

О НЕКОТОРЫХ МОДЕЛЯХ И МЕТОДАХ ОЦЕНКИ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

В.М. Гостев, Р.Ф. Хабибуллин

Среди характеристик сетей передачи данных (СПД) важнейшее место занимают пропускная способность (производительность) СПД и величины задержек пакетов (протокольных блоков сетевого уровня) и абонентских сообщений при передаче по СПД. Задержка определяется как интервал времени между моментом поступления пакета или сообщения на вход какого-либо узла коммутации (УК) сети передачи данных (УК-источник) и моментом появления его на выходе УК для выдачи из сети (УК-адресат). Для сетей с коммутацией пакетов определяющими являются задержки при передаче пакетов по сети, и мы здесь ограничимся оценкой именно этих задержек.

Задержка пакета в СПД (см., например, [1–3]) складывается из его задержек во всех транзитных элементах – каналах передачи данных (КПД) и узлах коммутации – на пути следования пакета. Основными составляющими задержки пакета в КПД являются время ожидания в очереди на передачу и собственно время передачи пакета. Задержка пакета в УК состоит из времени ожидания в очереди на обработку и времени обработки пакета (анализа заголовка, выбора маршрута и т.д.) процессором УК.

Рассмотрим некоторые модели и методы, с помощью которых можно оценить временные задержки пакетов как в отдельных компонентах СПД, так и в сети в целом. Эти модели и методы можно использовать для оценки временных характеристик как проектируемых, так и реально функционирующих СПД.

Оценка временных задержек в компонентах СПД

Будем считать, что узлы коммутации и каналы передачи данных СПД являются абсолютно надежными, то есть не будем рассматривать зависимость задержек пакетов от ошибок и отказов компонентов СПД. Разумеется, это – в той или иной степени нереалистичное – предположение дает заниженные показатели, но они, тем не менее, могут служить достаточным ориентиром при проектировании и оценке функционирования сети.

Поскольку временные интервалы между поступлениями запросов в СПД на передачу информации и объемы передаваемых данных (размеры абонентских сообщений) имеют случайный характер, для оценки величин задержек пакетов и временных характеристик СПД обычно применяются (см. [1-11]) модели и методы теории массового обслуживания.

При моделировании СПД и оценке задержек в каналах передачи данных каждый отдельный КПД рассматривается как система массового обслуживания (СМО) с одним обслуживающим прибором (собственно КПД с пропускной способностью c бит/с) и одной очередью заявок (запросов на обслуживание) неограниченного объема.

Если КПД рассматривается как СМО типа $M/M/1$, то предполагается, что входной поток передаваемых по КПД сообщений – пуассоновский с интенсивностью λ сообщений/с; длина сообщений рассматривается как непрерывная случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону со средним значением $1/\mu$ бит. В этом случае при фиксированном значении c пропускной способности канала время обслуживания – время передачи сообщения по КПД – также представляет собой экспоненциально распределенную случайную величину со средним $1/\mu c$. Тогда средняя задержка сообщений в отдельном КПД выражается следующим образом:

$$\tau_M = \frac{1}{\mu c - \lambda} = \frac{1}{\mu(c - f)}, \quad (1)$$

где $f = \lambda / \mu$ – средняя величина потока по КПД в бит/с. Здесь должно также выполняться условие $f < c$ допустимости потока через КПД.

Поскольку в реальных СПД с коммутацией пакетов размер пакета, как правило, является величиной фиксированной, то можно рассматривать КПД как СМО типа M/D/1. В этом случае считается, что входной поток – пуассоновский с интенсивностью λ пакетов/с, а время обслуживания постоянно, и для пакетов – сообщений постоянной длины $1 / \mu$ – равно $1 / \mu c$. Тогда среднее время задержки пакетов определяется выражением (см., например, [3, 5]):

$$\tau_D = \frac{1}{2\mu c} + \frac{1}{2(\mu c - \lambda)} = \frac{1}{2\mu} \left[\frac{1}{c} + \frac{1}{c - f} \right]. \quad (2)$$

Нетрудно увидеть, что $\tau_D / \tau_M = 1 - \rho / 2$, где $\rho = \lambda / \mu c$ – средняя нагрузка на канал, или $\tau_D = (1 - \rho / 2) \tau_M$. Отсюда следует, что чем меньше средняя нагрузка, тем меньше различие величин средних задержек, даваемых моделями, и для допустимой нагрузки $0 \leq \rho < 1$ выполняется $0.5\tau_M < \tau_D \leq \tau_M < 2\tau_D$, т.е. оценка задержки по M/M/1 не более, чем в два раза больше оценки задержки по M/D/1, и, соответственно, оценка задержки по M/D/1 не менее половины задержки по M/M/1. Например, при $\rho = 0.1$ $\tau_D = 0.95\tau_M$, при $\rho = 0.5$ $\tau_D = 0.75\tau_M$, а при $\rho = 0.8$ $\tau_D = 0.6\tau_M$.

Для оценки задержек пакетов в каждом отдельном УК может быть использован аналогичный подход.

Если основываться на модели M/M/1, т.е. считать, что входной поток пакетов на обработку процессором УК – пуассоновский с интенсивностью λ , а время обработки рассматривать как непрерывную случайную величину, распределенную по экспоненциальному закону со средним

значением $1/q$, тогда средняя задержка пакетов в отдельном УК выразится величиной

$$\theta_M = \frac{1}{q - \lambda} = \frac{1}{q - \mu g}, \quad (3)$$

где $g = \lambda / \mu$ – средняя величина потока через УК в бит/с. Здесь также должно выполняться условие допустимости потока $g < q / \mu$.

Поскольку обработка пакетов в УК заключается обычно в выполнении операций, одинаковых для всех пакетов независимо от их размера, то можно считать, что время обработки является постоянным для всех пакетов и зависит только от производительности процессора. Поэтому можно рассматривать отдельный процессор УК как систему M/D/1, на вход которой поступает пуассоновский поток с интенсивностью λ , а время обслуживания является постоянным, равным $1/q$ (следовательно, интенсивность обслуживания равна q пакетов в секунду). Тогда средняя задержка пакетов в отдельном УК может быть вычислена как

$$\theta_D = \frac{1}{2q} + \frac{1}{2(q - \lambda)} = \frac{1}{2q} + \frac{1}{2(q - \mu g)}. \quad (4)$$

Отметим, что как и для задержек на каналах, здесь также имеет место $\theta_D = (1 - \rho / 2) \theta_M$, где $\rho = \mu g / q$ – средняя нагрузка на УК, и для $0 \leq \rho < 1$ имеет место $0.5 \theta_M < \theta_D \leq \theta_M < 2 \theta_D$.

Для оценки задержек в компонентах СПД могут быть использованы и другие модели теории массового обслуживания (см., например, [2,3]), однако представляется, что рассмотренных моделей достаточно для оценки временных характеристик СПД в первом приближении при проектировании и оценке функционирования СПД. Будем, как и другие авторы [1–11], использовать выражения (1) – (4) для вычисления средних задержек в отдельных элементах СПД (КПД, УК) при оценке задержек пакетов при передаче по СПД.

Оценка межузловых средних временных задержек при передаче по СПД

Будем считать, что топология СПД задается с помощью графа $G=(V,U)$, где множество вершин $V=\{v_1,...,v_n\}$ определяет множество узлов коммутации СПД, а множество дуг U определяет множество каналов передачи данных на дуплексных линиях связи. Считаем, что 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 $(v_j, v_i) \in U$. Пусть заданы также пропускные способности КПД $C = (c_{ij})$, где c_{ij} – пропускная способность (бит/с) канала $(v_i, v_j) \in U$, $c_{ij} = 0$, если $(v_i, v_j) \notin U$.

Также будем считать, что для каждого УК $v_j \in V$ задана производительность (пропускная способность) q_j – интенсивность обслуживания, измеряемая количеством обрабатываемых пакетов в секунду.

Обычно предполагается, что трафик из v_i в v_j , поступающий в СПД из внешних источников, представляет собой пуассоновский процесс со средним значением γ_{ij} сообщений/пакетов в секунду, и $\gamma_{ii} = 0$ для $i = 1, ..., n$. Служебный трафик не учитывается. Нам будет удобнее оперировать матрицей нагрузки $P^0 = (p_{ij}^0)$ где p_{ij}^0 – средний поток данных из v_i в v_j в бит/с, порожденный внешними обращениями к СПД, $i, j = 1, ..., n$, и $p_{ii}^0 = 0$. Будем считать, что размеры всех пакетов, передаваемых по СПД, являются одинаковыми и равными $1/\mu$ бит, причем в размер пакета входит размер заголовка h_0 бит, и межузловые потоки пакетов являются пуассоновскими с интенсивностями

$$\gamma_{ij} = p_{ij}^0 / \left(\frac{1}{\mu} - h_0 \right) = \frac{\mu p_{ij}^0}{1 - \mu h_0}, \quad i, j = 1, ..., n.$$

Тогда для любых $v_i, v_j \in V$ фактический битовый поток из v_i в v_j с учетом заголовков пакетов составит

$$p_{ij} = \gamma_{ij} \frac{1}{\mu} = \frac{p_{ij}^0}{1 - \mu h_0}; \quad i, j = 1, \dots, n.$$

Обозначим матрицу межузловых потоков через $P=(p_{ij})$ и суммарный поток, переносимый сетью $p = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij}$.

Далее будем предполагать, что в СПД используется фиксированная однопутевая маршрутизация. Пусть маршруты передачи данных в СПД заданы с помощью матрицы маршрутизации $R=(r_{ij})$, где r_{ij} задает номер вершины (УК), в которую надо посылать пакет из УК v_i , если он предназначен (адресован) для УК v_j .

Будем предполагать, что матрица R задана корректно, т.е. любой ее j -й столбец определяет дерево путей в вершину v_j (дерево доставки в v_j) из всех других вершин сети, и распределение потоков $P=(p_{ij})$ по СПД осуществляется в соответствии с матрицей маршрутизации R .

Задание топологии СПД, матрицы потоков P и маршрутов передачи данных однозначно определяет средние потоки через все компоненты СПД. Обозначим через f_{ij} поток данных через канал передачи данных $(v_i, v_j) \in U$, а через g_j – поток данных через узел коммутации $v_j \in V$. Знание величин этих потоков позволяет оценить временные задержки.

Обозначим через τ_{ij} среднюю задержку в канале $(v_i, v_j) \in U$, а через θ_j среднюю задержку в УК $v_j \in V$. Если КПД и УК рассматриваются как системы типа М/М/1, то при условии допустимости потоков $f_{ij} < c_{ij}$, $g_j < q_j / \mu$, согласно (1) для КПД и (3) для УК получаем

$$\tau_{ij} = \frac{1}{\mu(c_{ij} - f_{ij})}, \quad (v_i, v_j) \in U; \quad \theta_j = \frac{1}{q_j - \mu g_j}, \quad j = 1, \dots, n, \quad (5)$$

а если КПД и УК рассматриваются как системы типа M/D/1, то согласно (2) для КПД и (4) для УК получаем

$$\tau_{ij} = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{1}{c_{ij}} + \frac{1}{c_{ij} - f_{ij}} \right), (v_i, v_j) \in U; \quad \theta_j = \frac{1}{2q_j} + \frac{1}{2(q_j - \mu g_j)}, j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Теперь можно оценить межузловые средние задержки пакетов при передаче по СПД следующим образом.

Обозначим через M_{kl} маршрут передачи данных из УК $v_k \in V$ в УК $v_l \in V$, $v_k \neq v_l$. Этот маршрут представляет собой некоторую последовательность дуг (КПД) из множества U и проходит через некоторое подмножество вершин (узлов коммутации, включая начальный и конечный УК маршрута) из V . Принадлежность КПД $(v_i, v_j) \in U$ маршруту M_{kl} , будем обозначать через $(v_i, v_j) \in M_{kl}$, а принадлежность маршруту M_{kl} УК $v_j \in V$ — через $v_j \in M_{kl}$.

Если считать, что задержки пакета на каналах и в узлах коммутации являются независимыми случайными величинами, тогда межузловая средняя задержка при передаче пакета из УК $v_k \in V$ в УК $v_l \in V$, $v_k \neq v_l$, по маршруту M_{kl} — обозначим ее через t_{kl} — может быть взята равной сумме межузловой средней задержки пакета во всех каналах передачи данных маршрута M_{kl}

$$t'_{kl} = \sum_{(v_i, v_j) \in M_{kl}} \tau_{ij} \quad (7)$$

и межузловой средней задержки пакета во всех узлах коммутации (включая начальный и конечный)

$$t''_{kl} = \sum_{v_j \in M_{kl}} \theta_j. \quad (8)$$

Таким образом, межузловая средняя задержка на маршруте M_{kl}

$$t_{kl} = t'_{kl} + t''_{kl}. \quad (9)$$

Хотя предположение о независимости задержек во всех транзитных элементах маршрута не всегда соответствует действительности, при некоторых достаточно жестких дополнительных предположениях оно выполняется (см., например, [1–3,11]). Так, в [1] задача определения средней временной задержки сообщений при передаче по СПД решается при достаточно жестких предположениях, и в частности, без учета задержек в УК. Каналы передачи данных рассматриваются как СМО типа М/М/1. При этих предположениях на основе результатов для экспоненциальных сетей массового обслуживания [4] доказана справедливость выражения для межузловой средней задержки сообщений (7). Непосредственное применение такого подхода при моделировании каналов как систем М/D/1, строго говоря, является некорректным, поскольку результаты [4] в этом случае неприменимы. Нам неизвестны также результаты, подтверждающие справедливость (8) хотя бы в частных случаях. Тем не менее, оценки (7) – (9) являются достаточно естественными, и представляется, что для практических целей они вполне могут быть приняты в первом приближении.

Вычисление оценок межузловых средних задержек отдельно по каналам и отдельно по УК позволит сравнить их по величине, чтобы определить, что именно – задержки на каналах или задержки в узлах – оказывают определяющее влияние на величину межузловой средней задержки.

Поскольку оценить задержки в каналах и в узлах коммутации можно как на основе модели М/М/1, так и на основе модели М/D/1, то для оценки канальной составляющей (7) и узловой составляющей (8) межузловых средних задержек t_{kl} получаем два способа: используя (5) для вычисления задержек τ_{ij} и θ_j для М/М/1 или (6) для М/D/1.

Оценка интегральных временных характеристик СПД

При известных оценках межузловых средних задержек на маршрутах между всеми узлами коммутации СПД можно оценить среднюю задержку пакета при передаче по сети. Обозначим ее через t . Поскольку поток между

v_k и v_l составляет долю p_{kl}/p глобального потока $p = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij}$, то

$$t = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{p_{kl}}{p} t_{kl}.$$

При этом средняя межузловая задержка (средняя задержка пакета при передаче по сети) складывается из средней межузловой задержки в каналах передачи данных

$$t' = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n p_{kl} t'_{kl} \quad (10)$$

и средней межузловой задержки в узлах коммутации

$$t'' = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n p_{kl} t''_{kl}. \quad (11)$$

Введем следующие обозначения:

$$K = \{(k,l): k = 1, \dots, n, \quad l = 1, \dots, n\};$$

$K_{ij} = \{(k,l): (k,l) \in K, (v_i, v_j) \in M_{kl}\}$ – множество тех двоек $(k,l) \in K$ (межузловых потоков p_{kl}), для которых маршрут M_{kl} проходит через заданный КПД $(v_i, v_j) \in U$;

$K_j = \{(k,l): (k,l) \in K, v_j \in M_{kl}\}$ – множество тех двоек $(k,l) \in K$ (межузловых потоков p_{kl}), для которых маршрут M_{kl} проходит через заданный узел $v_j \in V, j = 1, \dots, n$.

Как показано в [1], поскольку из (10) и (7) следует

$$t' = \frac{1}{P} \sum_{(k,l) \in K} p_{kl} \sum_{(v_i, v_j) \in M_{kl}} \tau_{ij},$$

то, изменяя порядок суммирования, получаем

$$t' = \frac{1}{P} \sum_{(v_i, v_j) \in U} \tau_{ij} \sum_{(k,l) \in K_{kl}} p_{kl}.$$

Так как $\sum_{(k,l) \in K_{kl}} p_{kl} = f_{ij}$ (суммарный поток по всем маршрутам, проходящим через КПД $(v_i, v_j) \in U$), то в итоге получаем

$$t' = \frac{1}{P} \sum_{(v_i, v_j) \in U} f_{ij} \tau_{ij}. \quad (12)$$

Если при вычислении t' средней задержки пакета на каналах при передаче по сети для оценки τ_{ij} в (12) используется модель М/М/1, т.е. они определяются в соответствии с (5), то обозначив ее через t'_M , имеем

$$t'_M = \frac{1}{P} \sum_{(v_i, v_j) \in U} \frac{f_{ij}}{\mu(c_{ij} - f_{ij})}. \quad (13)$$

На это выражение средней задержки опираются многочисленные разработанные методы оптимизации проектирования СПД (см., например, [1,2,5,7,9–11]). Отметим, что допустимость сделанных предположений и полученных на их основе приближений, приемлемость полученных результатов для инженерных расчетов были неоднократно проверены путем моделирования и сопоставления с обширным фактическим материалом многими исследователями [1–3,5,8,11].

Если в (12) задержки на каналах τ_{ij} вычислять не по модели М/М/1, а по модели М/Д/1 (см. (6)), получим эвристическую формулу для канальной составляющей средней межузловой задержки (см. [1]; [11], с.230; [8], с.202]):

$$t'_D = \frac{1}{2\mu p} \sum_{(v_i, v_j) \in U} f_{ij} \left(\frac{1}{c_{ij}} + \frac{1}{c_{ij} - f_{ij}} \right). \quad (14)$$

В [1] отмечается, что такой подход также приводит к довольно точной модели.

Оценки (13) и (14) дают значение только канальной составляющей средней задержки пакета при передаче по сети, поскольку не учитывают задержки в узлах коммутации. Однако можно построить аналогичные оценки для узловой составляющей.

Действительно, из (11) и (8) имеем

$$t'' = \frac{1}{p} \sum_{(k,l) \in K} p_{kl} \sum_{v_j \in M_{kl}} \theta_{ij}.$$

Изменяя порядок суммирования, получаем

$$t'' = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^n \theta_j \sum_{(k,l) \in K_{kl}} p_{kl},$$

а поскольку $\sum_{(k,l) \in K_j} p_{kl} = g_j$, то

$$t'' = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^n g_j \theta_j. \quad (15)$$

Из (15), если θ_j оценивать по модели М/М/1 (см.(5)), имеем

$$t''_M = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^n \frac{g_j}{q_j - \mu g_j}, \quad (16)$$

а если θ_j оценивать по модели М/D/1 (см. (6)), имеем

$$t''_D = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^n g_j \left(\frac{1}{2q_j} + \frac{1}{2(q_j - \mu g_j)} \right), \quad (17)$$

Объединяя (13) с (16) и (14) с (17), получаем оценки для полной средней задержки пакета при передаче по СПД: $t_M = t'_M + t''_M$, если для

оценки задержек на каналах и в узлах коммутации используется модель М/М/1, и $t_D = t'_D + t''_D$, если используется модель М/Д/1.

Кроме средних задержек, важной интегральной характеристикой СПД как при проектировании, так и при оценке эффективности ее функционирования, является также максимальная задержка при передаче пакета по сети, которая характеризует СПД по «наихудшему» случаю. Ее можно оценить как максимальную из межузловых средних задержек, т.е.

$$\bar{t} = \max_{k,l=1,\dots,n} \{t_{kl}\} = \max_{k,l=1,\dots,n} \{t'_{kl} + t''_{kl}\}.$$

Также могут представлять интерес по отдельности оценка максимальной задержки, которую образуют каналы передачи данных на маршрутах $\bar{t}' = \max_{k,l=1,\dots,n} \{t'_{kl}\}$, и оценка максимальной задержки, которую образуют узлы коммутации $\bar{t}'' = \max_{k,l=1,\dots,n} \{t''_{kl}\}$.

Важными ориентирами при проектировании СПД и оценке эффективности ее функционирования являются также средняя задержка на каналах и средняя задержка в узлах коммутации. Обозначим суммарный поток по всем каналам через $\tilde{p}'$, т.е. $\tilde{p}' = \sum_{(v_i, v_j) \in U} f_{ij}$, а суммарный поток по

всем узлам коммутации через $\tilde{p}''$, т.е. $\tilde{p}'' = \sum_{j=1}^n g_j$. Тогда средняя

задержка на каналах

$$\tilde{\tau} = \frac{1}{\tilde{p}'} \sum_{(v_i, v_j) \in U} f_{ij} \tau_{ij},$$

а средняя задержка в узлах коммутации

$$\tilde{\theta} = \frac{1}{\tilde{p}''} \sum_{j=1}^n g_j \theta_j.$$

В зависимости от того, по какой модели (М/М/1 или М/Д/1) оцениваются задержки на каналах и в узлах коммутации, получаем два

способа вычисления оценок. Для СПД с коммутацией пакетов наиболее естественным является моделирование КПД и УК как СМО М/D/1. Оценки, полученные по этой модели, являются наиболее оптимистическими, так как определяют нижнюю границу соответствующих временных характеристик: реальные значения характеристик не могут быть лучше соответствующих оценок. Но поскольку некоторые моменты функционирования реальных СПД в модели М/D/1 не учитываются, более грубая модель М/M/1 может оказаться ближе к реальности. Проектировщик СПД может сам выбрать подходящую модель, которая на его взгляд лучше учитывает те факторы, которые не учитываются в формальных моделях.

Интегральные оценки дают общую характеристику временных задержек в СПД, но могут не давать важных с практической точки зрения деталей. Более полную картину дает вся совокупность оценок межузловых задержек и их канальных и узловых составляющих.

В настоящее время в ИПИ АН РТ создается система для моделирования функционирования СПД и оценки ее временных характеристик по рассмотренным моделям. Предварительные вычислительные эксперименты для различных вариантов топологии сетей, при различных нагрузках на сеть, использовании различных алгоритмов маршрутизации и различном выборе других параметров СПД показали достаточно интересные результаты. Подробное рассмотрение полученных результатов вычислительных экспериментов и выводов из них будет представлено в следующей работе.

Литература

1. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. - М. : Мир, 1979.
2. Жожикашвили В.А., Вишневский В.М. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1988.
3. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ; Ч.1,2. - М.: Наука, 1992.
4. Jackson J.R. Jobshop-Like Queueing Systems // Management Science. - 1963. - Vol.10., N1 - P.131-142.
5. Gerla M., Kleinrock L. On the Topological Design of Distributed Computer Networks // IEEE Trans. on Commun. - 1977. - V.COM - 25. - N.1. - P.48-60.
6. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. - М. : Машиностроение, 1979.
7. Вычислительные сети и сетевые протоколы / Д. Дэвис, Д. Барбер, У. Прайс, С. Соломонидес. - М. : Мир, 1982.
8. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. - М. : Мир, 1989.
9. Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. - Киев: Техніка, 1986.
10. Янбых Г.Ф., Столяров Б.А. Оптимизация информационно-вычислительных сетей. - М.: Радио и связь, 1987.
11. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Построение сетей интегрального обслуживания. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990.