

*А.М. БЫЧКОВ,*

*Г.А. КУЧУК,* канд. техн. наук,

*А.А. МОЖАЕВ,* канд. физ.-мат. наук

## **МЕТОД ПРОГНОЗА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРАФИКА КРИТИЧЕСКОГО УЧАСТКА МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ**

Для критичної ділянки магістралі мультисервісної мережі запропонований метод прогнозу фрактального трафіка, який не потребує оперативного обчислення показника Херста.

For a critical site of a highway a multiservice network the method of the forecast fractal traffic, not demanding operative calculation of a parameter of Hurst is offered.

**Введение.** Теория фрактального трафика позволяет адекватно отображать сложные процессы, происходящие в мультисервисных сетях (МС) с коммутацией каналов [1]. В рамках этой теории появилось значительное число работ о методах прогнозирования интенсивности трафика, в частности, о практическом подходе к прогнозированию качества обслуживания [2], о прогнозировании трафика Интернет [3, 4], о новых подходах к прогнозированию самоподобного трафика [5 – 7]. В ряде работ рассматривается возможность использования различных методов исследования фрактального трафика для повышения качества обслуживания в сети [8 – 10]. Однако, необходимый для большинства из рассмотренных работ количественный расчет оценки границ изменения масштабных и частотных свойств анализируемого процесса требует дополнительной информации в режиме, близком к режиму реального времени, что на практике зачастую приводит к существенному превышению допустимых объемов передаваемой по магистральным линиям служебной информации. Поэтому задача нахождения как можно более точного предсказания магистрального трафика, особенно на критических участках сети, без перегрузки сети служебными пакетами, является **актуальной**. В связи с этим **целью данной статьи** является разработка и обоснование метода прогнозирования магистрального трафика в критическом участке магистрали с наибольшей возможной точностью без существенного увеличения объема служебной информации.

**Постановка задачи и предварительный анализ.** В настоящее время существующие и перспективные телекоммуникационные сети строятся на основе полной интеграции всех сетевых ресурсов. Важной особенностью таких сетей является полностью унифицированное представление информационных сообщений, создаваемое различными разнородными источниками. Одним из вариантов, используемым для анализа такой сложной многоуровневой иерархической системы, какой в настоящее время является

мультисервисная сеть [1], является ее моделирование на основе линейризуемой системы массового обслуживания [2].

В качестве объекта исследования рассмотрим модель сети, магистральный граф которой имеет критические участки, на которых между вершинами-маршрутизаторами существуют ребра-мосты, называемые «критическими участками» (КУ) магистрали (рис. 1, где  $s_1, s_2, \dots, s_N$  – источники информации,  $r_1, r_2, \dots, r_M$  – потребители информации,  $R$  – маршрутизаторы канала, являющегося критическим участком).

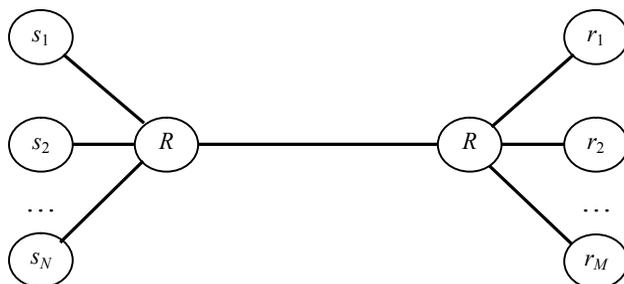


Рис. 1. Топология сети с одним КУ

Для рассматриваемой топологии МС с КУ присущи все характерные особенности телекоммуникационного трафика интегрированной сети с коммутацией пакетов, в том числе его самоподобность и масштабная инвариантность [10 – 12].

Для исследования данного участка магистрального трафика используем локальные пробные пакеты (ПрП), обязательно проходящие через критический участок. Пробный трафик формируем из ПрП объемом  $L$ , отправляемых в МС через малые промежутки времени параллельно с магистральным трафиком (рис. 2). Длительность интервала времени между прибытием последовательных ПрП в место назначения используется для определения характера магистрального трафика на КУ МС.

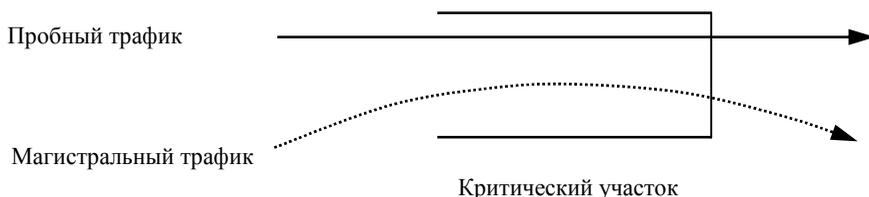


Рис. 2. Исследование характера трафика на критическом участке МС

Образец временной диаграммы при посылке двух пробных информационных пакетов представлен на рис. 3.

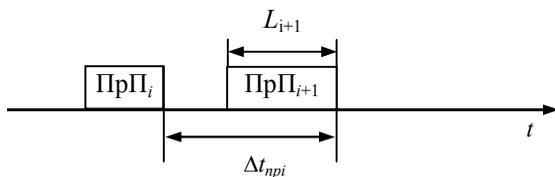


Рис. 3. Анализ двух последовательных ПрП

Для упрощения анализа критического участка МСТС с учетом предложенной топологии сети и модели пробных пакетов сделаем локализующие предположения:

- 1) в сети существует только один критический участок;
- 2) порядок прохождения пакетов не изменится как до, так и после критического участка;
- 3) ёмкость критического участка известна.

С учетом данных предположений можно точно сосчитать объем магистрального трафика между двумя ПрП. Исходя из предположения 2 интервал времени между двумя пробными пакетами не изменится после того, как они пройдут критический участок. Без предположения 2 (если два ПрП где-то, кроме критического участка, получают дополнительную задержку), интервал времени между прибытием двух служебных пакетов, возможно, будет искажен, что приведёт к недооценке или переоценке магистрального трафика.

Если в критическом участке сети отсутствует какой-либо магистральный трафик, а интервал времени между двумя соседними ПрП удовлетворяет неравенству

$$\Delta t_{npi} < L/C, \quad (1)$$

где  $C$  – ёмкость критического участка, то разность времен прибытия двух пакетов в пункт назначения рассчитывается как

$$t'_{npi} = L/C. \quad (2)$$

Выражение (2) означает, что при выполнении условия (1) и непревышении ёмкости  $C$  над  $L$ , трафик может обслуживаться за время  $L/C$ , прежде чем первый пакет покинет очередь, а второй пакет будет в очередь помещён, т.е. временной интервал между прибытием двух пакетов составляет  $L/C$ .

Магистральный трафик, поступающий к потребителю в интервале времени  $[t_0, t_0 + t]$  обозначим как  $f_i(t_0)$ , где  $t_0$  – момент времени, когда первый пакет пересекает критический участок сети. Тогда интервал времени между прибытием пробных пакетов в место назначения равен

$$\tau = \frac{L + f_i(t_0)}{C}, \quad (3)$$

т.е. зная  $C$  и  $L$ , можно сделать заключение об объеме магистрального трафика за интервал времени  $[t_0, t_0+t]$ .

Следовательно, если периодически передавать пары пробных пакетов и измерять временной интервал между их прибытием, то из выражения (3) можно получить значение магистрального трафика  $f_i(t_0)$ . Однако, значение  $C$  обычно велико, а значение  $L$  чаще всего несоизмеримо мало по сравнению с  $C$ , т.е. для определения магистрального трафика придётся отправить значительное количество пар пробных пакетов, что приведет к существенной нагрузке КУ МС.

**Дополнительные обозначения.** Для стационарного случайного процесса  $f_t, t = 0, 1, 2, \dots$  определим изоморфный агрегированный процесс как

$$f_k^m = \frac{1}{m} \sum_{i=(k-1)m+1}^{km} f_i, k = 1, 2, 3, \dots$$

Пусть  $r(k)$  и  $r^{(m)}(k)$  – автокорреляционные функции (АКФ) процессов  $f_t$  и  $f_k^{(m)}$  соответственно. Если

$$r(k) \sim k^{-\beta} L_1(k), k \rightarrow \infty, 0 < \beta < 1, \quad (4)$$

где  $L_1(k)$  – медленно изменяющаяся функция при  $k \rightarrow \infty$ , то  $f_t$  – процесс с долговременной зависимостью (ДВЗ), характеризующийся параметром Херста  $H = -\beta/2 + 1$ . Если  $r(k) = r^{(m)}(k)$ , то процесс  $f_t$  является самоподобным процессом второго рода. Поэтому, получив оценку структуры АКФ магистрального трафика на некотором временном интервале, можно с определенной погрешностью провести оценку структуры АКФ магистрального трафика в любой момент времени.

**Описание метода.** В предлагаемом методе прогнозирования телекоммуникационного трафика  $(n + 1)$  ПрП отправляются друг за другом через малый промежуток времени  $\Delta t$ . Времена между прибытиями ПрП составляют ряд  $\tau_i, i = 1, \dots, n$ , позволяющий определить ряд  $f_i(t_i)$  и, соответственно, агрегированный ряд  $f_a(i)$ , анализируя который, получаем

$$\hat{f}_a(n+1) = [a_1, \dots, a_n] \begin{bmatrix} f_a(1) \\ \dots \\ f_a(n) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – коэффициенты, полученные с помощью метода наименьших квадратов (МНК):

$$[a_1, \dots, a_n] = [R(n) \dots R(1)] \times \begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(n-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(n-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R(n-1) & R(n-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а  $R(n)$  – ковариационная функция временных интервалов с оценкой

$$R(i) \cong R^{(m)}(i) = \frac{1}{n} \sum_{\ell=i+1}^n f_a(\ell) f_a(\ell-i). \quad (7)$$

Для определения качества прогнозирования трафика предлагаемым способом определим среднеквадратическую ошибку прогноза [5, 11]:

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 - [R(n) \dots R(1)] \cdot \begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(n-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(n-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R(n-1) & R(n-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R(n) \\ R(n-1) \\ \dots \\ R(1) \end{bmatrix},$$

в которой можно использовать следующий асимптотический результат [7]:

$$R(\tau) \sim H(2H-1)\tau^{2H-2}.$$

После получения прогноза для  $\hat{f}_a(n+1)$  можно, расширив последовательность  $f_a(k)$ , получить прогноз значений  $\hat{f}_a(n+2)$  и т.д. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока не будут сделаны требуемые  $N$  прогнозов.

**Оценка параметров метода.** Для оценки значений  $\tau_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , воспользуемся тем, что свойство ДВЗ сетевого трафика подразумевает относительно низкое уменьшение функции автокорреляции. Результаты моделирования показали, что предлагаемый интервал изменений значений  $\tau_i$ , при котором прогноз возможен, можно оценить в пределах от 0,02 до 0,1 секунды.

Определение величин параметров прогнозирования  $n$  и  $N$  предлагается проводить при помощи соответствующей имитационной модели для топологии, предложенной на рис. 1. В табл. 1 для различных величин  $n$  представлены средние значения относительной погрешности прогноза (число прогнозов модели – 200, число задействованных виртуальных соединений – от 20 до 50):

$$\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{|\hat{f}(t) - f(t)|}{f(t)}.$$

Увеличение значения  $n$  приводит к уменьшению относительной ошибки прогнозирования, т.е. результат прогнозирования точнее. При  $n \geq 20$  точность прогнозирования изменяется незначительно, что позволяет определить значение параметра  $n = 20$ , как рационального для предложенного метода прогноза.

Таблица 1

Относительная погрешность прогноза

$n$	5	10	15	20	30	40	50
ошибка, %	15,1	11,6	9,3	7,7	7,5	7,5	7,4

Результаты моделирования для определения требуемого значения параметра  $N$  при выбранном параметре  $n$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Относительная погрешность предсказания для различных значений  $N$

$N$	$n$	$2n$	$3n$	$4n$	$5n$	$6n$	$7n$	$8n$
ошибка, %	7,8	8,5	9,1	9,8	10,6	11,8	15,4	19,8

При значительном превышении значения параметра  $n$ , относительная погрешность прогноза резко возрастает и достигает значений более 15 %, т.е. в данном случае желательно ограничиться значением  $N = 6n$ . Механизм такого прогнозирования заключается в том, что вначале отправляется  $n+1$  близко расположенных пробных пакетов и делается заключение о магистральном трафике в следующем  $6 \cdot n \cdot t$  периоде и так далее.

**Сравнение с прогнозами магистрального трафика, основанными на фрактальных методах.** Для предложенной топологии критического участка с магистральным трафиком, обладающим свойством ДВЗ, были рассмотрены следующие фрактальные модели, получившие наибольшее распространение: модель фрактального броуновского движения (ФБД) и фрактальная модель ARIMA (FARIMA). Сравнение прогнозов, основанных на использовании этих моделей, с прогнозом, полученным в соответствии с предложенным методом, проводилось по нижеперечисленным показателям.

1. **Точность.** На рис. 4 представлены зависимости относительных среднеквадратических погрешностей от величины показателя Херста  $H$ . Анализ предложенного графика показывает, что при значениях  $H \leq 0,85$  все рассматриваемые кривые расположены близко друг другу, а при  $H > 0,85$  кривая, соответствующая модели FARIMA, достаточно сильно отличается от остальных. Однако, анализ реального трафика указывает на то, что значение параметра Херста редко превышает 0,85, т.е. все три модели одинаково хорошо подходят для прогнозирования трафика на критическом участке [8].

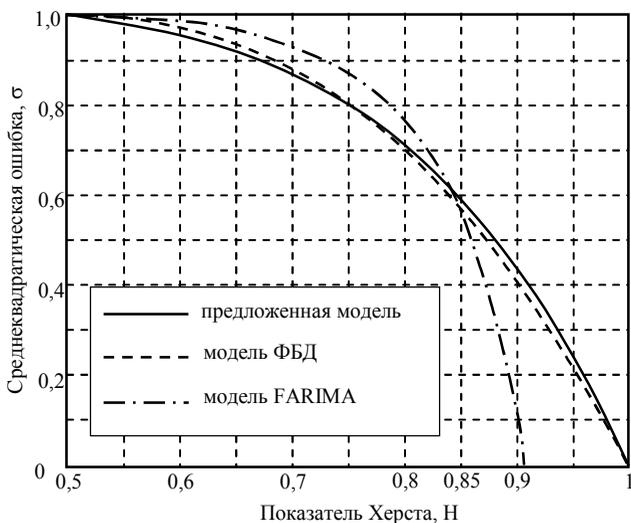


Рис. 4. Сравнение среднеквадратических ошибок прогноза

2. **Реализация.** Прогноз, основанный на фрактальной модели ФБД, использует оценку значения показателя Херста, получаемую в оперативном режиме, а на модели FARIMA – аналогичную оценку и также в оперативном режиме [3]. Получение данных оценок в рамках упомянутых моделей требует значительных вычислительных затрат, т.е. реализация прогнозов, основанных на моделях ФБД и FARIMA – достаточно трудоемкий процесс. Предлагаемый метод не требует проведения оценки показателя Херста, однако, для его функционирования необходимо вычисление ковариационной функции временных интервалов согласно (7) для прогнозируемого трафика. В настоящее время существуют быстрые алгоритмы [3, 7], которые позволяют проводить эти вычисления в режиме реального времени с незначительными затратами вычислительного ресурса.

**Возможность применения метода.** Для проверки возможности прогноза с помощью предложенного метода было проведено исследование показателя Херста для реального трафика, проходящего через критический участок (рис. 5, а). Оценка изменения значений показателя Херста приведена на рис. 5, б. Как видно из графика рис. 5, б, исследуемый трафик проявляет ДВЗ, а величина показателя Херста для данной, достаточно характерной реализации, лежит в интервале  $0,6 \leq H \leq 0,8$ , что, во-первых, хорошо согласуется с требованиями, предъявляемыми к предлагаемому способу прогноза, а, во-вторых, соответствует аналогичным измерениям [1, 3, 8].

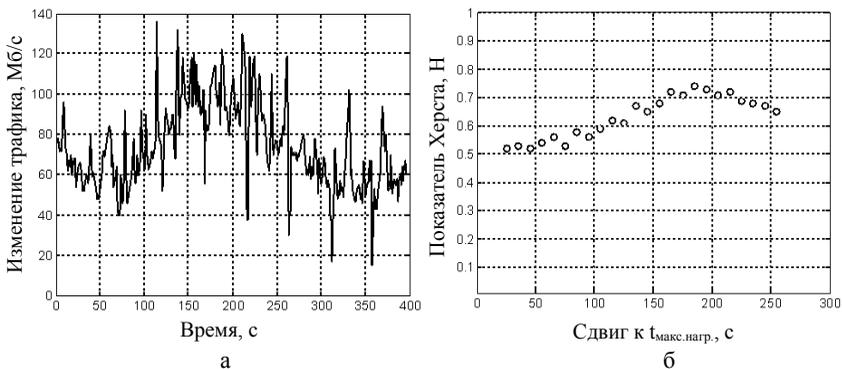


Рис. 5. Расчет для реального трафика (а) показателя Херста (б)

**Выводы.** Для критического участка магистрали мультисервисной сети предложен метод прогноза фрактального трафика, не требующий оперативного расчета показателя Херста. Предложенный метод прогноза делает хорошие оценки среднего значения магистрального трафика, не перегружая сеть служебной информацией. В дальнейших исследованиях в данном направлении предполагается разработать способ адаптивного изменения базовых параметров предложенного метода.

**Список литературы:** 1. Мультисервисные сети / В.В. Величко, Е.А. Субботин, В.П. Шувалов, А.Ф. Ярославцев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 592 с. 2. Кучук Г.А., Гахов Р.П., Пашиев А.А. Управление ресурсами инфотелекоммуникаций. – М.: Физматлит, 2006. – 220 с. 3. Leland W.E., Taqqu M.S., Willinger W. On the self-similar nature of Ethernet traffic // IEEE/ACM Transactions of Networking. – 1994. – 2 (1). – P. 1-15. 4. Trajkovic L., Niedhardt A. Internet traffic prediction // Centre for Systems Science, Simon Fraser University. – Mar. 2000. – Vol. 12. – Is. 1. – P. 123-131. 5. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / Г.А. Кучук, А.А. Можжев, Р.Э. Пащенко, К.М. Руккас и др. – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с. 6. Кучук Г.А., Можжев О.О., Воробйов О.В. Метод прогнозування фрактального трафіка // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 6 (18). – С. 181-188. 7. Koucheryavy Y., Harju J. A novel approach for self-similar traffic prediction // Proc. of the St.-P., Russia. – 2002. – P. 172-179. 8. Кучук Г.А., Можжев А.А. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 6 (18). – С. 261-271. 9. Можжев О.О. Моделирование трафіка телекомунікаційних мереж на базі масштабної інваріантності // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 6 (12). – С. 79-82. 10. Кучук Г.А., Можжев О.О., Воробйов О.В. Анализ та моделі самоподібного трафіка // Авіаціонно-косміческая техника и технология. – 2006. – № 9 (35). – С. 173-180. 11. Можжев А.А. Оценка достоверности определения параметров телекоммуникационного трафика // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 9 (58). – С. 53-55. 12. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.

Поступила в редакцию 30.03.2007