

УКД 621.391

## ОСОБЕННОСТИ ВИДЕОТРАФИКА ДЛЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ

**Д. В. Тарасов**, директор по научному направлению ФГУП ЦНИИС

**А. И. Парамонов**, начальник сектора ФГУП ЛОНИИС, к. т. н.

**А. Е. Кучерявый**, и.о. генерального директора ФГУП ЛОНИИС, д. т. н.; akouch@mail.ru

**Ключевые слова:** сети следующего поколения, передача телевизионных сигналов по сетям IP, мониторинг видеотрафика, вейвлет-преобразование, модельная сеть.

**Введение.** Концепция сетей связи следующего поколения NGN (Next-Generation Network), стандартизированная в рекомендациях Сектора стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) [1, 2] предоставляет оператору возможность организации на сети неограниченного числа услуг. Такая характеристика NGN, с одной стороны, чрезвычайно привлекательна для операторов и пользователей, а с другой, требует нового подхода к внедрению и эксплуатации NGN и ее фрагментов.

В последнее время общепризнанно, что особое внимание для обеспечения эффективного внедрения и эксплуатации следует уделять тестированию [3,4] и мониторингу [5, 6]. В NGN задачи тестирования и мониторинга породили новую стратегическую проблему, так называемую глобальную совместимость, под которой понимается совместимость как технических средств, так и услуг, классов и параметров качества обслуживания [7].

Одной из наиболее сложных задач в рамках обеспечения глобальной совместимости является тестирование и мониторинг видеотрафика. Видеотрафик, являясь по природе самоподобным [8], играет все большую роль при внедрении услуг NGN. Ниже будут рассмотрены особенности видеотрафика для NGN, в которой услуги по передаче видео реализуются в основном на базе технологии IPTV. В основе изучения особенностей трафика IPTV лежат результаты измерений, проведенных на модельной сети ЦНИИС [9].

**Характеристика IPTV-трафика и используемые в статье методы.** IPTV-трафик является самоподобным. Определение самоподобия дается через автокорреляционную функцию (АКФ). Пусть процесс задан последовательностью  $X = (X_1, X_2, \dots, X_t)$  где  $t = 1, 2, \dots$ . Его автокорреляционная функция:

$$r(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{(N-k)\sigma^2}, \quad (1)$$

где  $N$  — число элементов последовательности;  $\sigma^2$  — дисперсия.

Под агрегированным процессом понимается процесс, заданный последовательностью, элементы которой получены из элементов исходного процесса путем усреднения по блокам из  $m$  последовательных элементов.

Агрегированный процесс по блокам длины  $m$ :

$$X^{(m)} = (X_1^{(m)}, X_2^{(m)}, \dots, X_t^{(m)}), \quad (2)$$

$$\text{где } X_t^{(m)} = \frac{1}{m}(X_{m-m+1} + \dots + X_{tm}) \quad (3)$$

его автокорреляционная функция  $r_m(k)$ .

Процесс  $X$  называется строго самоподобным в широком смысле, если

$$r_m(k) = r(k), \text{ где } m = 2, 3, \dots \quad (4)$$

Иными словами, процесс строго самоподобен в широком смысле, если при его агрегировании по блокам любой длины АКФ исходного процесса и агрегированных процессов равны, т. е. коэффициент корреляции не изменяется при усреднении по блокам.

Процесс  $X$  называется асимптотически самоподобным (second order), если

$$\lim_{m \rightarrow \infty} r_m(k) = g(k), \quad (5)$$

т. е. при усреднении по блокам  $m \rightarrow \infty$ , и процесс сходится к самоподобному.

Процесс  $X$  называется строго самоподобным в узком смысле, если

$$m^{1-H} X^{(m)} \stackrel{\bullet}{=} X \text{ (равенство распределений)}, \quad (6)$$

где  $H$  — параметр Херста.

Самоподобие в узком смысле означает, что функции распределения исходного и агрегированных процессов одинаковы. Степень самоподобия характеризуется коэффициентом Херста.

Из (6) следует, что для дисперсий процессов

$$D(X^{(m)}) = m^{2(H-1)} D(X). \quad (7)$$

Часто при оценке параметра Херста пользуются выражением:

$$\log \left( \frac{D(x^m)}{D(x)} \right) = (2H - 2) \log(m). \quad (8)$$

Здесь скобка  $(2H - 2)$  имеет геометрический смысл коэффициента наклона прямой, аппроксимирующей функцию

$$\log \left( \frac{D(x^m)}{D(x)} \right) = f(\log(m)). \quad (9)$$

Для моделирования такого потока используют различные методы, в частности, так называемый ON/OFF-метод [10]. Рассмотрим его подробнее. Метод заключается в том, что требуемый поток формируется путем объединения потоков от нескольких источников. Каждый из источников генерирует простейший поток заявок, но при этом каждый из источников «модулируется» двоичной последователь-

ностью. Когда модулирующий уровень равен «1», заявки, генерируемые источником, поступают на выход, когда уровень «0», заявки на выход не поступают. Сформированные таким образом последовательности объединяются и образуют результирующий поток. Интервалы времени ON и OFF строго чередуются, их продолжительность является случайной величиной. В качестве распределения ON и OFF интервалов в [10] предлагается использовать распределение Парето:

$$F(x) = 1 - \left(\frac{\beta}{x}\right)^\alpha; \quad f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\beta}{x}\right)^{\alpha+1};$$

$$E(X) = \frac{\alpha\beta}{\alpha-1}; \quad D(X) = \left(\frac{\beta}{\alpha-1}\right)^2 \frac{\alpha}{\alpha-2}. \quad (10)$$

Иллюстрация данного метода приведена на рис. 1 ( $G_i$  —  $i$ -й поток,  $GS$  — результирующий поток).

В качестве примера построена модель потока с использованием трех источников трафика. Каждый отдельный источник генерирует простейший поток заявок, производя последовательность псевдослучайных чисел с экспоненциальным распределением вероятности, имитирующим интервалы времени между заявками. Пример реализации такого процесса и число заявок, произведенных источником в единицу времени, приведен на рис. 2.

Пример реализации потока, образованного объединением потоков от трех ON/OFF-источников (модель самоподобного процесса), показан на рис. 3.

Используя для оценки степени самоподобия выражение (9) для потока одного источника, получим зависимость нормализованной дисперсии для потока, образуемого одним источником от интервала агрегирования (рис. 4).

Как видно из приведенного рисунка, коэффициент наклона прямой, аппроксимирующей точки, полученные при

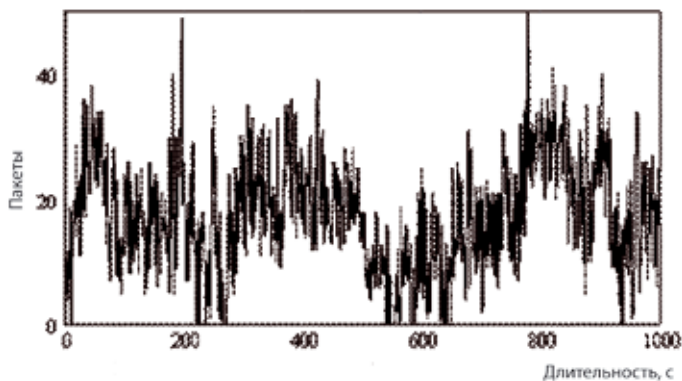


Рис. 3

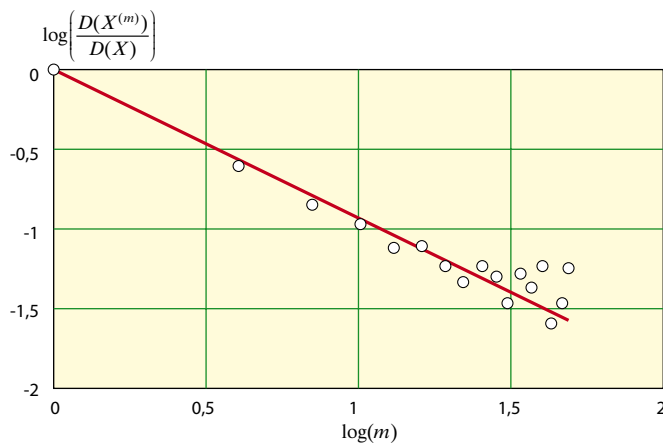


Рис. 4

вычисления (9), близок к минус единице, точнее он составляет 0,89. Тогда из (7) получим, что параметр Херста равен  $H = 0,56$ .

Диапазон возможных значений параметра Херста  $0,5 \leq H \leq 1$ , причем нижняя граница  $H = 0,5$  соответствует полному отсутствию, а верхняя — максимальной степени самоподобия. Таким образом, поток, производимый одним источником, может быть определен как простейший, на что указывает близость  $H$  к 0,5.

На рис. 5. приведена зависимость нормализованной дисперсии от интервала агрегирования для объединенного потока от трех ON/OFF-источников. Коэффициент наклона прямой составляет 0,17, что соответствует  $H = 0,92$ . Таким

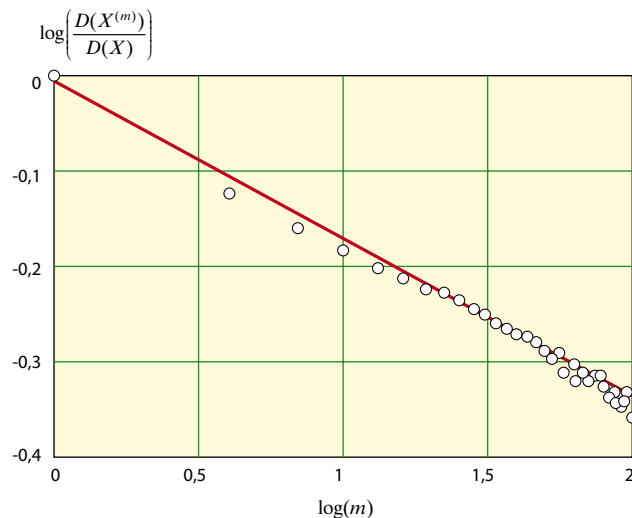


Рис. 5

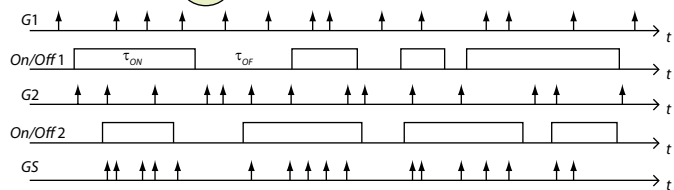
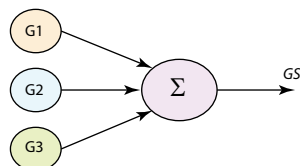


Рис. 1

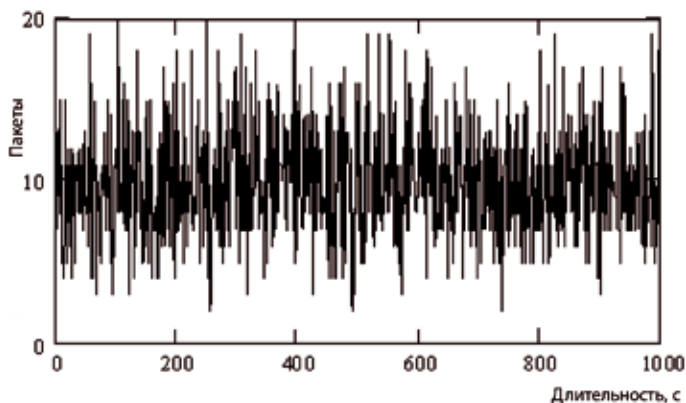


Рис. 2

образом, полученный поток обладает свойством самоподобия.

Далее для оценки IPTV-трафика будем использовать также дискретное вейвлет-преобразование.

Вейвлет-преобразование строится на основе единственной базисной функции  $\psi(t)$ , имеющей самоподобный характер и принадлежащей пространству  $L^2(R)$ , т.е. всей числовой оси. Существует достаточно большое число различных вейвлетов. Пакетному трафику в наибольшей степени соответствует вейвлет Хаара, который и будем использовать ниже:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2; \\ -1, & 1/2 \leq t < 1; \\ 0 & t < 0, t \geq 1. \end{cases}$$

Поскольку по результатам измерений формируется дискретный набор данных на конечном интервале времени, далее для интерпретации результатов измерения воспользуемся дискретным вейвлет-преобразованием:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_k X_k (\Phi_{k+1} - \Phi_k);$$

$$\Phi_k = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{t_k} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt;$$

$$X(t) = \sum_k U_{J_0,k} \Phi_{0,k}(t) + \sum_{J=J_0}^{\infty} \sum_k W_{J,k} \Psi_{J,k}(t),$$

где  $U_j$  и  $W_j$  — коэффициенты вейвлет-преобразования;  $a$  — параметр масштаба;  $b$  — параметр формы.

Для создания модели трафика на основе результатов измерений используем обратное вейвлет-преобразование вида:

$$X(t) = \sum_k U_{J_0,k} \Phi_{0,k}(t) + \sum_{J=J_0}^{\infty} \sum_k W_{J,k} \Psi_{J,k}(t);$$

$$W_{J,k} = 2^{-\frac{J}{2}} A_{J,k_j} U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} [1 + (-1)^{k_i} A_{i,k_i}];$$

$$U_{J,k} = 2^{-\frac{J}{2}} U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} [1 + (-1)^{k_i} A_{i,k_i}].$$

Коэффициенты  $U_j$  и  $W_j$  определяются при этом в соответствии с предложенной в [11] мультифрактальной моделью (MWM — Multifractal Wavelet Model) и вычисляются на основе значений случайной величины из интервала  $-1 \leq A_{i,k_i} \leq 1$  по формулам:

$$W_{J,k} = A_{J,k_j} U_{J,k};$$

$$U_{J,k} = 2^{-\frac{J}{2}} U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} [1 + (-1)^{k_i} A_{i,k_i}].$$

Соответствующее программное обеспечение доступно в [12].

**Измерения трафика IPTV и результаты анализа.**

Измерения проводились на модельной сети ЦНИИС [9]. Фрагменты фильма «Охотник» на DVD анализировались для различных периодов агрегирования данных. Анализу были подвергнуты потоки пакетов на уровне RTP, т.е. фактически трафик IPTV. Исследования проводили на ненагруженной модельной сети, что соответствует алгоритму быстрого перенаправления (EF — Expedited Forwarding) в концепции дифференцированных услуг (DiffServ) [8].

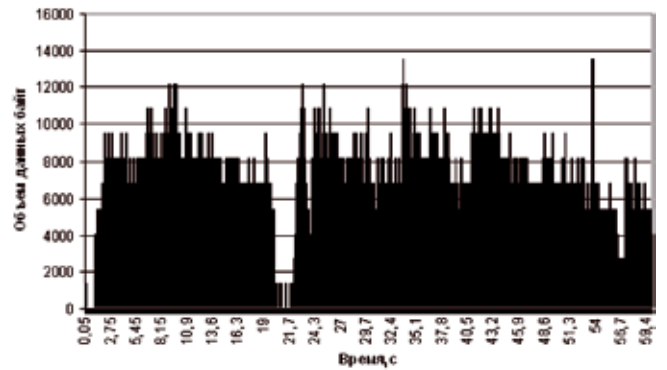


Рис. 6

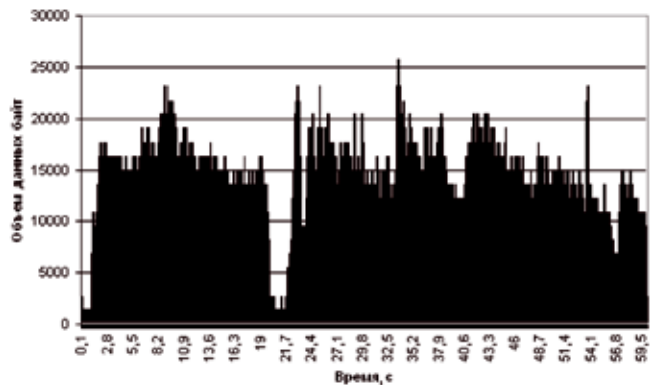


Рис. 7

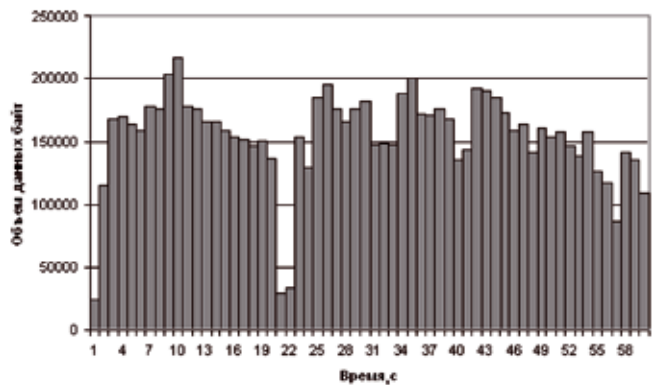


Рис. 8

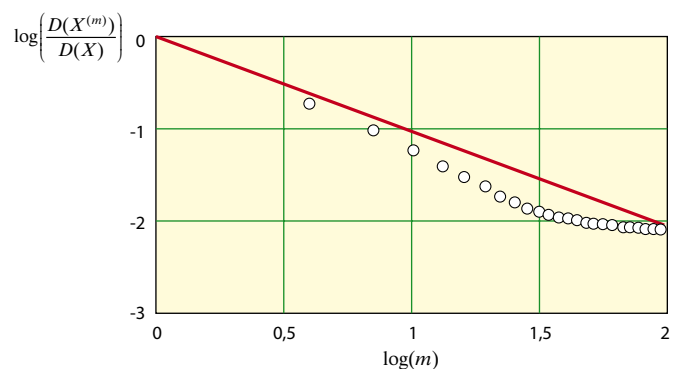


Рис. 9

Фрагмент минимальной длины составил 60 с и включал 6863 кадра, каждый длиной 1356 бит. На рис. 6—8 показаны агрегированные фрагменты данных для периодов

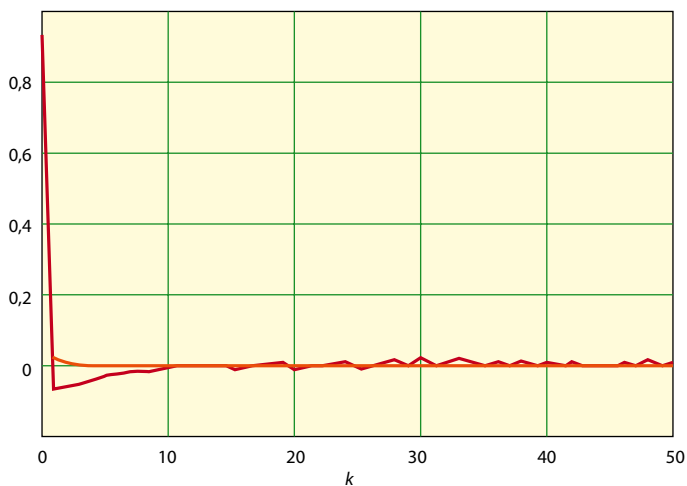


Рис. 10

агрегации 50, 100 и 1000 мс соответственно. По результатам обработки данных были найдены оценки параметра Херста и АКФ.

На рис. 9 приведена зависимость  $\log\left(\frac{D(x^m)}{D(x)}\right)$  от  $\log m$

(нормализованная дисперсия для фрагмента длительностью 60 с), которая для измеренных значений оказывается почти линейной. Естественно, что при этом и оценка параметра Херста  $H = 0,48$  близка к 0,5.

На рис. 10 представлена АКФ для измеренного трафика. Отметим, что если значение параметра Херста  $H = 0,48$  характеризует поток как очень близкий к простейшему, то АКФ на рис. 10 не соответствует АКФ простейшего потока.

Еще нагляднее это видно из сравнения рис. 11 и 12, на которых приведены сравнительные характеристики вейвлет-преобразований для простейшего потока и для измеренного (при длине фрагмента фильма 60 с) соответственно. Цветовая гамма на рис. 11 и 12 при максимальном насыщении соответствует минимальному значению коэффициентов вейвлет-преобразования, а при минимальном — наоборот.

Видно, что при малом значении длительности фрагмента IPTV параметр Херста не является достаточной характеристикой для оценки потока трафика. При значении параметра Херста, близком к его значению для простейшего потока, поток является псевдопуассоновским, что особенно явно проявляется при анализе вейвлет-преобразований.



Рис. 11



Рис. 12

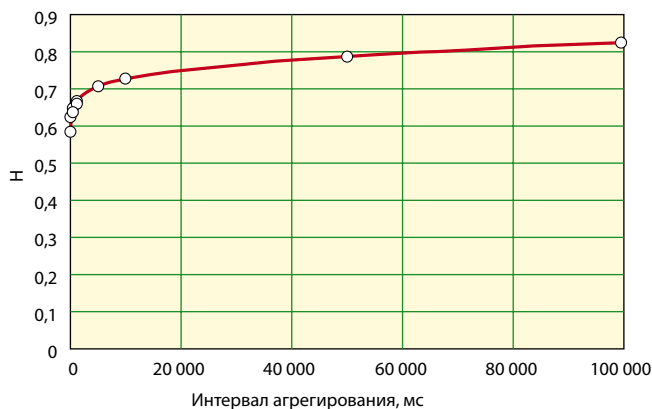


Рис. 13

Проанализируем 45-минутный фрагмент того же фильма при различных значениях интервала агрегирования данных. На рис. 13 приведена зависимость оценки параметра Херста от длины интервала агрегирования. Как видим, для 60-секундного фрагмента недостаточно данных для интервалов агрегирования в 50 000 мс и выше, т. е. можно сказать, что трафик IPTV является асимптотически самоподобным и в случае достаточно малых фрагментов самоподобие не проявляется.

Хорошее практическое применение имеет зависимость рис. 13. Действительно, для систем мониторинга IPTV можно рекомендовать значение интервала агрегирования данных не менее 5 с.

**Параметр Херста и вейвлет-преобразование IPTV-трафика.** Проанализируем далее фрагмент трафика фильма «Охотник» размером 260 000 пакетов и длительностью 45 мин. На рис. 14 и 15 показаны реализации трафика при интервалах агрегирования ( $a_i$ ) 100, 1000, 10000 и 100 000 мс для измеренного и модельного трафика, соответственно. Модельный трафик получен путем обратного преобразования с помощью метода MWM [12].

Средние значения интервалов времени между поступлением пакетов и средние значения интенсивности потока пакетов достаточно близки. В первом случае измеренное среднее значение интервала времени  $\bar{t}_1 = 0,0109$  мс, во втором —  $\bar{t}_2 = 0,0112$  мс. Для средней интенсивности потока пакетов соответствующие значения составят  $a_1 = 91,74$  пакетов/с и  $a_2 = 89,29$  пакетов/с.

На рис. 16 приведены АКФ для измеренного и модельного пакетов. АКФ определены следующим образом: — для измеренного потока

$$r(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{(N-k)\sigma^2};$$

— для модельного

$$r(k) = \frac{1}{2}((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}).$$

Линейные зависимости  $\log\left(\frac{D(x^m)}{D(x)}\right)$  от  $\log(m)$  представ-

лены соответственно на рис. 17. Оценка параметра Херста в обоих случаях очень близка к  $H = 0,8$ . Подобны и вейвлет-преобразования для измеренного и модельного потоков, показанные на рис. 18.



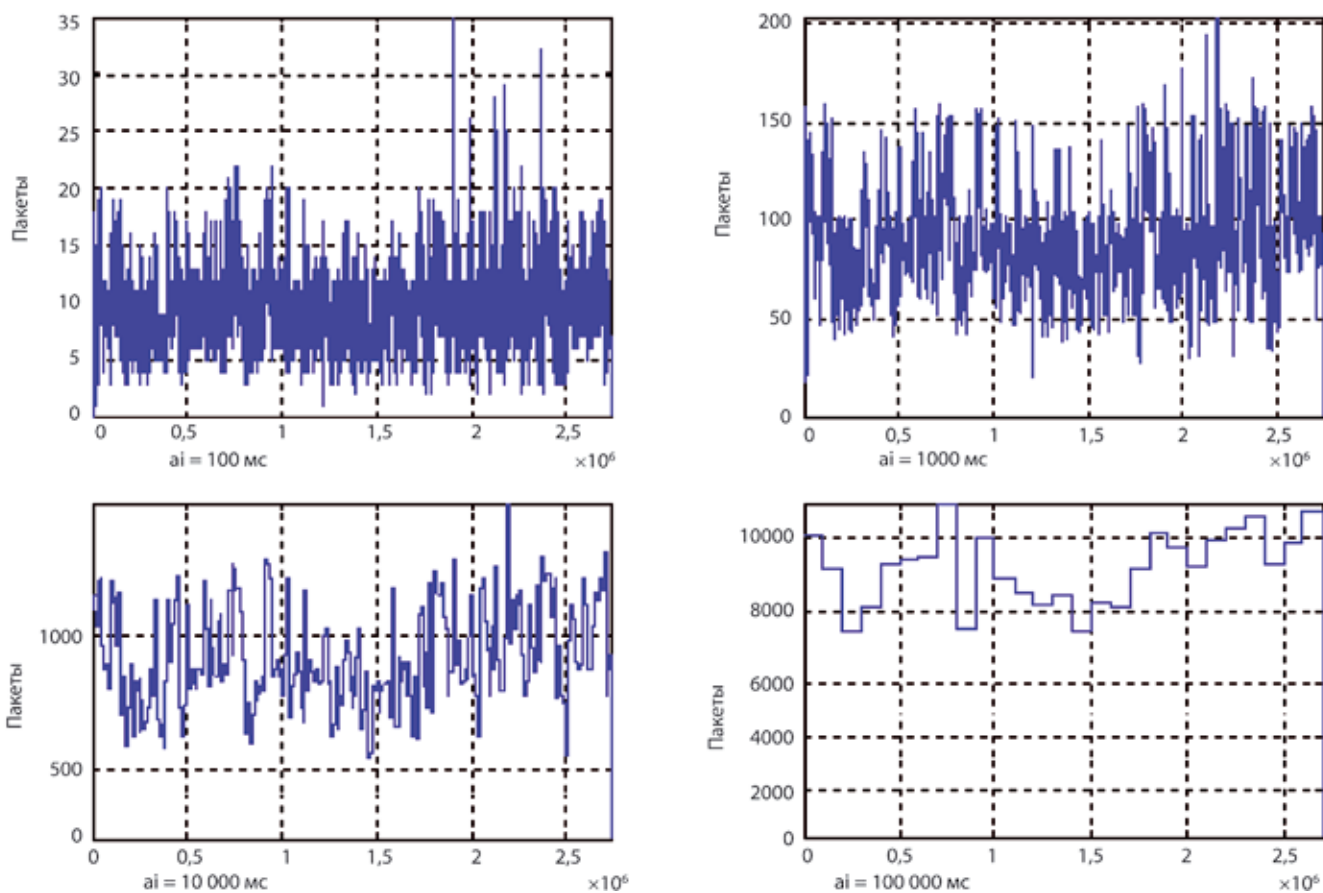


Рис. 14

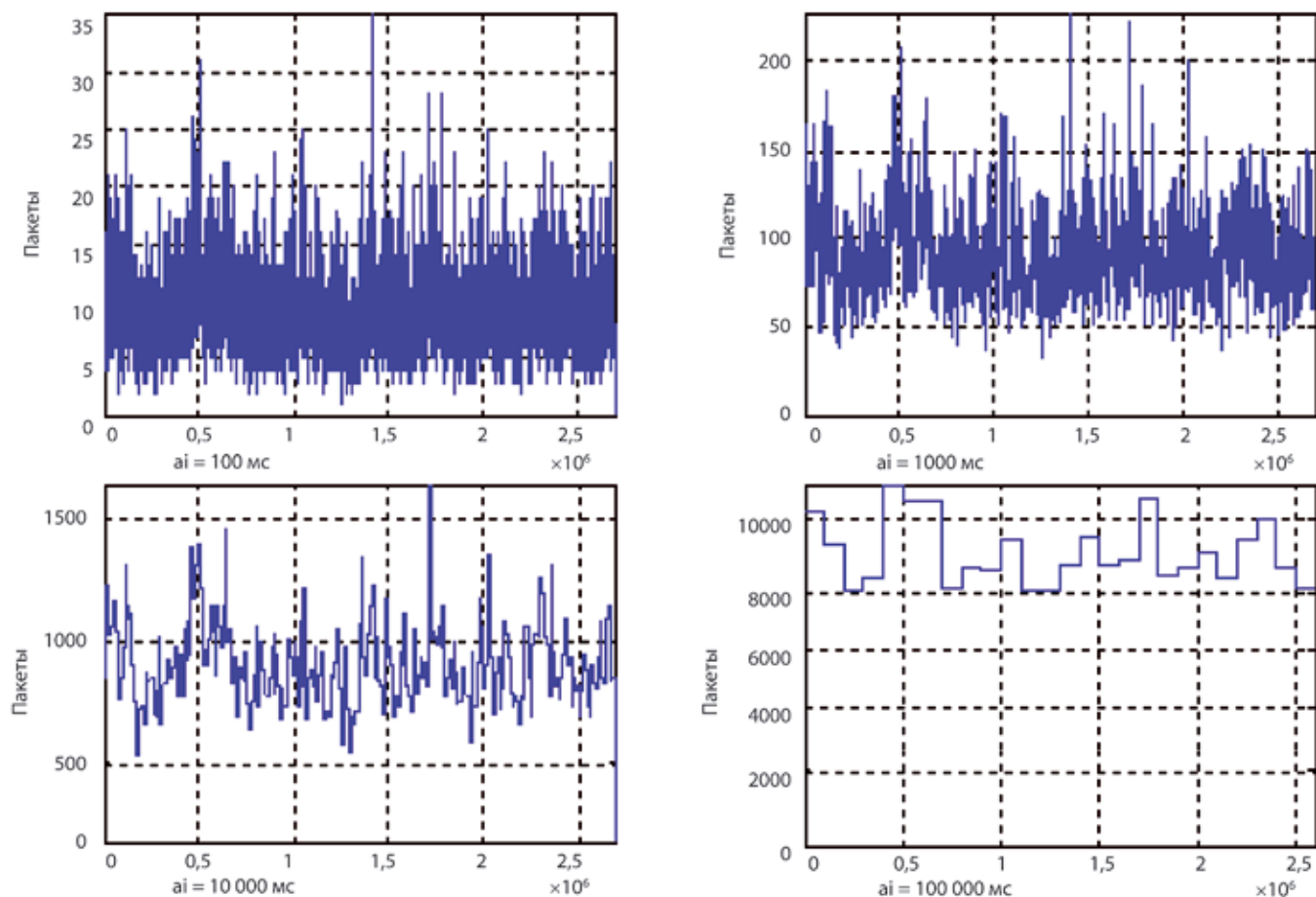
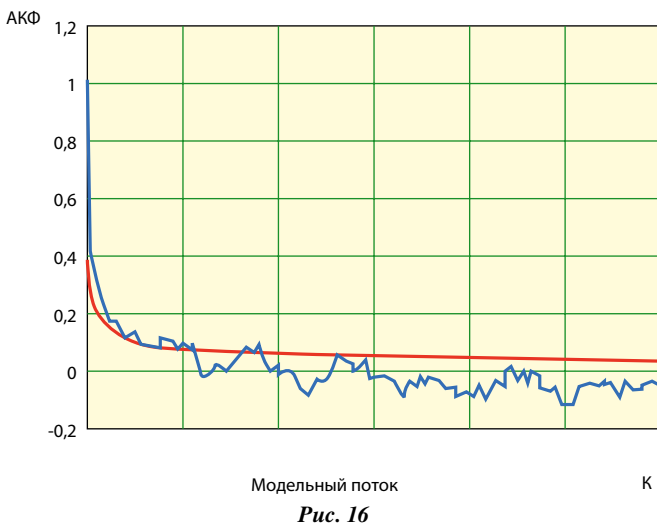
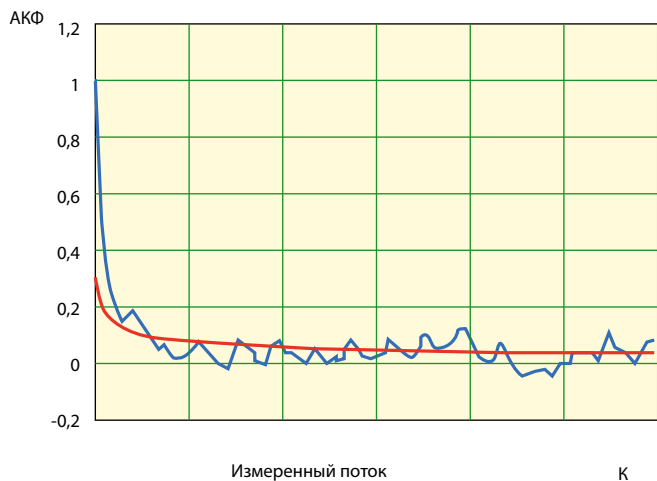
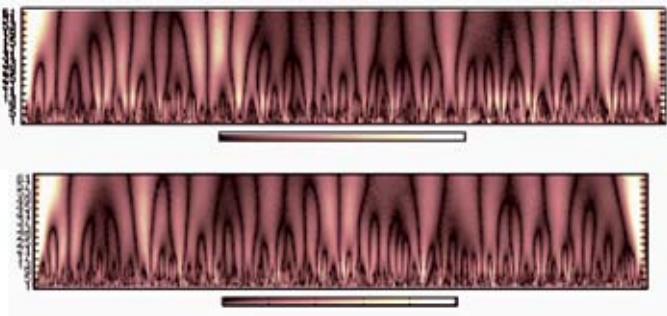


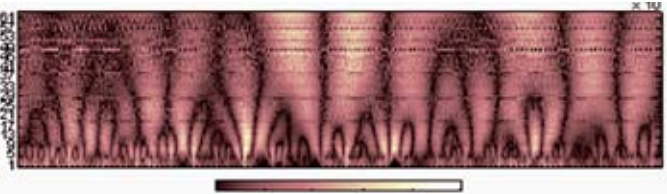
Рис. 15



**Рис. 16**

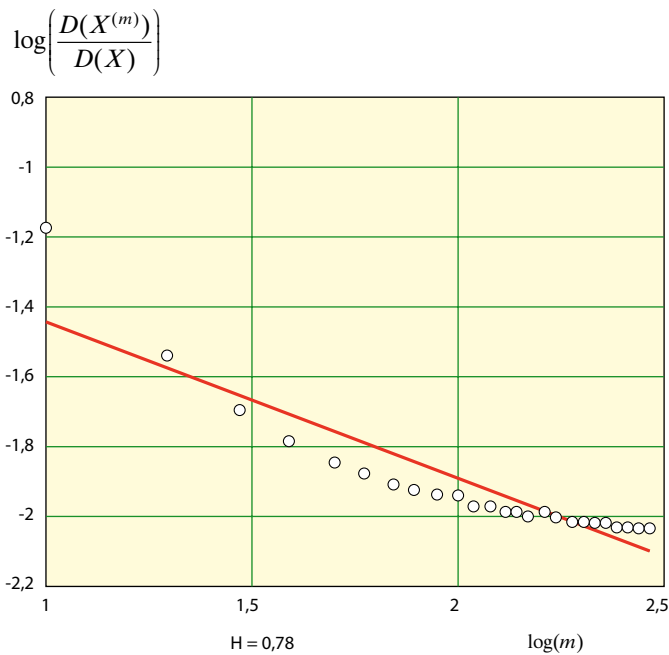
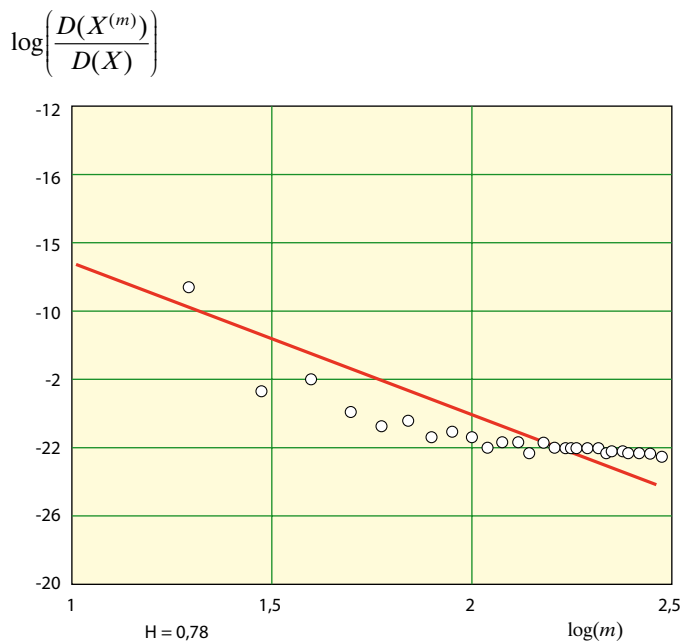


**Рис. 18**



**Рис. 19**

С помощью метода ON/OFF создадим поток трафика со значением близким к  $H = 0,8$  параметра Херста. Модель ON/OFF удалось настроить методом подбора параметров так, что  $H = 0,79$ . На рис. 19 приведено вейвлет-преобразование для такого трафика. Оно существенно отличается от вейвлет-преобразований, показанных на рис. 18.



**Рис. 17**

Для численного сравнения параметров обслуживания для различных потоков с близкими, но полученными различными способами значениями параметра Херста, проанализируем обслуживание их системой G/M/1, изображенной на рис. 20. Длительность обслуживания пакета принимается равной 10 мс.

На рис. 21:  $X(t)$  — измеренный трафик;  $\tilde{X}(t)$  — модельный трафик на основе обратного вейвлет-преобразования;  $\hat{X}(t)$  — модельный трафик на основе метода ON/OFF;  $\bar{L}$  — средняя длина очереди (в пакетах). Соответствующие результаты (распределение длины очереди и ее среднее значение) представлены на рис. 21 — для измеренного трафика; на рис. 22 — для модельного трафика на основе обратного вейвлет-преобразования; на рис. 23 — для трафика, созданного методом ON/OFF.

Анализ данных рис. 21—23 показывает, что для измеренного трафика и модельного трафика на основе обратного вейвлет-преобразования средняя длина очереди при-

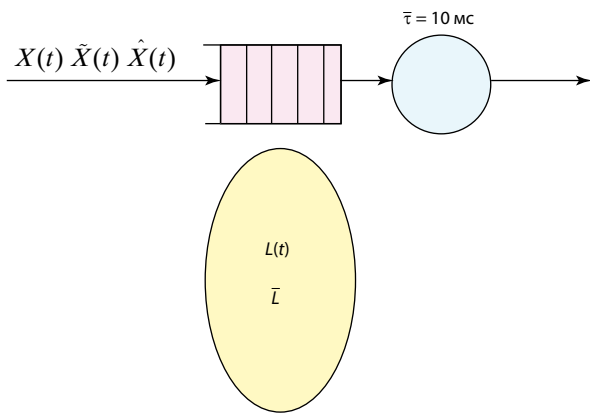


Рис. 20

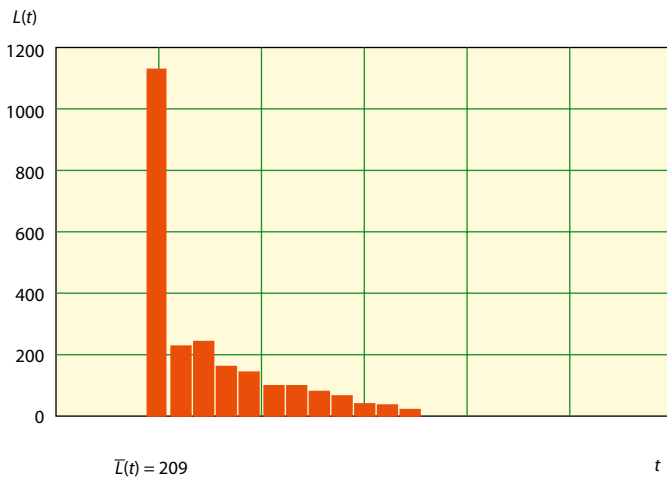


Рис. 21

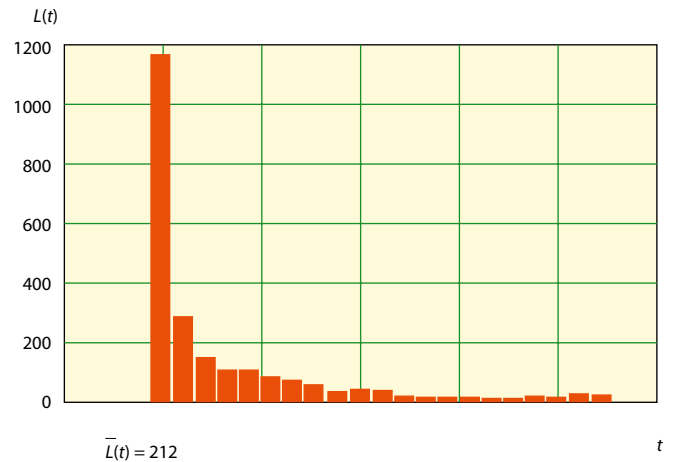


Рис. 22

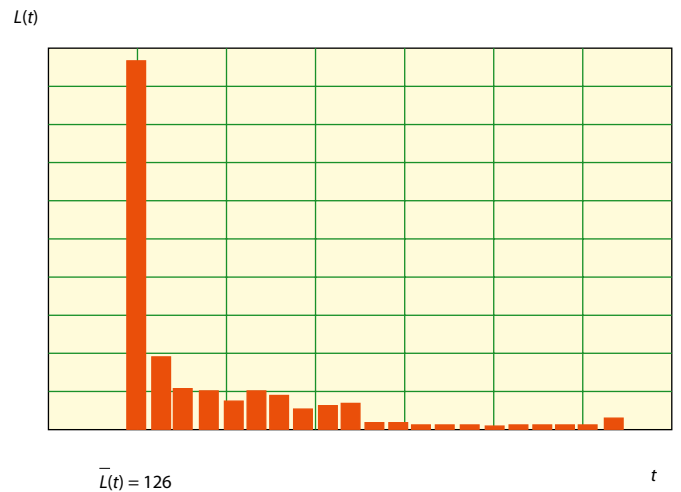


Рис. 23

близительно одинакова, в то время как для модельного трафика на основе метода ON/OFF (при близких значениях параметра Херста) средняя длина очереди меньше почти в два раза.

**Выводы.** 1. При мониторинге трафика IPTV интервал агрегации данных должен быть не менее 5 с.

2. Параметр Херста не является достаточной метрикой для оценки IPTV-трафика. При близких значениях параметра Херста модельный трафик на основе метода ON/OFF приводит к существенно меньшему значению средней длины очереди, чем для измеренного трафика. Для адекватного представления IPTV-трафика целесообразно использовать вейвлет-преобразование, например, на базе метода MWM.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Recommendation Y.2012. Functional requirements and architecture of the NGN. Geneva, ITU-T. — September, 2006.
2. Recommendation Y.2021. IMS for Next Generation Networks. Geneva, ITU-T. — September, 2006.
3. Recommendation Q.3900. Methods of testing and model network architecture for NGN technical means testing as applied to public telecommunication networks. Geneva, ITU-T, September. — 2006.
4. Vasiliev A., Koucheryavy A., Lee K.O. Methods of Testing the NGN Technical Facilities. International Conference on Advanced Communication Technologies (ICACT'2005)/Proceedings, Phoemix Park, Korea. — 21—23 February, 2005.

5. Recommendation Q.3902. Operational parameters to be monitored when implementing NGN technical means in public telecommunication networks. Geneva, ITU-T. — January, 2008.
6. Тарасов Д. В., Кучерявый А. Е., Парамонов А. И. Система мониторинга NGN и мониторинг значений параметра Херста/Труды 64-е НТК, посвященной Дню радио. — С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2009.
7. Koucheryavy A. Networks Interoperability. The 11<sup>th</sup> ICACT Proceedings. Phoemix Park, Korea. — Feb. 15—18, 2009.
8. А. Е. Кучерявый, Парамонов А. И., Кучерявый Е. А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. — М.; ФГУП ЦНИИС, 2008.
9. Андреев Д. В., Тарасов Д. В., Кучерявый А. Е. Модельные сети для тестирования технических средств NGN. Рекомендация МСЭ-Т Q.3900//Электросвязь. — 2007. — № 12.
10. Willinger W., Taggu M., Sherman R., Wilson D. Self similarity through high variability//IEEE/ACM Transactions on Networking. — 1997. — Vol. 5, № 1.
11. Riedi R. H., Crouse M. S., Ribero U. J., Baraniuk R. G. Multifractal A. Wavelet Model with Application on Network Traffic//IEEE Transaction on Information Theory. — April 1999. — Vol.45, № 3.
12. <http://www-dsp.rice.edu/software/multifractal-wavelet-model>

Получено после доработки 19.08.09