свое для каждого варианта внешней нагрузки, что лишний раз подчеркивает нетривиальность и важность эффективного решения задачи маршрутизации для сетей с ячеистой топологией.

Влияние выбора размера пакета

Пакеты данных, передаваемые по сети, состоят из заголовка и концевика, содержащих служебные данные, необходимые для сервисов сети, и из области собственно данных. Размер заголовка обычно определяется выбранным протоколом. Многими протоколами допускается выбор в достаточно широких пределах размера области данных.

Как показывают используемые формулы для оценки временных задержек на каналах и в узлах (см., например, формулы (1)-(4) в [1]), задержка на каналах прямо пропорциональна размеру пакета. При уменьшении размера пакета h и при той же интенсивности потока (в битах) по ка-

налу, задержка соответственно уменьшается. Для задержек в узлах картина обратная. Чем меньше размер пакета, тем больше, при той же величине потока в битах через УК, необходимо обрабатывать пакетов, и тем больше задержка. Таким образом, в общем случае при одной и той же нагрузке на СПД и при одном и том же размере заголовка - чем меньше размер пакета, тем больше объем дополнительно переносимых сетью служебных данных, больше задержки в узлах и нагрузка на них, но меньше задержки на КПД. Чем больше размер пакета, тем меньше дополнительных служебных данных, меньше задержки в УК и нагрузка на них, но больше задержки на каналах. Поэтому для заданной сети при заданном характере нагрузки на сеть и ее величине может быть поставлен вопрос об оптимальном размере пакета с точки зрения минимизации средней временной задержки при передаче пакета по сети.

С другой стороны, поскольку увеличение размера пакета (области данных) при заданной величине заголовка уменьшает объем дополнительно передаваемых служебных данных по сети, то это приводит к увеличению ее пропускной способности, и наоборот.

Для выявления влияния размера пакета на ППС СПД и ее временные характеристики были проведены эксперименты с различными размерами пакетов для двух базовых размеров заголовка $h_0 = 192$ бит (как в протоколе TCP) и $h_0 = 40$ бит (как по протоколу Frame Relay). Некоторые результаты экспериментов для базового примера СПД (см. рис. 1) с топологиями ТД, ТБК и ТП приведены в табл. 4 (для $h_0 = 192$ бит) и в табл. 5 (для $h_0 = 40$ бит).

Табл. 4.

Размер пакета	ТД			ТБК				ТП МЭ			
	ППС	$t^{(1)}$	$t^{(2)}$	ППС	$t^{(1)}$	$t^{(2)}$	$t^{(3)}$	ППС	$t^{(1)}$	$t^{(2)}$	$t^{(3)}$
400	1610	∞	∞	2790	**0.005**	∞	∞	3920	**0.004**	0.008	∞
500	2300	**0.008**	∞	3310	**0.005**	**0.010**	∞	4590	0.005	**0.006**	∞
800	3020	0.009	0.055	4080	0.007	**0.010**	∞	5660	0.006	0.008	0.021
1000	3210	0.010	**0.020**	4340	0.008	0.011	∞	6020	0.007	0.009	**0.020**
1500	3470	0.014	0.022	4680	0.012	0.015	∞	6500	0.010	0.013	0.023
2000	3600	0.019	0.027	4860	0.016	0.019	∞	6740	0.014	0.016	0.027
4000	3790	0.035	0.049	5110	0.030	0.037	**0.136**	7170	0.026	0.031	0.049
8000	3880	0.069	0.095	5240	0.058	0.072	0.193	7270	0.051	0.060	0.094
12000	3920	0.103	0.140	5290	0.087	0.107	0.271	7330	0.076	0.090	0.138
16000	3930	0.137	0.186	5310	0.116	0.141	0.351	7360	0.102	0.119	0.183
32000	3960	0.272	0.386	5340	0.230	0.281	0.674	7410	0.202	0.238	0.362
64000	3970	0.542	0.732	5360	0.459	0.560	1.323	7430	0.403	0.474	0.720

Для каждого размера пакета приведены предельные пропускные способности СПД с соответствующей топологией и средние задержки при

передаче пакета по сети: $t^{(1)}$ - при нагрузке p_0=2000 Кбит/сек, $t^{(2)}$ - при нагрузке p_0=3000 Кбит/сек, $t^{(3)}$ - при нагрузке p_0=5000 Кбит/сек. Для сети с топологией ТП временные задержки получены при использовании маршрутизации МЭ. Полужирным шрифтом в таблицах 4 и 5 выделены минимальные средние задержки.

Табл. 5.

Размер пакета	ТД			ТБК				ТП МЭ			
	ППС	$t^{(1)}$	$t^{(2)}$	ППС	$t^{(1)}$	$t^{(2)}$	$t^{(3)}$	ППС	$t^{(1)}$	$t^{(2)}$	$t^{(3)}$
80	310	∞	∞	700	∞	∞	∞	700	∞	∞	∞
100	460	∞	∞	1100	∞	∞	∞	1110	∞	∞	∞
200	1240	∞	∞	2950	**0.003**	∞	∞	2960	**0.002**	∞	∞
300	2020	0.016	∞	4650	**0.003**	**0.004**	∞	4770	0.003	**0.003**	∞
424	2980	**0.005**	∞	4860	0.004	0.005	∞	6640	0.003	0.004	**0.007**
600	3710	0.006	**0.009**	5010	0.005	0.006	0.073	6950	0.005	0.005	0.008
800	3780	0.008	0.011	5100	0.007	0.008	**0.029**	7080	0.006	0.007	0.011
1000	3820	0.009	0.013	5160	0.008	0.010	0.030	7160	0.007	0.008	0.013
2000	3900	0.018	0.024	5260	0.015	0.018	0.047	7300	0.013	0.016	0.024
4000	3940	0.035	0.047	5320	0.029	0.036	0.087	7380	0.026	0.030	0.046
8000	3960	0.069	0.092	5350	0.058	0.071	0.168	7410	0.051	0.060	0.091
12000	3970	0.102	0.138	5350	0.087	0.106	0.249	7430	0.076	0.089	0.135

Из приведенных результатов видно, что оптимальный с точки зрения минимизации средней задержки размер пакета существенно снижает предельную пропускную способность сети, при этом с ростом нагрузки на сеть оптимальный размер пакета смещается в сторону больших значений. В то же время размеры пакета, обеспечивающие близкую к максимуму ППС, приводят к весьма значительному росту временных задержек. Таким образом, не существует однозначно наилучшего размера пакета. Эффективный выбор размера пакета некритичен и возможен в достаточно широких пределах. Требуемая предельная пропускная способность сети определяет нижнюю границу для выбора размера пакета, а требования к величине временных задержек - верхнюю границу. Сам выбор размера пакета определяется компромиссом между этими двумя требованиями. Кроме того, необходимо учитывать, что с ростом размера пакета возрастает вероятность необходимости повторной передачи пакетов, особенно на многих отечественных линиях связи. А значит, растут задержки и падает пропускная способность сети.

Для рассматриваемого примера сети с топологией ТП можно считать достаточно эффективным выбор размера пакета при средней нагрузке на сеть от 1000 до 4000 бит для первого примера (с заголовком 192 бит) и от 400 до 2000 бит для второго примера (с заголовком 40 бит). Меньшие размеры пакетов, хотя и приводят к меньшим задержкам, но существенно

снижают ППС сети, большие размеры пакетов практически не приводят к увеличению ППС сети, но существенно (пропорционально) увеличивают задержки. Отметим также, что выбор во втором примере размера пакета в 424 бит, как в протоколе АТМ, является практически наилучшим с точки зрения минимизации временной задержки (особенно на древовидной сети), однако существенно снижает (от 10 до 25%) верхний предел ППС.

Заключение

Проведенные эксперименты показали характер зависимости пропускной способности сети передачи данных и ее временных характеристик от топологической структуры сети, характера и величины внешней нагрузки на сеть, выбранных способа маршрутизации и параметров пакетов. Ячеистая топология СПД имеет несомненные потенциальные преимущества перед распространенными в нашей стране древовидными и близкими к ним топологиями типа звездно-кольцевой. Она позволяет за счет относительно небольших дополнительных затрат существенно повысить предельную пропускную способность сети, а также является более устойчивой к изменению характера нагрузки. Однако, простые методы маршрутизации для ячеистых сетей малоэффективны. Только за счет разработки и применения более эффективных методов маршрутизации (особенно, настраивающихся на изменение характера нагрузки) можно существенно повысить предельную пропускную способность СПД и улучшить ее временные характеристики. Проведенные эксперименты показали также, что хотя выбор размера пакетов, передаваемых по сети, не является особо критичным и возможен в достаточно широких пределах, тем не менее существенно влияет на предельную пропускную способность сети и ее временные характеристики.

Литература

1. Гостев В.М., Хабибуллин Р.Ф. О некоторых моделях и методах для оценки временных характеристик сетей передачи данных территориальных компьютерных сетей // Исследования по информатике. Вып. 2. - Казань: Отечество, 2000. - С. 133-142.

2. Морозов А.А., Хабибуллин Р.Ф. О системе моделирования и оценки сетей передачи данных // Тр. Респ. научно-практ. конф. “Интеллектуальные системы и информационные технологии”. - Казань: Отечество, 2001. - С. 169-170.