

УДК 621.391

ОЦЕНКА ГРАНИЦ ИНТЕРВАЛА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ИНТЕРНЕТ-СОЕДИНЕНИЯ

Статья посвящена вопросам обработки результатов измерений показателей качества услуги «Доступ в сеть интернет». Рассматривается определение достигнутой скорости передачи, взятое из стандарта ETSI EG 202 057-4. Обосновывается выбор отображения результата измерения в виде средней оценки и интервала неопределенности. Анализируются задержки, осуществляемые на физическом (сеть Ethernet) и транспортном (протокол TCP) уровнях семиуровневой системы OSI при передаче тестового информационного файла протоколом FTP. Статья предназначена для специалистов, занимающихся измерениями и контролем показателей качества услуг передачи данных, и всех, кто интересуется методами обработки результатов измерений показателей качества услуги доступа в сеть интернет.



Я.С. ЯЗЛОВЕЦКИЙ,
старший научный сотрудник
ОАО «Гипросвязь»,
yazlavetski@giprosvjaz.by

Работа является продолжением рассмотрения вопросов, связанных с проблемами измерения скорости передачи данных интернет-соединения, затронутых в [1].

Проблемы сличения результатов измерений. При самостоятельном измерении скорости передачи интернет-соединения с помощью различных программ, предлагаемых в интернете [2, 3], перед пользователями услуг «Доступ в сеть интернет» возникает проблема существования разных результатов измерений. Отраженные в этих программах результаты измерений могут отличаться на 10–20 %. Это различие присутствует даже в том случае, когда измерения производятся с помощью одной и той же программы на одном и том же сайте, но через некоторое время.

Кроме того, процесс измерения усугубляется тем, что в предлагаемых тарифных планах приводят различные наименования (или названия) параметров измерения. Например, в тарифных планах операторов электросвязи, оказывающих услуги «Доступ к сети интернет» и «Доступ к интерактивному телевидению», приводятся следующие наименования: «скорость приема/передачи, кбит/с» [4] и «входящая скорость, Мбит/с» [5], «скорость доступа в интернет,

Мбит/с» [6]. И это не полный перечень разнообразия терминов. Однако если обобщить эти наименования, то их можно отнести к определению скорости передачи на канальном (или физическом) уровне по модели OSI [7].

Для того чтобы решить проблему терминологии, в статье используется определение скорости передачи, приведенное в стандарте ETSI [8]. Предлагается форма представления этого параметра в виде двух компонент: средней оценки и интервала неопределенности, в котором гарантируется нахождение результата измерения с заданной вероятностью.

В работе приводятся результаты анализа влияния изменения задержек физического (сеть Ethernet) и транспортного (протокол TCP) уровней на границы интервала неопределенности.

Определение скорости передачи данных интернет-соединения на основе пакетной передачи данных. Как установлено в [1] и [8], скорость передачи данных интернет-соединения измеряется на прикладном уровне (application layer) семиуровневой сетевой модели OSI (Open systems interconnection) [7]. Согласно европейскому стандарту ETSI EG 202 057-4 [8] и ГОСТ Р 53632–2009

ее принято обозначать как «достигнутую скорость передачи данных» (Data transmission speed achieved – C_d).

В соответствии с п. 5.2 в [8] величина C_d равна отношению числа бит (L) переданного тестового информационного файла к времени (t_n) его полной передачи без ошибок:

$$C_d = \frac{L}{T_n}, \text{ кбит/с}, \quad (1)$$

где T_n – период времени, начинающийся при принятии необходимой информации сетью доступа и оканчивающийся принятием последнего бита тестового информационного файла. Измерение параметра (1) производится со стороны пользователя услуги.

Так как в интернет-соединении существуют два разносторонних потока данных, то величина C_d должна оцениваться отдельно для входящего (download – C_{dd}) и исходящего (upload – $C_{ди}$) потоков данных.

Ввиду того что измеренные значения могут иметь большой разброс, оценивается также минимальное (C_{\min}), максимальное (C_{\max}) и среднее значения (C_m) для каждого потока данных. Руководство по расчету этих значений приведено в Приложении G [8]. Очевидно, что точность результата измерений зависит от числа измерений. Выбор числа измерений, или, как принято называть, наблюдений (observations), рассчитывается в соответствии с Приложением С [8].

Требования к свойствам тестового информационного файла даются в приложении D [8].

Тестовый информационный файл передается методом пакетной передачи, а именно пакетами данных, сформированными протоколом прикладного уровня, например FTP, HTTP, и транспортного уровня, например TCP, UDP и т. д.

С учетом пакетного способа передачи данных выражение (1) может быть преобразовано в:

$$C_d = \frac{L}{T_n} = \frac{k N_T + N_O}{(t_{data\ transfer\ complete} - t_{data\ transfer\ start})}, \text{ кбит/с}, \quad (2)$$

где $t_{data\ transfer\ start}$ – начало передачи тестового информационного файла; $t_{data\ transfer\ complete}$ – окончание передачи тестового информационного файла; k – число пакетов при передаче тестового информационного файла без остатка N_O ; N_T – число бит в одном пакете данных тестового файла; N_O – остаток тестового файла, не кратный длительности N_T , т. е. $0 < N_O \leq N_T$

Имеются различные толкования по поводу моментов начала ($t_{data\ transfer\ start}$) и окончания ($t_{data\ transfer\ complete}$) передачи тестового информационного файла. Например, в п. 6.1.7.3 [9] указываются два метода регистрации этих событий при использовании протокола FTP [10]. В одном из них, «методе В» [9], величина $t_{data\ transfer\ start}$ входящего (download) или исходящего (upload) потоков данных фиксируется парой сигналов SYN и ASK протокола FTP [4]. Величина $t_{data\ transfer\ complete}$ для входящего потока фиксируется парой сигналов SYN и ASK, а для исходящего – FIN и ASK.

Так как размер тестового информационного файла может быть не кратным размеру N_T , то в случае не одинаковых N_O и N_T ($N_O \neq N_T$) остаток информационного файла N_O может быть передан с помощью пакета длительностью N_T , дополнив его до конца пустыми данными в виде $(N_T - N_O)$ нулей. Таким образом, полностью тестовый информационный файл будет передан с помощью $(k + 1)$ пакетов, включая последний пакет с остатком N_O .

Анализируя процесс пакетной передачи, можно говорить о периодичности передачи пакетов данных и обоснованности введения времени, затраченного на передачу одного пакета. Тогда выражение (2) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{(k + 1) N_T + (N_O - N_T)}{\sum_{i=1}^{(k+1)} T_{n,i}(t)} = \\ &= \frac{(k + 1) N_T + (N_O - N_T)}{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^{k+1} (N_T + N_{изб,i})} = \\ &= B \frac{1 + \frac{(N_O - N_T)}{(k + 1) N_T}}{1 + \frac{1}{(k + 1) N_T} \sum_{i=1}^{k+1} N_{изб,i}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $T_{n,i}(t)$ – время, затраченное на передачу i -го пакета; B – скорость передачи одного бита на канальном уровне, бит/с; $N_{изб,i}$ – число битовых интервалов, добавленных за период передачи i -го пакета, обусловленных выполнением различных функциональных процессов (формирование заголовков различных уровней в пакете данных, передача управляющих сигналов и т. д.).

Очевидно, значение $T_{n,i}(t)$ может меняться в течение периодов передачи от 1 до k -го пакетов. Это связано с возможными изменениями значений следующих видов задержек: при передаче пакета через узлы (маршрутизаторы, коммутаторы, концентраторы) сети; при приеме сигнала, подтверждающего

безошибочный прием пакета; при низком трафике сети, т. е. уменьшенном отношении пропускной способности сети к числу узлов, одновременно участвующих в обмене данными в сети.

Из (3) следует, что с увеличением значения $N_{изб,i}$ величина C_d снижается. Это происходит из-за увеличения времени $T_{п,i}(t)$.

Определение термина «границы интервала неопределенности». Известно, что обработка результата измерения начинается после окончания процесса измерений и получения результатов наблюдений: $C_{д1}, C_{д2}, \dots, C_{дn}$, где n – число наблюдений.

Стандартная форма представления результата измерения согласно [11] имеет вид

$$C_d = \tilde{A} \pm U, \tag{4}$$

где \tilde{A} – оценка измеряемой величины (среднеарифметическое значение); U – расширенная неопределенность, в интервале которой находится результат измерения с заданной вероятностью P .

Оценка измеряемой величины вычисляется по формуле

$$\tilde{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{ди}, \tag{5}$$

где $C_{ди}$ – значение i -го наблюдения из ряда $C_{д1}, C_{д2}, \dots, C_{дn}$.

В зависимости от функции распределения значений данного ряда величина U может быть представлена двумя формами.

Первая применяется при условии, что ряд отвечает требованиям нормального закона распределения (распределения Гаусса) [12]. В этом случае первая форма представления неопределенности согласно [13] будет вычисляться по формуле

$$U = K u_c = K \sqrt{\sum_{j=1}^m u_j^2}, \tag{6}$$

где K – коэффициент, зависящий от вероятности P [14]; m – число стандартных неопределенностей; u_c – суммарная неопределенность.

Суммарная неопределенность u_c в (6) содержит стандартные неопределенности (u_j) по типу A (u_A) и типу B (u_B).

Стандартная неопределенность по типу A , обусловленная источниками неопределенности, имеющими случайный характер, определяется по формуле среднеквадратического отклонения (СКО):

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (C_{ди} - \tilde{A})^2}. \tag{7}$$

Как видно из (7), величина u_A зависит от измененных значений ряда $C_{д1}, C_{д2}, \dots, C_{дn}$.

Стандартная неопределенность по типу B , обусловленная источниками неопределенности,

имеющими систематический характер, определяется по формуле

$$u_B = \frac{b}{\sqrt{3}}, \tag{8}$$

где b – предел допускаемой абсолютной погрешности измерения средства измерения.

С учетом (7) и (8) границы интервала неопределенности математически могут быть представлены в виде интервала $(-U, U)$ при вероятности P .

Вторая форма представления границ интервала неопределенности выражается через полученные при обработке минимальное $C_{мин}$ и максимальное $C_{макс}$ значения по алгоритму обработки согласно Приложению G [8]. Такая форма может быть введена в отображаемые результаты измерения на сайте [15]. В этом случае границы интервала неопределенности математически будут представлены в виде интервала $(-(\tilde{A} - C_{мин}), (C_{макс} - \tilde{A}))$, или $(-U_1, U_2)$ при вероятности P , где U_1 и U_2 – нижняя и верхняя границы интервала неопределенности соответственно.

С учетом этого результат измерения (4) будет представлен в виде:

$$C_d = \begin{cases} \tilde{A} + U_2, \\ \tilde{A} - U_1. \end{cases} \tag{9}$$

Таким образом, имея результат измерения в виде выражения (4) или (9), можно сравнить (или слить) результаты измерения с результатами других программ. Причем сравнить не только по оценке измеряемой величины (5), но и границам интервалов неопределенностей $(-U_1, U_2)$.

Чтобы оценить границы интервала неопределенности, рассмотрим виды задержек на физическом и транспортном уровнях.

Сравнение задержек физического и прикладного уровней. Очевидно, что значения скоростей на прикладном (1) и физическом ($C_{фy}$) уровнях отличаются по величине.

Самый простой метод измерения скорости передачи на физическом уровне – с помощью фильтрации пакетов с соответствующим IP-адресом оборудования пользователей для входящего или исходящего потока данных. Однако возникает вопрос: как узнать, что именно отфильтрованный пакет канального уровня относится к тестовому информационному файлу, а не к другому процессу передачи (например, к пакетам протоколов ARP, NAT, STP, NBNS, STUN и т. д.)? При этом методе не учитываются пакеты с поврежденным полем IP-адреса или CRC в результате коллизий и других мешающих факторов. Все это снижает объективность измерений. Такой

метод может быть использован при пассивном виде измерений, когда IP-пакеты контролируются как обычный трафик. Но в этом случае невозможно обеспечить одинаковые условия для сличения результатов измерения для различных географических (или административных) районов [16].

Для целей сравнения результатов измерений следует использовать метод, приведенный в [8]. Чтобы рассчитать скорость на физическом уровне, требуется в первую очередь учесть длительности заголовков, вводимых при формировании пакета данных от физического уровня до прикладного. На рисунке 1 показан пример формирования заголовков одного пакета при передаче информационного тестового файла с помощью протокола FTP [10].

С учетом рисунка 1 и выражения (3) время передачи i -го кадра Ethernet вычисляется по формуле

$$T_{п,i} = \frac{N_T}{B} + \frac{N_{PP} + N_{FTP} + N_{TCP} + N_{IP} + N_{LLC} + N_{MAC} + N_{FCS} + N_{IPG}}{B} + \frac{N_{3,i}(t)}{B} = \frac{N_T + N_{изб}}{B} + T_{пф,i}(t), \quad (10)$$

где N_{PP} – число бит в преамбуле пакета данных на физическом уровне; N_{FTP} – число бит в заголовке пакета прикладного протокола FTP; N_{TCP} – число бит в заголовке пакета транспортного протокола TCP;

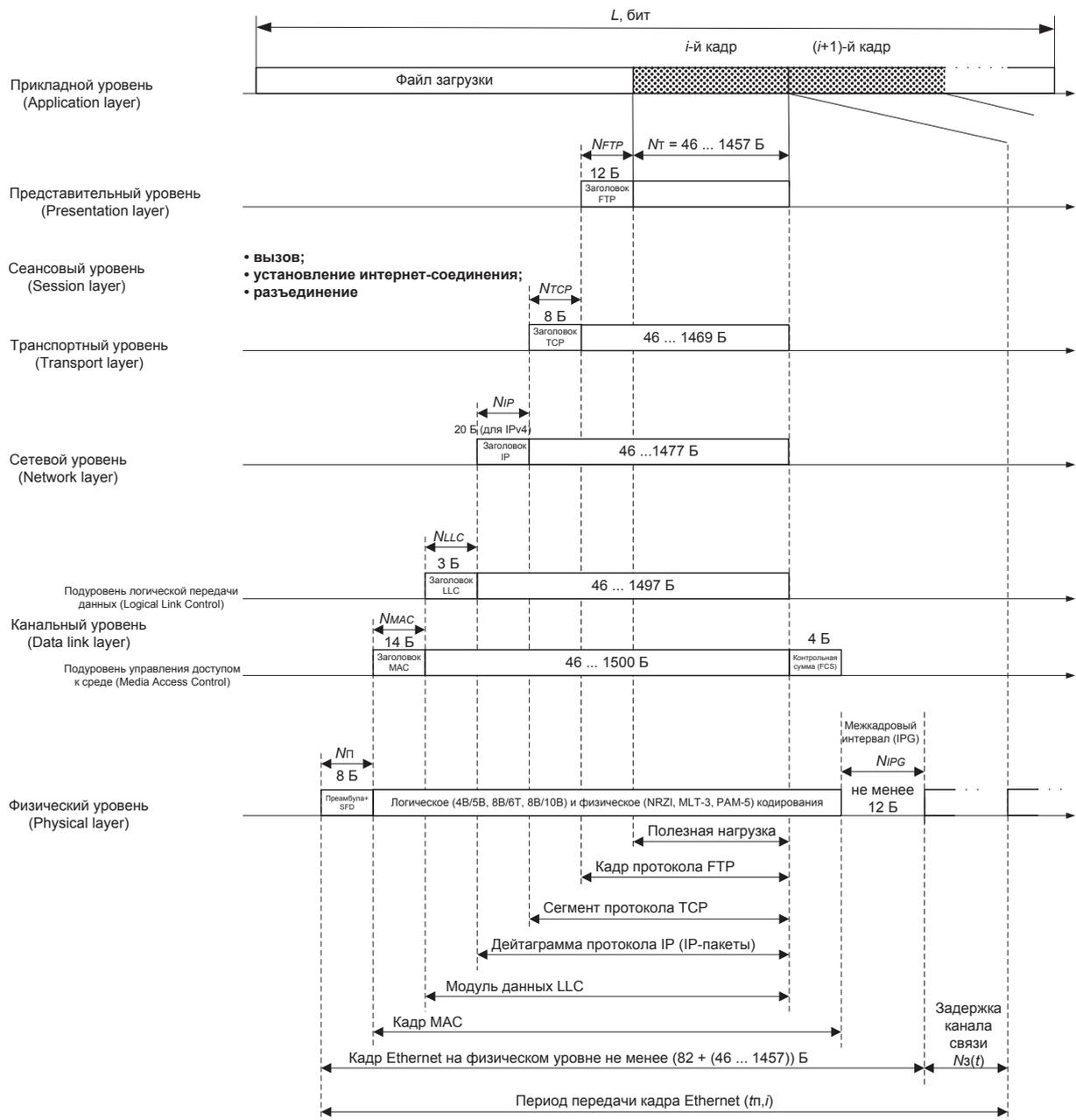


Рисунок 1

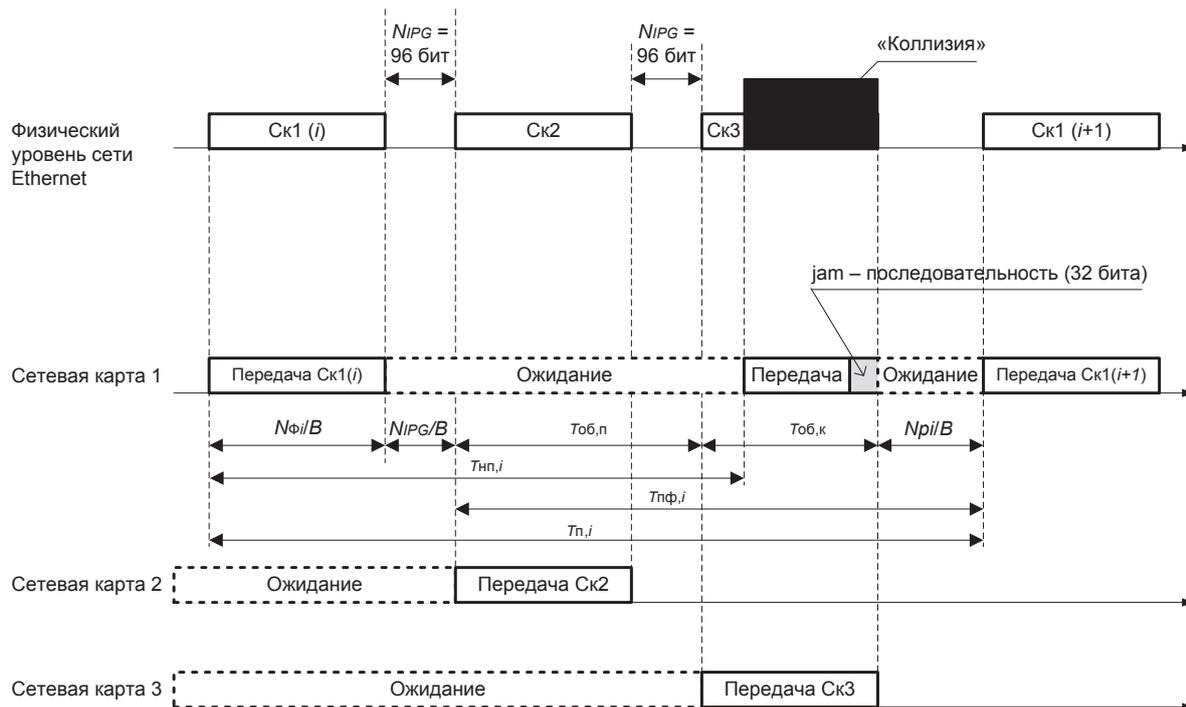


Рисунок 2

N_{IP} – число бит в заголовке пакета протокола IP; N_{LLC} – число бит в заголовке пакета на подуровне LLC канального уровня; N_{MAC} – число бит в заголовке на подуровне MAC канального уровня; N_{FCS} – число бит в коде контрольной суммы, формируемой в подуровне MAC; N_{IPG} – число бит в межкадровом интервале на физическом уровне; $T_{пф,i}(t) = \frac{N_{3i}(t)}{B}$ – задержка до момента решения передачи (i + 1) кадра; B – скорость передачи одного бита на канальном уровне, бит/с; $N_{изб}$ – число избыточных бит в кадре Ethernet.

Из выражения (10) видно, что для передачи i-го сегмента размером N_T требуется время $T_{п,i}$, которое имеет фиксированное значение, обусловленное заголовками соответствующих уровней, и случайное значение задержки $T_{пф,i}(t)$.

Случайная величина $T_{пф,i}(t)$ обусловлена задержками на уровнях от прикладного до физического. Однако задержки транспортного и физического (или канального) уровней намного больше, чем на других уровнях. Поэтому в дальнейшем анализ рассмотрения влияния задержек на значение (10) сводится к анализу на двух уровнях.

Возможные задержки передачи кадров в сети Ethernet. Процесс передачи кадров на физическом уровне сети Ethernet производится в соответствии с требованиями стандарта [17]. Пример такого процесса представлен на рисунке 2.

В течение IPG происходит прослушивание среды передачи Ethernet. Если несущая частота (Carrier

Sense) не обнаружена, то сетевая карта имеет право начать передачу кадра. Сетевая карта 2 (рисунок 2) пыталась начать передачу, однако обнаружила, что среда занята и нужно ожидать ее освобождения. Сетевая карта 1 обнаружила, что среда свободна и начала передавать кадр. По окончании интервала IPG сетевые карты могут начать передачу своих кадров (на рисунке – сетевая карта 2).

Возможна ситуация, когда несколько сетевых карт одновременно решили, что среда свободна и начали передавать кадры, хотя чаще одна из сетевых карт начинает передачу раньше другой (сетевые карты 1 и 3), но из-за задержки распространения сигналов в среде они просто не успевают дойти до других сетевых карт, решив, что среда свободна, также начинают передачу.

Подобная ситуация приводит к так называемой коллизии (collision), когда сигналы разных сетевых карт сети сталкиваются и взаимно искажаются. Сетевая карта, обнаружившая коллизию первой, прерывает передачу своего кадра и усиливает ситуацию коллизии, посылая в сеть специальную последовательность, так называемую jam-последовательность (длительностью 32 бита). После этого сетевые карты, обнаружившие коллизию, прерывают передачу кадров и выдерживают случайную паузу:

$$N_{pi} = L I, \tag{11}$$

где I – интервал отсрочки размером 512 битовых интервалов, L – случайное целое число из диапазона $[0, 2^N]$, где N – номер повторной попытки передачи кадра (1, 2, ..., 10). После 10-й попытки диапазон не

увеличивается; если 16 последовательных попыток передать кадр вызвали коллизию, то сетевая карта должна прекратить попытки и отбросить этот кадр. Таким образом, случайная пауза L может составить от 0 до 524288 битовых интервалов. Если передающий узел не распознает коллизию, то кадр будет искажен и отброшен принимающей стороной (скорее всего из-за несовпадения контрольной суммы). Потерянный кадр будет впоследствии передан каким-либо протоколом верхнего уровня, однако это произойдет через значительно больший промежуток времени (иногда через несколько секунд) по сравнению с микросекундными интервалами Ethernet.

Из рисунка 2 видно, что вместо того чтобы передать i -й кадр сетевой картой 1 за период $T_{нп,i}$, он был передан за большее время $T_{п,i}$ из-за появления «коллизии» в сети.

С учетом рисунка 2, анализируя задержки, возникающие при передаче кадра Ethernet, можно получить выражение для времени, затраченного на передачу i -го кадра:

$$T_{п,i}(t) = \frac{N_T + N_{изб}}{B} + \alpha T_{об.п} + \beta (T_{об.к} + \frac{N_{pi}}{B}), \quad (12)$$

где $T_{об.п}$ – задержка, обусловленная передачей пакета другим пользователем; α – случайное число задержек $T_{об.п}$ в период передачи i -го пакета; $T_{об.к}$ – задержка, обусловленная обнаружением «коллизии» в течение передачи i -го пакета; β – случайное число задержек $T_{об.к}$ в период передачи i -го пакета.

Пусть $T_{об.п}$ и $T_{об.к}$ принимают следующие значения:

$$T_{об.п} = \frac{N_T + N_{изб}}{B}; \quad (13)$$

$$T_{об.к} = \frac{N_T + N_{изб} + N_{IPG}}{B}. \quad (14)$$

С учетом (11), (13) и (14) величина $T_{п,i}$ будет:

$$T_{п,i}(t) = \frac{N_T + N_{изб}}{B} + \alpha \frac{N_T + N_{изб}}{B} + \beta \frac{N_T + N_{изб} - N_{IPG} + I 2^\beta}{B}. \quad (15)$$

Возможные задержки передачи сегмента протокола TCP на транспортном уровне. Транспортный протокол TCP [18] совместим с протоколом прикладного уровня FTP.

На рисунке 3 представлены временные диаграммы на стороне пользователя и сервера для входящего потока (download). Показан процесс доставки сегментов протокола TCP алгоритмом «скользящего» окна.

Процесс передачи сегментов по протоколу TCP производится путем непрерывной передачи сегментов в течение окна получателя (T_{win}) и приема ответных сигналов (АСК). Прием сигнала АСК свидетельствует о безошибочном приеме сегмента.

Размер окна win в байтах выбирается исходя из неравенства

$$T_{win} > T_{RTT} \times B, \quad (16)$$

где T_{RTT} – время оборота, равное задержке передачи сигнала управления туда и обратно.

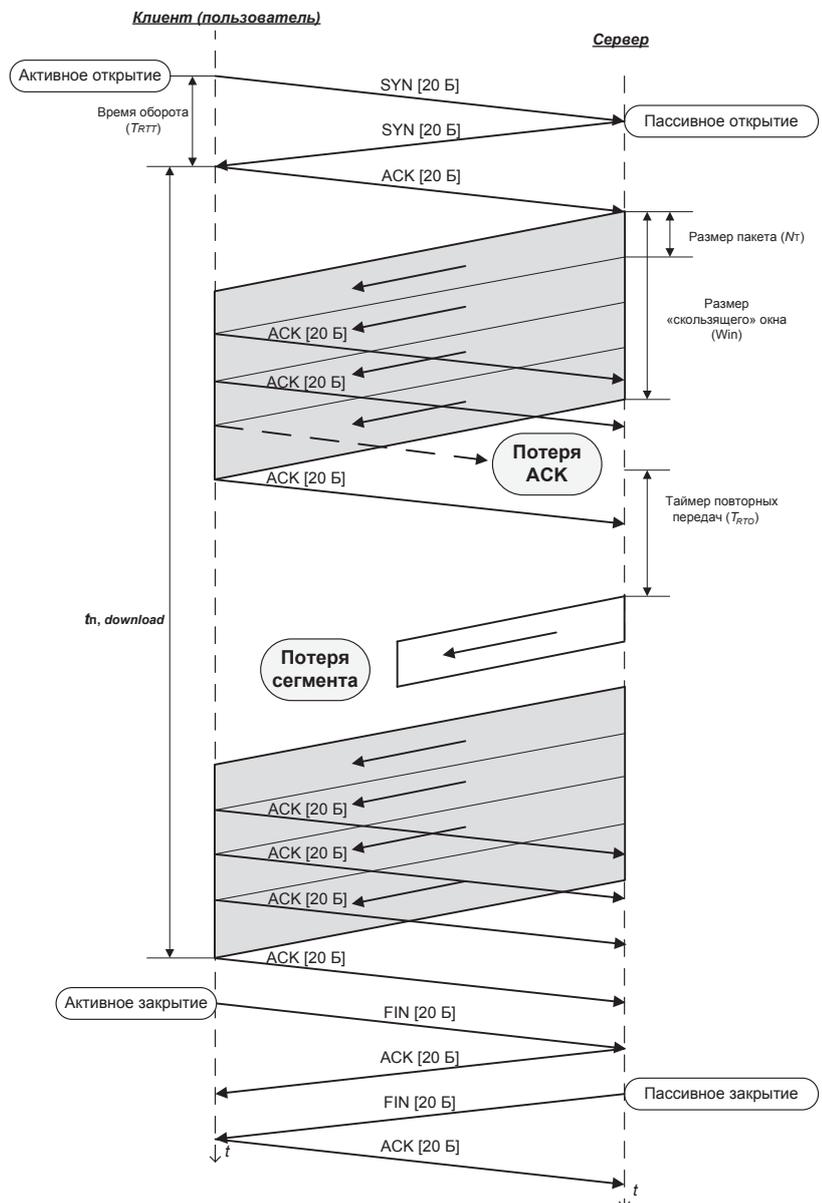


Рисунок 3

С учетом рисунка 3 величина T_{RTT} равна

$$T_{RTT} = T_{SYN} + T_{SYN} + 2\tau_3, \quad (17)$$

где T_{SYN} – длительность сигналов управления, размером 20 байт; τ_3 – односторонняя пространственная задержка.

Таймер повторных передач (T_{RTO}) выбирается согласно [18]:

$$T_{RTO} = 2 \overline{T_{RTT}}, \quad (18)$$

где $\overline{T_{RTT}}$ – результат очередного измерения времени оборота (17).

Задержка передачи пакетов может быть вызвана различными событиями, такими как потеря самого пакета данных, запоздалый ответ АСК, потеря АСК. Все это приводит к тайм-ауту и повторной передаче непринятого пакета.

Анализируя процесс передачи сегментов (рисунок 3), можно рассчитать время, затраченное на передачу тестового информационного файла во входящем потоке данных:

$$T_{п(down)} = T_{ACK} + T_{RTT} + \sum_{i=1}^{k+1} T_{пф,i} t + (k+1) \cdot T_{ACK} + a \cdot T_{RTO} + b \cdot T_{ож,АСК}, \quad (19)$$

где a – число повторов передачи сегмента при потере сегмента; b – число потерь сигнала АСК; $T_{ож,АСК}$ – длительность таймера ожидания сигнала АСК.

С учетом принятых выражений (15)–(19) можно рассчитать достигаемую скорость передачи входящего потока данных (2).

Вычисление скорости передачи на физическом уровне C_{PY} производится по формуле

$$C_{PY} = \frac{(k+1)(N_T + N_{изб} + N_{ACK}) - N_0 + N_{SYN}}{T_{п(down)}}. \quad (20)$$

Разность между величинами C_d и C_{PY} можно вычислить, сравнивая выражения (2) и (20). С учетом размеров заголовков (10) выражение может быть переписано:

$$C_{PY(down)} = C_{д(down)} + \frac{(k+1)(N_{изб} + N_{ACK}) - N_0 + N_{SYN}}{T_{п(down)}}. \quad (21)$$

Таким образом, с помощью выражения (21) можно рассчитать скорость передачи на физическом уровне, зная измеренное значение $C_{д(down)}$.

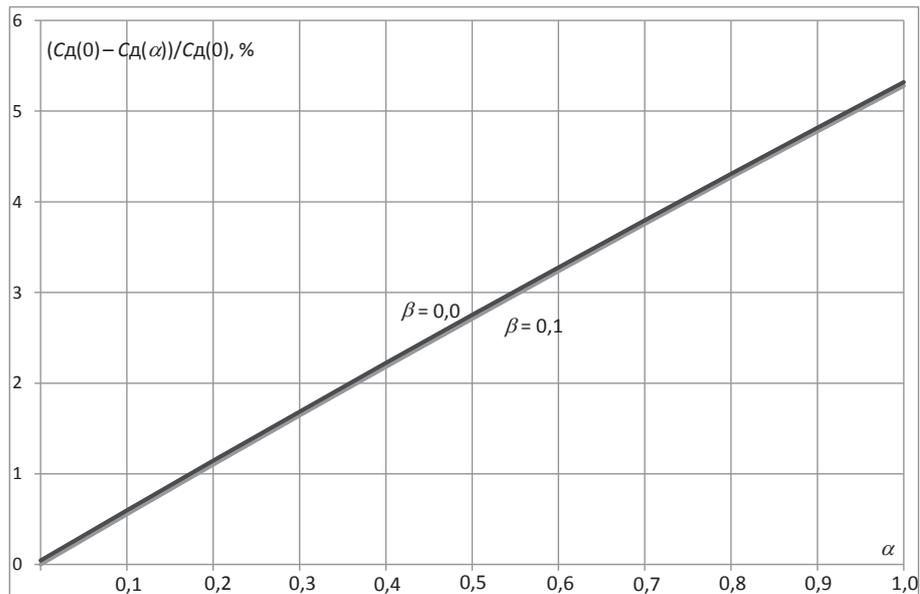


Рисунок 4

Практический пример расчета. Рассмотрим практическое применение полученных выражений для оценки границ интервала неопределенности.

Принимая во внимание требования Приложения В [8], пусть размер сегмента $N_T = 1400$ байта или 11200 бита. Задержка АСК до 200 мс. Скорость передачи на канальном уровне $B = 100$ Мбит/с. С учетом выбранной скорости B длительности сигналов управления на физическом и транспортном уровнях будут:

$$\begin{aligned} T_{ACK} &= 20 \cdot 8 / B = 1,6 \text{ мкс;} \\ T_{RTT} &= 0,0200032 \text{ с;} \\ T_{RTO} &= 0,0400064 \text{ с;} \\ T_{ож,АСК} &= 200 \text{ мс;} \\ N_{изб} &= 552 \text{ бит;} \\ T_{IPG} &= 0,96 \text{ мкс.} \end{aligned}$$

Подставляя эти значения в (19), получим:

$$\begin{aligned} T_{п(down)} &= 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot (2+k) + 803,2 \cdot 10^{-6} + \\ &+ (k+1) \cdot (1+\alpha+\beta) \cdot 0,11818 + \\ &+ \beta \cdot (k+1) \cdot \frac{512 \cdot 2^{\beta(k+1)} - 96}{10^8} + \\ &+ a \cdot 1606,4 \cdot 10^{-6} + b \cdot 0,2. \end{aligned} \quad (22)$$

Рассчитанное значение (22) подставляем в выражение (2) и находим зависимость от параметров моделирования α, β, a, b .

Например, при $(k+1) = 10$ входящая достигнутая скорость передачи $C_{д(down)}$ будет:

- 5 282 371 бит/с – для параметров $\alpha = \beta = a = b = 0$;
- 1 829 796 бит/с – для $\alpha = \beta = 0, a = 1, b = 0$;

- 506 323 бит/с – для $\alpha = \beta = 0, a = 0, b = 1$;
- 428 775 бит/с – для $\alpha = \beta = 0, a = 1, b = 1$.

Результаты расчета показывают влияние мешающих факторов протокола TCP, таких как a (число повторов передачи сегмента при потере сегмента) и b (число потерь сигнала АСК). Разница между этими значениями позволяет оценить границы неопределенности результатов измерений.

Зависимость величины

$$\frac{C_d(0) - C_d(\alpha)}{C_d(0)} \cdot 100 \%$$

от параметров α и β можно увидеть на рисунке 4, из которого следует, что с увеличением a до 1,0 интервал неопределенности расширяется до 5,5 %. В этом случае в соответствии с (9) $U_1 = U_2 = \pm 0,055C_d$.

Выводы. 1. Подробное описание термина «достигнутая скорость передачи данных», условия для измерения, а также полученная зависимость от скорости передачи на физическом уровне позволяют сравнить полученные результаты измерений между различными предлагаемыми в интернете программами измерений.

2. Полученные математические выражения и анализ влияния задержек на физическом (канальном) и транспортном уровнях позволяют смоделировать процесс передачи данных в интернет-соединении, оценить границы интервала неопределенности результата измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Язловецкий, Я.С. Измерение скорости передачи данных при оказании услуги доступа в сеть интернет / Я.С. Язловецкий // Веснік сувязі. – 2013. – № 6 (122). – С. 29–34.
2. Измерение скорости. – Режим доступа: <http://911dc.ru/index.php/internet/diagnostika/skorost-chast-2> – Дата доступа: 30.06.2014.
3. Тест измерения скорости на сайте 911dc.ru. – Режим доступа: <http://911dc.ru/index.php/internet/diagnostika/20-test-izmeritelej-skorosti> – Дата доступа: 30.06.2014.
4. Пакеты услуг на сайте «beltelecom.by». – Режим доступа: <http://beltelecom.by/pakety-uslug> – Дата доступа: 30.06.2014.
5. Тег «Тарифный план» на сайте «providers.by». – Режим доступа: <http://providers.by/flag/tarifnyj-plan/> – Дата доступа 30.06.2014.
6. Тарифные планы ООО «Деловой сети». – Режим доступа: <http://bn.by/about/news/0000611/>. – Дата доступа: 30.06.2014.
7. OSI International Telecommunication Union. SERIES X: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-GENERATION NETWORKS X.200 (11/93): Open Systems Interconnection – Basic Reference Model.
8. ETSI EG 202 057-4 v1.2.1 (2008-07) Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 4: Internet access.
9. ETSI TS 102 250-2 v2.2.1 (2011-04) Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 2: Definition of Quality of Service parameters and their computation.
10. FTP FILE TRANSFER PROTOCOL (FTP): RFC 959. 1985 – Mode of access: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1959.txt>. Data of access: 02.06.2014.
11. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. МИ 2083-90. – М.: Комитет стандартизации и метрологии ССР, 1991.
12. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981.
13. РМГ 43-2001 Рекомендации по Межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». – Минск. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.
14. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и их характеристики погрешностей измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров. МИ 1317-86. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
15. Измерение качественных показателей услуг передачи данных. – Режим доступа: www.gos.by – Дата доступа 30.06.2014.
16. Международный союз электросвязи. СЕРИЯ О: ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ. Аппаратура для проведения измерений в IP сетях. Рекомендация O.211 (01/2006): Испытательная и измерительная аппаратура для проведения испытаний на уровне IP.
17. IEEE Std 802.3-2008, IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 3: Carrier sense multiple access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications.
18. TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL. DARPA INTERNET PROGRAM. PROTOCOL SPECIFICATION: RFC 793. 1981 - Mode of access: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc793.txt> Data of access: 02.06.2014.