

УДК 681.324

DOI: 10.17223/19988605/50/11

П.Х. Карим, П.А. Михеев, В.В. Поддубный, С.П. Сущенко

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
ТРАНСПОРТНОГО ПРОТОКОЛА С МЕХАНИЗМОМ ПРЯМОЙ КОРРЕКЦИИ
ОШИБОК В МЕЖСЕКМЕНТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Предложена математическая модель транспортного протокола с механизмом прямой коррекции ошибок. Показано, что применение механизма ведет к росту пропускной способности канала при определенных значениях многомерного признакового пространства протокольных параметров, характеристик тракта передачи данных и механизма прямой коррекции ошибок. Представлены результаты численного анализа зависимости прироста пропускной способности транспортного протокола с прямой коррекцией ошибок от параметров корректирующего механизма, достоверности передачи протокольных блоков данных и длительности круговой задержки. **Ключевые слова:** транспортное соединение; пропускная способность; цепь Маркова; прямая коррекция ошибок; размер окна; длительность тайм-аута; круговая задержка.

Пропускная способность транспортного соединения является крайне важной характеристикой компьютерных сетей. Данный показатель определяет качество сетевых сервисов для абонентов и определяется значениями протокольных параметров (размер окна, длительность тайм-аута), характеристиками тракта передачи данных (длительность круговой задержки, достоверность передачи данных в различных направлениях транспортного соединения) [1]. В настоящее время получают применение технологии прямой коррекции ошибок [2–7] в виде дополнительного сервиса в транспортных протоколах наряду с методом решающей обратной связи для снижения объема повторно передаваемого трафика. Исследование транспортного соединения и анализ его потенциальных возможностей выполнялся в [2–14], но аналитические результаты получены только для однозвенного тракта передачи данных [8–10] либо при существенных ограничениях на параметры протокола [11–14]. Примером одной из модификаций транспортного протокола является подключаемый к UDP протоколу дополнительный механизм под названием QUIC (Quick UDP Internet Connections) [7]. Это новое дополнение протокола пока еще не является стандартом, и в настоящее время эксперименты с ним и исследование его эффективности продолжаются. Протокол QUIC развернут как дополнительный сервис в кампании Google. Следует отметить, что протокол QUIC имеет ряд недостатков, к числу которых относится использование ограниченного множества значений параметров механизма прямой коррекции ошибок. Исследование протокола QUIC выполнялось только в натурных экспериментах (тестирование на оборудовании) [7]. Как правило, исследования преимуществ метода прямой коррекции ошибок проводятся на качественном уровне и для некоторых частных случаев численно. Известные исследования не определяют области признакового пространства параметров протокола и транспортного соединения, в которых применение метода опережающего исправления ошибок дает положительные результаты. Скрытые возможности транспортного протокола с применением метода прямой коррекции ошибок не изучены полностью. Отсутствуют аналитические зависимости комплексного влияния протокольных параметров, характеристик тракта передачи данных и параметров метода коррекции на быстродействие транспортного соединения. Не исследовано влияние соотношений между длительностью круговой задержки и протокольными параметрами на пропускную способность тракта передачи данных, управляемого транспортным протоколом.

В работе предложена математическая модель процесса передачи данных с прямой коррекцией ошибок в фазе информационного переноса в виде цепи Маркова с дискретным временем. Проведен числительный анализ пропускной способности транспортного канала с применением механизма прямой коррекции ошибок, показано преимущество протокола с прямой коррекцией ошибок по сравнению с классическим протоколом с решающей обратной связью для определенных областей признакового пространства протокольных параметров, характеристик транспортного соединения и параметров механизма кодирования.

1. Модель транспортного соединения

Рассмотрим процесс переноса данных между абонентами транспортного протокола, основанного на алгоритме с решающей обратной связью. Примером семейства таких надежных протоколов является доминирующий в современных компьютерных сетях протокол TCP [1]. Полагаем, что взаимодействующие абоненты имеют неограниченный поток данных для передачи, а обмен выполняется сегментами данных транспортного протокола одинаковой длины. Считаем, что участки переприема вдоль тракта передачи данных имеют одинаковое быстродействие в обоих направлениях, а длительность цикла передачи сегмента в отдельном звене составляет t . В общем случае длина пути от источника до адресата, переносящего информационный поток, и длина обратного пути, по которому передаются подтверждения на принятые сегменты, могут быть различными. Полагаем, что длина тракта передачи данных, выраженная в количестве участков переприема, в прямом направлении равна $D_n \geq 1$. Обратный тракт, по которому доставляются подтверждения отправителю о корректности приема последовательности блоков сегментов, имеет длину $D_o \geq 1$. Заданы вероятности искажения сегмента в каналах связи для прямого $R_n(d)$, $d = \overline{1, D_n}$ и обратного $R_o(d)$, $d = \overline{1, D_o}$ направлений передачи каждого участка переприема. Тогда достоверность передачи сегментов вдоль тракта от источника до адресата и обратно составит $F_n = \prod_{d=1}^{D_n} (1 - R_n(d))$ и $F_o = \prod_{d=1}^{D_o} (1 - R_o(d))$ соответственно. Считаем, что потеря сегментов из-за отсутствия буферной памяти в узлах тракта не происходит. Полагаем, что передача данных отправителем реализуется блоками, содержащими B сегментов, из которых $1 \leq A \leq B$ являются информационными, а $B - A$ – дополнительными (избыточными) той же длины. Полагаем, что все сегменты имеют контрольные суммы, позволяющие обнаружить ошибки в каждом из них. Потеря (искажение) до $B - A$ произвольных сегментов в блоке позволяет восстановить все сегменты блока (например, передачей дублей при $A = 1, B \geq 2$, оправкой избыточного сегмента с поразрядной четностью всех информационных сегментов по технологии RAID-массивов [15] при $A > 1, B = A + 1$ и др.). Управление потоком данных реализуется механизмом скользящего окна [1] с протокольным параметром ширины окна $\omega \geq 1$, выраженным в количестве блоков. Полагаем, что подтверждения о корректности полученных адресатом блоков сегментов переносятся в каждом сегменте встречного потока. При невозможности прямого восстановления переданных сегментов блока (искажение более $B - A$ сегментов в блоке) весь блок передается повторно.

Тогда процесс информационного переноса в виртуальном соединении, управляемом транспортным протоколом, может быть описан марковским процессом с дискретным временем (с длительностью такта t) в силу того, что время между получениями подтверждений имеет геометрическое распределение с параметром F_o . Данная модель является обобщением формализаций процесса передачи данных, предложенных в [11–14], на случай транспортного соединения произвольной длины и механизма прямой коррекции ошибок. Область возможных состояний цепи Маркова определяется длительностью тайм-аута ожидания подтверждения S , выраженной в количестве циклов продолжительности t . Размер тайм-аута связан с длиной тракта, шириной окна и размером блока неравенствами $S \geq \omega B + 1$, $S \geq D_n + D_o + B - 1$. Очевидно, что сумму длин прямого и обратного трактов можно интерпретировать как круговую задержку одиночного сегмента $D = D_n + D_o$ в детерминированном

транспортном соединении, выраженную в длительностях t . Круговая задержка для блока сегментов составит $D+B-1$. Состояниям цепи Маркова $i = \overline{0, \omega B}$ соответствует размер очереди переданных, но не подтвержденных сегментов в источнике потока, а состояниям $i = \overline{\omega B + 1, S - 1}$ – время, в течение которого отправитель не активен и ожидает получения подтверждения о корректности приема переданной последовательности из ω блоков сегментов. Из нулевого состояния в $D+B-2$ источник продвигается с каждым тактом t с вероятностью детерминированного события. В состояниях $i \geq D+B-2$ после истечения очередного дискретного цикла t к отправителю начинают прибывать подтверждения и, в зависимости от результатов доставки блоков сегментов с учетом технологии прямой коррекции ошибок, отправитель передает новые блоки сегментов (при положительном подтверждении) либо повторно – искаженные (не поддающиеся прямому восстановлению). Завершение цикла пребывания в состоянии $D+B-2$ соответствует времени доведения первого блока сегментов до адресата и получения на него подтверждения. Дальнейший рост номера состояния происходит с вероятностью искажения подтверждения $1-F_o$ в обратном тракте. Получение подтверждения в состояниях $i \geq D+B-2$ в предположении отсутствия расщепления точек возврата, обусловленных конвейерным эффектом, вызывает переход в $D-1$ состояние при $\omega \geq K+2$ только в случае успешной передачи доставленных адресату блоков, в противном случае следует переход в 0 состояние. Здесь $K = \left\lfloor \frac{D-2}{B} \right\rfloor$, где $\lfloor \dots \rfloor$ означает «целая часть» дроби.

В силу того что в состояниях $i \geq \omega B$ источник приостанавливает отправку блоков сегментов, получение подтверждений при $\omega \geq K+2$ в состояниях $i = \overline{(\omega+k)B-1, (\omega+k+1)B-2}$, $k = \overline{1, K}$ приводит к переходу в состояния $D-kB-1, k = \overline{1, K}$, только при успешной доставке данных (иначе – в 0 состояние). В состояниях $i = \overline{(\omega+K+1)B-1, S-2}$ выполняется переход в нулевое состояние, поскольку размер очереди переданных, но не подтвержденных информационных сегментов при этом обнуляется. В состоянии $S-1$ истекает тайм-аут ожидания подтверждения от получателя о корректности принятых блоков сегментов и происходит безусловный переход в нулевое состояние.

2. Операционные характеристики транспортного протокола с механизмом прямой коррекции ошибок

Переходные вероятности π_{ij} из исходного состояния i в результирующее j цепи Маркова, описывающей процесс передачи информационного потока с технологией прямой коррекцией ошибок в режиме группового отказа для $\omega \geq K+2$, $S \geq D+B(\omega+1)-2$, имеют вид:

$$\pi_{ij} = \begin{cases} 1, i = \overline{0, D+B-3}, j = i+1; \\ 1-F_o, i = \overline{D+B-2, S-2}, j = i+1,; \\ F_o \psi^k, i = \overline{D+Bk-2, D+(k+1)B-3}, k = \overline{1, G}, j = D-1; \\ F_o (1-\psi^k), i = \overline{D+Bk-2, D+(k+1)B-3}, k = \overline{1, G}, j = 0; \\ F_o \psi^G, i = \overline{D+B(G+1)-2, B(\omega+1)-2}, j = D-1; \\ F_o (1-\psi^G), i = \overline{D+B(G+1)-2, B(\omega+1)-2}, j = 0; \\ F_o \psi^{G+k}, i = \overline{B(\omega+k)-1, B(\omega+k+1)-2}, k = \overline{1, K}, j = D-Bk-1; \\ F_o (1-\psi^{G+k}), i = \overline{B(\omega+k)-1, B(\omega+k+1)-2}, k = \overline{1, K}, j = 0; \\ F_o, i = \overline{B(\omega+K+1)-1, S-2}, j = 0; \\ 1, j = 0, i = S-1. \end{cases}$$

Здесь $G = \left\lfloor \frac{B(\omega + 1) - 2 - (D + B - 2) + 1}{B} \right\rfloor = \omega - \left\lfloor \frac{D - 1}{B} \right\rfloor$ – расстояние между моментами начала прекращения активности отправителя $B(\omega + 1) - 2$ (завершения оправки ω блоков) и начала поступления ему квитанций $D + B - 2$, выраженное в размерах B , $\psi = \sum_{i=A}^B C_B^i F_n^i (1 - F_n)^{B-i}$. Решая систему уравнений равновесия находим вероятности состояний цепи Маркова и далее получаем показатель пропускной способности транспортного соединения с применением механизма прямой коррекции ошибок:

$$Z(D, \omega, S, A, B, F_n, F_o) = \frac{P_0 A \psi (1 - \bar{F}_0^B) (1 - \bar{F}_0^B \psi)}{B D F_o (1 - \psi)} \left\{ \left[1 - (\bar{F}_0^B \psi)^\omega \right] \left[\frac{1 - \psi}{1 - \bar{F}_0^B \psi} - \bar{F}_0^{S-D-B+2} (1 - \psi^\omega) \right] \right\}, \quad (1)$$

где

$$P_0 = \bar{D} F_o (1 - \bar{F}_0^B \psi) / \left\{ D F_o (D - B K - 1) (1 - \bar{F}_0^B \psi) + \left(1 - \bar{F}_0^B \psi \right)^2 \left[1 + F_o (B - 1) - \bar{F}_0^{S-D-B+2} \right] + B F_o \left[K (1 - \psi) (1 - \bar{F}_0^B \psi) + \psi^{G+1} \left[1 - (\bar{F}_0^B \psi)^K \right] (\bar{F}_0^{B\omega-D+1} (1 - \bar{F}_0^B \psi) - (1 - \psi) \bar{F}_0^{G+1}) \right] \right\},$$

$$\bar{D} = (1 - \bar{F}_0^B \psi) \left[\psi^{G+1} \bar{F}_0^{B\omega-D+1} (\bar{F}_0^B \psi)^K \right] + (1 - \psi) \left[1 - (\bar{F}_0^B \psi)^{K+G+1} \right], \quad \bar{F} = 1 - F_o.$$

Очевидно, что поиск в многомерном пространстве признаков $(D, \omega, S, A, B, F_n, F_o)$ областей, обеспечивающих превосходство механизма прямой коррекции ошибок перед классической протокольной процедурой с решающей обратной связью по критерию пропускной способности, является сложной задачей. Решением данной проблемы может быть редуцирование размерности признакового пространства. Эффективными вариантами редуцирования размерности признакового пространства являются случаи абсолютно надежного обратного тракта передачи данных ($F_o = 1$), неограниченной ширины окна ($\omega \rightarrow \infty$), а следовательно, и длительности тайм-аута ($S \rightarrow \infty$), а также случай одно-родного тракта передачи данных в прямом и обратном направлениях ($F_n = F_o = F$).

3. Численный анализ пропускной способности транспортного соединения

Рассмотрим случай абсолютно надежного обратного тракта $F_o = 1$. Тогда пропускная способность транспортного соединения принимает вид:

$$Z(D, \omega, S, A, B, F_n, 1) = \frac{A \psi}{B(D - 1)(1 - \psi) + B^2}.$$

Чтобы определить области, где механизм с применением технологии прямой коррекции ошибок дает преимущество, сравним показатель пропускной способности классического транспортного протокола и протокола с коррекцией ошибок. В классическом варианте пропускная способность имеет вид [11]:

$$Z_{\text{кл}}(D, \omega, A, S, F_n, F_o = 1) = \frac{F_n}{(D - 1)(1 - F_n) + 1}.$$

Определим выигрыш от применения технологии прямой коррекции ошибок перед классическим транспортным протоколом при $F_o = 1$:

$$\Delta Z = Z(D, \omega, S, A, B, F_n, F_o) - Z_{\text{кл}}(D, A, \omega, S, F_n, F_o) = \frac{A \psi}{B(D - 1)(1 - \psi) + B^2} - \frac{F_n}{(D - 1)(1 - F_n) + 1}.$$

Численные исследования выигрыша при наборе параметров механизма прямой коррекции ошибок $A=1, B=A+1$ показывают (рис. 1, а), что область положительных значений выигрыша с ростом длительности круговой задержки D от 51 до 66 расширяется от $F \in (0,05; 0,93)$ до

$F \in (0,04; 0,95)$. Кроме того, из рис. 1, 2 следует, что экстремальное значение выигрыша растет с увеличением D и достигается практически в одной и той же точке $F = 0,88$. На рис. 1, b проиллюстрированы сходные зависимости для набора параметров $A = 2, B = A + 1$.

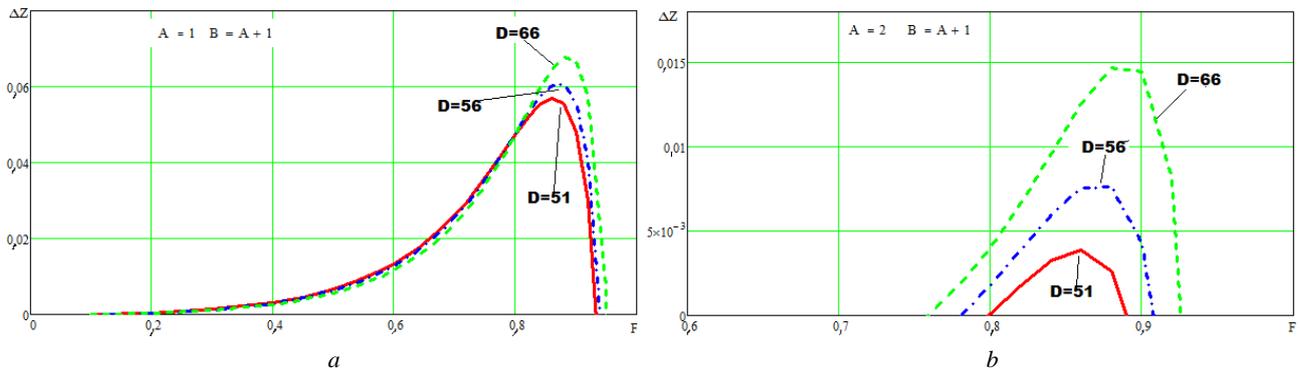


Рис. 1. Зависимость выигрыша ΔZ от достоверности передачи данных в прямом тракте $F = F_n$ при $F_o = 1$

Fig. 1. Dependence of winning ΔZ on reliability data transfer in the forward path $F = F_n$ at $F_o = 1$

Из результатов, приведенных на рис. 2, нетрудно видеть, что режим дублирования данных $B = 2A$ имеет преимущество перед параметрами $A = 2, B = A + 1$ механизма прямой коррекции ошибок, при этом наибольший выигрыш достигается для параметрического набора $A = 1, B = A + 1$.

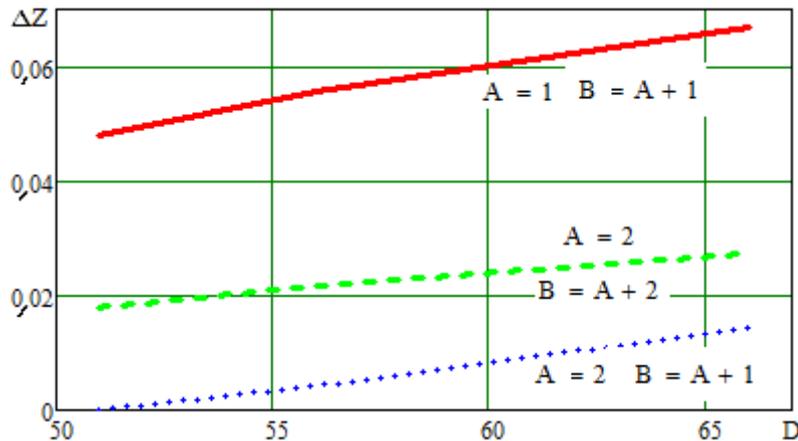


Рис. 2. Зависимость значений максимального выигрыша от длительности круговой задержки при $F_o = 1$

Fig. 2. The dependence of the values of the maximum winnings from the duration of the circular delay at $F_o = 1$

Проанализируем выигрыш пропускной способности канала в условиях неограниченной ширины окна ($\omega \rightarrow \infty$) и стохастической однородности прямого и обратного трактов передачи данных ($F_n = F_o = F$). Пропускная способность для протоколов с применением механизма прямой коррекции ошибок и без его использования согласно (1) и [11] определится соответственно следующим образом:

$$Z(D, \infty, \infty, A, B, F, F) = \frac{A\psi(1 - (1 - F)^B)}{B\left\{(1 - \psi)F(D - 1) + (1 - (1 - F)^B)\psi(1 + F(B - 1))\right\}},$$

$$Z_{\text{кл}}(D, \infty, \infty, F, F) = \frac{F^2}{1 + F(D - 2)(1 - F)}.$$

Согласно значениям выигрыша, приводимым на рис. 3, нетрудно видеть, что область положительных значений с ростом круговой задержки D незначительно расширяется, а максимальные значения – увеличиваются.

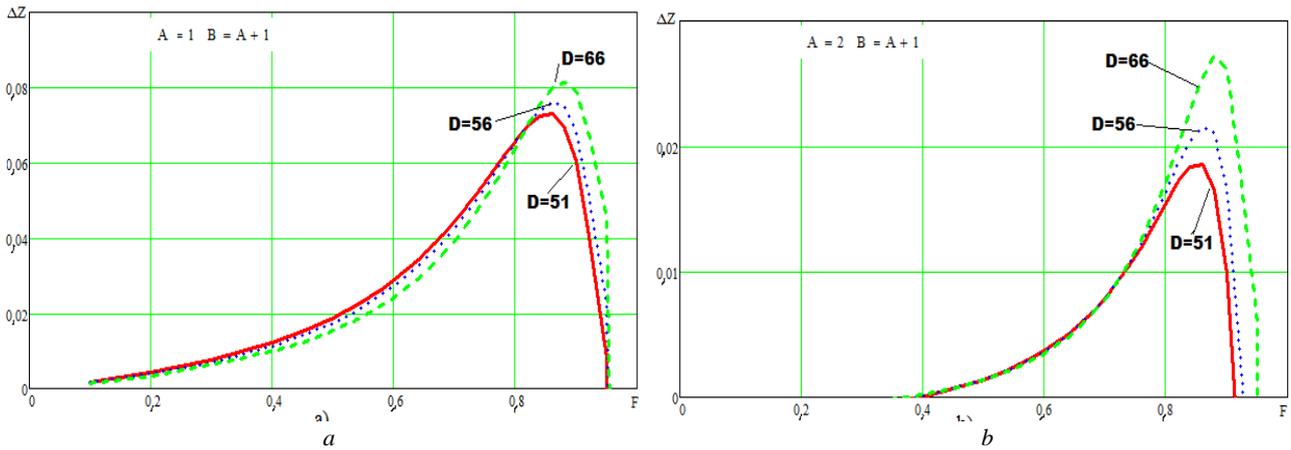


Рис. 3. Зависимость выигрыша ΔZ от достоверности передачи данных в прямом тракте F при $F_n = F_o = F$

Fig. 3. Dependence of winning ΔZ on reliability data transfer in the forward path F at $F_n = F_o = F$

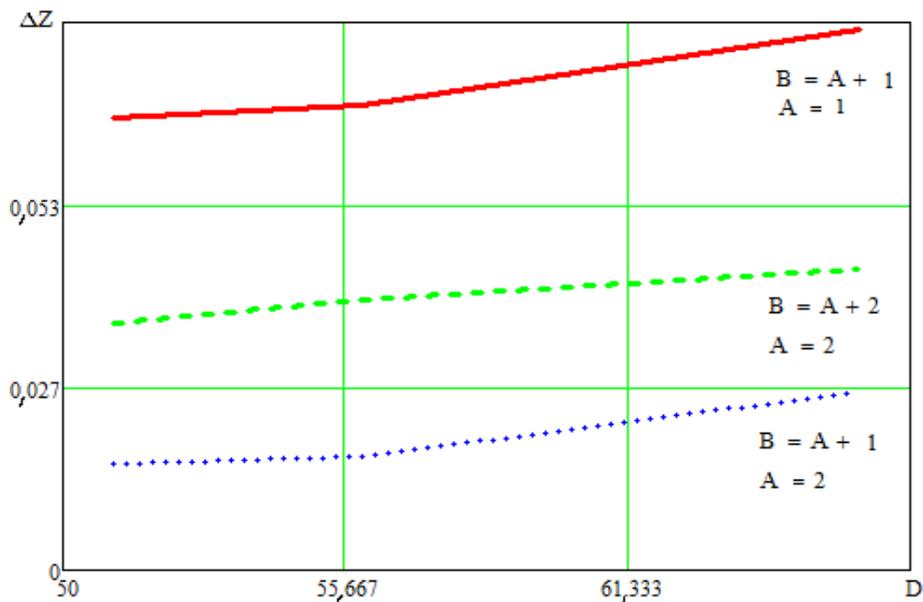


Рис. 4. Зависимость значений максимального выигрыша от длительности круговой задержки при $F_n = F_o = F$

Fig. 4. The dependence of the values of the maximum winnings from the duration of the circular delay when $F_n = F_o = F$

Из зависимостей, приводимых на рис. 4, следует, что лучшими значениями параметров механизма прямой коррекции ошибок являются $A=1, B=A+1$.

Заключение

В работе предложена модель процесса переноса сегментов данных в транспортном соединении, управляемом надежным транспортным протоколом с механизмом прямой коррекции ошибок и подтверждением данных, принятых получателем, в режиме группового повтора. Математическая модель основана на описании очереди переданных, но не подтвержденных сегментов данных цепью Маркова с конечным числом состояний и дискретным временем. Представлен численный анализ пропускной способности транспортного соединения. Численные исследования выполнены для абсолютно надежного обратного тракта и для неограниченного размера окна. При данных условиях показано, что выигрыш пропускной способности увеличивается с ростом круговой задержки. Показано, что для группового режима повтора применение механизма прямой коррекции ошибок целесообразно на транспортных соединениях с большой круговой задержкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fall K., Stevens R. TCP/IP Illustrated. 2nd ed. Addison-Wesley Professional, 2012. V. 1: The Protocols 1017 p. (Addison-Wesley Professional Computing Series)
2. Lundqvist H., Karlsson G. TCP with end-to-end FEC // Communications Int. Zurich Seminar. 2004. P. 152–156.
3. Barakat Ch., Altman E. Bandwidth tradeoff between TCP and link-level FEC // Computer Networks. 2002. No. 39. P. 133–150.
4. Shalin R., Kesavaraja D. Multimedia Data Transmission through TCP/IP using Hash Based FEC with AUTO-XOR Scheme // ICTACT Journal on Communication Technology. 2012. V. 03, is. 03. P. 604–609.
5. Flach T., Dukkupati N., Terzis A., Raghavan B., Cheng Yu., Cardwell N., Jain A., Hao S., Katz-Bassett E., Govindan R. Reducing Web Latency: the Virtue of Gentle Aggression // ACM SIGCOMM. 2013. P. 159–170.
6. Herrero R. Modeling and comparative analysis of Forward Error Correction in the context of multipath redundancy // Telecommunication Systems. Modelling, Analysis, Design and Management. 2017. V. 65, No. 4. P. 783–794.
7. Langley A., Riddoch A., Wilk A., Vicente A., Krasic C., Zhang D., Ang F., Kouranov F., Swett I., Iyengar J., Bailey J., Dorfman J., Roskind J., Kulik J., Westin P., Tenneti R., Shade R., Hamilton R., Vasiliev V., Chang W.-T., Shi Z. The QUIC transport protocol: Design and internet-scale deployment // SIGCOMM'17, August, 2017, Los Angeles, CA, USA. P. 183–196.
8. Boguslavsky L.B., Gelenbe E. Analytical models transmission link control procedures for data computer networks with packet // Automation and Remote Control. 1980. No 7. P. 181–192.
9. Gelenbe E., Labetoulle J., Pujolle G. Performance Evaluation of the HDLC Protocol // Computer Networks. 1978. V. 2, No. 4/5. P. 409–415.
10. Кокшенев В.В., Сущенко С.П. Анализ быстродействия асинхронной процедуры управления звеном передачи данных // Вычислительные технологии. 2008. Т. 15, спец. вып. № 5. С. 61–65.
11. Kokshenev V.V., Mikheev P.A., Sushchenko S.P. Comparative Analysis of the Performance of Selective and Group Repeat Transmission Models in a Transport Protocol // Automation and Remote Control. 2017. V. 78, No 2. P. 65–81.
12. Кокшенев В.В., Михеев П.А., Сущенко С.П. Анализ селективного режима отказа транспортного протокола в нагруженном тракте передаче данных // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 3 (24). С. 78–94.
13. Кокшенев В.В., Сущенко С.П. Моделирование сеансов связи цепями Маркова // Теория вероятностей, случайные процессы, математическая статистика и приложения : материалы Междунар. науч. конф., посвященной 80-летию проф. Г.А. Медведева. Минск (23–26 февраля 2015). Минск : РИВШ, 2015. С. 311–316.
14. Mikheev P.A., Sushchenko S.P., Tkachev R.V. Estimation of High-Speed Performance of the Transport Protocol with the Mechanism of Forward Error Correction // Communications in Computer and Information Science. 2017. V. 700. P. 259–268.
15. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов. 5-е изд. СПб. : Питер, 2016. 862 с.

Поступила в редакцию 23 марта 2019 г.

Karim P.Kh., Mikheev P.A., Poddubny V.V., Sushchenko S.P. (2020) NUMERICAL STUDIES OF TRANSPORT PROTOCOL THROUGHPUT WITH FORWARD ERROR CORRECTION MECHANISM IN INTERSEGMENT SPACE. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 50. pp. 89–96

DOI: 10.17223/19988605/50/11

A mathematical model of the data transfer process with forward error correction at the level of the transport protocol with crucial feedback in the phase of information transfer in the form of a Markov chain with discrete time is proposed. The article analyzes the possibility of increasing the throughput of a reliable transport connection in the presence of interference in the communication channels of the data transmission path through the use of non-laborious methods of noise-resistant coding in a space of grouped protocol data units. Data transmission by the sender is implemented with blocks containing B segments of the transport protocol, where $1 \leq A \leq B$ are informational, and $B - A$ are redundant. In this case, distortion of $B - A$ arbitrary segments in the block allows the recipient to restore all segments of the block. The Markov chain describes the dynamics of the queue of transmitted, but not confirmed blocks of segments. To identify areas of superiority of the transport protocol with the error correction mechanism over the classical transport protocol, the gain function in the multidimensional feature space of protocol parameters, transport connection characteristics and error correction method parameters is constructed by the performance criterion. To reduce the complexity of the numerical analysis of the increase in throughput of the data transmission path controlled by the transport protocol using the forward error correction mechanism, methods are proposed for reducing the dimension of the parametric space that determines the speed of the transport connection.

Effective options for reducing the dimension of the feature space are cases of absolutely reliable delivery of receipts to the sender of the data stream, unlimited protocol parameters for the window width and timeout duration, as well as the case of a uniform data transmission path in the forward and reverse directions. Under these conditions, it is shown that the gain in throughput increases with increasing the round trip delay of the protocol data units.

Keywords: transport connection; bandwidth; Markov chain; direct error correction; window size; timeout duration; round-trip delay.

KARIM Peshang Hassan (Post-graduate Student, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation).
Email: peshangh@yahoo.com

MIKHEEV Pavel Andreevich (Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, A. Alexandrov Scientific and Research Technological Institute. St. Petersburg, Russian Federation).
E-mail: doka.patrick@gmail.com

PODDUBNY Vasily Vasilyevich (Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation).
Email: vvpoddubny@gmail.com

SUSHCHENKO Sergey Petrovich (Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Applied Informatics, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation).
Email: ssp.inf.tsu@gmail.com

REFERENCES

1. Fall, K. & Stevens, R. (2012) *TCP/IP Illustrated, vol. 1: The Protocols (2nd Edition)*. Addison-Wesley Professional Computing Series.
2. Lundqvist, H. & Karlsson, G. (2004) TCP with end-to-end FEC. *Communications. Int. Zurich Seminar*. Zurich, Switzerland, 2004. pp. 152–156.
3. Barakat, Ch. & Altman, E. (2002) Bandwidth tradeoff between TCP and link-level FEC. *Computer Networks*. 39. pp. 133–150. DOI: 10.1007/3-540-47734-9_10
4. Shalin, R. & Kesavaraja, D. (2012) Multimedia Data Transmission through TCP/IP using Hash Based FEC with AUTO-XOR Scheme. *ICTACT Journal on Communication Technology*. 3. pp. 604–609. DOI: 10.21917/ijct.2012.0086.604
5. Flach, T., Dukkipati, N., Terzis, A., Raghavan, B., Cheng, Yu., Cardwell, N., Jain, A., Hao, S., Katz-Bassett, E. & Govindan, R. (2013) Reducing Web Latency: the Virtue of Gentle Aggression. *ACM SIGCOMM*. pp. 159–170. DOI: 10.1145/2486001.2486014
6. Herrero, R. (2017) Modeling and comparative analysis of Forward Error Correction in the context of multipath redundancy. *Telecommunication Systems. Modelling, Analysis, Design and Management*. 65(4). pp. 783–794. DOI: 10.1007/s11235-016-0267-y
7. Langley, A., Riddoch, A., Wilk, A., Vicente, A., Krasic, C., Zhang, D., Ang, F., Kouranov, F., Swett, I., Iyengar, J., Bailey, J., Dorfman, J., Roskind, J., Kulik, J., Westin, P., Tenneti, R., Shade, R., Hamilton, R., Vasiliev, V., Chang, W.T. & Shi, Z. (2017) The QUIC Transport Protocol: Design and Internet-Scale Deployment. *SIGCOMM'17*. Los Angeles, CA, USA. pp. 183–196.
8. Boguslavsky, L.B. & Gelenbe, E. (1980) Analytical models transmission link control procedures for data computer networks with packet. *Automation and Remote Control*. 7. pp. 181–192.
9. Gelenbe, E., Labetoulle, J. & Pujolle, G. (1978) Performance Evaluation of the HDLC Protocol. *Computer Networks*. 2(4/5). pp. 409–415. DOI: 10.1016/0376-5075(78)90019-3
10. Kokshenev, V.V. & Sushchenko, S.P. (2008) Analysis of the asynchronous performance management procedures link transmission data. *Vychislitel'nye tekhnologii – Computational Technologies*. 15(5). pp. 61–65.
11. Kokshenev, V.V., Mikheev, P.A. & Sushchenko, S.P. (2017) Comparative Analysis of the Performance of Selective and Group Repeat Transmission Models in a Transport Protocol. *Automation and Remote Control*. 78(2). pp. 65–81. DOI: 10.1134/S0005117917020059
12. Kokshenev, V.V., Mikheev, P.A. & Sushchenko, S.P. (2013) Transport protocol selective acknowledgements analysis in loaded transmission data path. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 3(24). pp. 78–94.
13. Kokshenev, V.V. & Sushchenko, S.P. (2015) [Modeling sessions with Markov's chains]. *Teoriya veroyatnostey, sluchaynye protsessy, matematicheskaya statistika i prilozheniya* [Theory of probability, random processes, mathematical statistics and applications]. Proc. of the International Conference. Minsk, February 23–26, 2015. pp. 311–316.
14. Mikheev, P.A., Sushchenko, S.P. & Tkachev, R.V. (2017) Estimation of High-Speed Performance of the Transport Protocol with the Mechanism of Forward Error Correction. *Communications in Computer and Information Science*. 700. pp. 259–268.
15. Olifer, V.G. & Olifer, N.A. (2016) *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols]. 5th ed. St. Petersburg: Piter.