

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАФИКА БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

**Р.П. ГАХОВ<sup>1</sup>**  
**Н. Г. КУЧУК<sup>2</sup>**

<sup>1)</sup> *Белгородский государственный национальный исследовательский университет*

<sup>2)</sup> *Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина*

*e-mail:*  
*Gahov@bsu.edu.ru*  
*kuchuk56@mail.ru*

Предложен подход к разработке модели трафика, основывающейся на анализе данных мониторинга входящих информационных потоков и позволяющей учесть особенности трафика беспроводных сетей передачи данных. Исследование известных моделей позволяет сделать вывод, что затраты сетевого ресурса коммутационного оборудования при учете подвижности узлов беспроводной сети (событие хэндовер) для краткосрочного прогнозирования поведения трафика на основе результатов мониторинга информационных потоков, подлежащих агрегации, достигается при реализации двумерной интерполяционной модели. В процессе синтеза предложенной модели реализованы требования к высокой степени ее адекватности реальному трафику.

Ключевые слова: беспроводная сеть передачи данных, трафик, мультисервисная сеть, коммутационное оборудование, хэндовер.

### Введение

**Постановка задачи.** Современное развитие инфокоммуникационных технологий в различных сферах деятельности, использование передающих сред с высокими скоростями передачи информации и высокими показателями достоверности, резкое увеличение объемов трафика привели к внедрению концепции NGN (от англ. next generation networks – сети следующего/поколения), основывающуюся на мультисервисных сетях связи (МСС), ядром которых являются опорные IP-сети [1, 2]. Мультисервисные сети характеризуются наличием в них большого количества узлов, которые используют разнообразные сервисы, требующие обеспечения высокой интенсивности обмена трафиком наряду с поддержанием требуемого уровня качества обслуживания для каждого из таких сервисов [3]. Современные МСС обычно содержат в своем составе в качестве подсистем беспроводные сети передачи данных (БСПД), на которые также возлагается выполнение общей задачи обмена информацией между взаимодействующими узлами. Для этого БСПД должны обеспечивать передачу данных с характеристиками, позволяющими обеспечить требования пользователей, обслуживаемых МСС, в частности, обеспечить потенциальную возможность доступа к разделяемым ресурсам объединенной сети за приемлемое время.

Анализа типовой структуры, решаемых задач и процессов, реализованных в современных мультисервисных сетях связи с беспроводными компонентами, сделаны выводы [3, 4]:

Основными внешними факторами, определяющими характер трафика БСПД, являются:

- разнообразие используемых приложений;
- большие объемы передаваемых данных различных форматов;
- увеличение интенсивности трафика на участках, имеющих относительно низкие пропускные способности на маршруте.

Среди факторов, влияющих на изменение времени передачи пакета данных на критическом участке, можно выделить такие:

- интенсивность трафика;
- время коммутации пакета;
- пропускная способность канала передачи данных;
- объем пакета данных;
- длина очереди пакетов данных к каналу;
- коэффициент загрузки канала служебной информацией.

Факторами, которые не учитываются в существующих моделях БСПД, являются



самоподобие трафика, проявляющаяся при объединении множества информационных потоков, и некоторые особенности поведения трафика, связанные с подвижностью узлов сети.

Процесс агрегирования трафика множества отдельных источников в объединенной сети (включающей также участки, построенные на БСПД), приводит к скачкообразным изменениям интенсивности трафика, и его можно рассматривать как фрактальный процесс, статистические характеристики которого проявляют свойства масштабной инвариантности [4, 5].

Традиционные модели трафика предполагают сглаживание трафика (например, применение метода статистического мультиплексирования [3] или метода сглаживания интенсивности информационных потоков [5]). Однако, для трафика, обладающего свойством фрактальности, эти методы оказываются неэффективными, поскольку пропускная способность, предоставляемая сетью, используется не в полной мере. Кроме того, данные подходы не позволяют учесть проблемы, возникающие из-за возможной подвижности узлов беспроводной сети.

Следовательно, задача разработки модели трафика беспроводной сети передачи данных, основывающейся на данных статистического мониторинга входящих информационных потоков и позволяющей учесть особенности трафика БСПД современных мультисервисных сетей, актуальна, а разработка подхода к ее решению является целью данной статьи.

### **Выбор базовой модели**

Для моделирования инфотелекоммуникационного трафика, обладающего свойствами фрактальности целесообразно использовать ON/OFF-модель, которая в большей степени позволяет с определенной степенью приближения объяснить физические причины фрактальных явлений в современных сетях передачи данных [3, 4].

ON/OFF-модель формирует процесс описания приращений фрактального броуновского движения. По своей сути это процесс, в котором чередуются два состояния: 0 или 1. Такое базовое разбиение временной оси для ON/OFF-модели учитывает иерархическую структуру периодов активности источника. Подобно Канторову множеству, такие периоды активности разбиваются на подпериоды, которые характеризуют передачу групп пакетов данных.

Данная модель учитывает две из перечисленных выше причин, обуславливающих проявление свойств фрактальности трафика: поведение пользователя и генерация трафика. Однако подвижность узла в беспроводной сети может являться причиной возникновения такого события как хэндовер [6]. Поскольку местоположение узла непосредственным образом связано с его IP-адресом, следовательно, факт изменения IP-адреса при смене подвижным узлом базовой станции (точки доступа к сети) требует оповещения. Хэндовер является событием, которое может возникнуть при выходе подвижного узла из зоны обслуживания одной точки доступа вследствие его перемещения в зону обслуживания другой, и приводит к временному прекращению генерации трафика транспортным уровнем стека протоколов, с сохранением всех параметров передачи, и последующим восстановлением такой генерации в соответствии с сохраненными параметрами. Корректная обработка такого события позволяет подвижному узлу сохранять неразрывность соединения во время его передвижений и смены точек доступа к сети [6]. Учет хэндовера в ON/OFF-модели предполагает дополнительное разбиение анализируемого временного интервала, что приводит к ее существенному усложнению и, соответственно, к невозможности использования на коммутационных узлах БСПД для краткосрочного прогнозирования поведения трафика на основе результатов статистического мониторинга информационных потоков, входящих в коммутационный узел. Анализ существующих моделей позволяет сделать вывод, что при гомоморфном отображении временного интервала на совокупность интервалов активности БСПД практически не усложняется интерполяционная модель, предлагаемая в качестве базовой, причем более точный прогноз дает двумерная модель.



Для построения гомоморфного отображения, предположим, что на временном интервале  $[0, T]$   $j$ -й узел  $L$  раз ( $L \geq 0$ ) выходил из зоны обслуживания БСПД, при этом  $\ell$ -й интервал хэндовера ( $\ell = \overline{1, L}$ ) зададим как  $h_{j,\ell} = \left( t_{j,\ell}^{(h)}, t_{j,\ell}^{(h)} + \Delta t_{j,\ell}^{(h)} \right)$ .

Данное утверждение позволяет определить функцию временного сдвига в ON/OFF-модели, определяющую гомоморфное отображение интервала  $[0, T]$  на вложенную область активности, и позволяющую учесть влияние хэндовера:

$$h_j(t) = t + \sum_{t_{j,\ell}^{(h)} < t} \Delta t_{j,\ell}^{(h)}, \tag{1}$$

$$t \in [0, T], \ell \in [0, L], t_{j,0}^{(h)} = T; \Delta t_{j,0}^{(h)} = 0.$$

**Синтез модели беспроводной сети передачи данных по отсчетам трафика.**

Проведем исследование беспроводной сети передачи данных, характер поведения трафика в которой неизвестен, однако предполагается, что временной интервал проведения очередной сессии можно разбить на конечное число подинтервалов, на каждом из которых источники сообщений не выходили из зоны обслуживания, а для анализа его параметров и синтеза адекватной модели используются статистические оценки, полученные при обработке данных, накопленных за некоторое число сессий.

Пусть  $\{ W^{(k,\ell_k)}(h(t)) \}$  – семейство динамических функций, характеризующих объем информации, поступающей в  $k$ -ую службу ( $k = \overline{1, K}$ ) от источника  $\ell_k$  ( $\ell_k = \overline{1, L_k}$ ) со средней скоростью

$$v^{(k,\ell_k)}(h(t)) = \frac{dW^{(k,\ell_k)}(h(t))}{dt}, \tag{2}$$

описываемой априорно неизвестной зависимостью

$$v^{(k,\ell_k)}(h(t)) = \Psi \left( W^{(k,\ell_k)}, h(t) \right), \tag{3}$$

где  $h(t_0) = t_0; v^{(k,\ell_k)}(t_0) = W_0^{(k,\ell_k)}$ ;

$$t \in \left[ t_0^{(k,\ell_k)}, t_0^{(k,\ell_k)} + T^{(k,\ell_k)} \right],$$

где  $t_0^{(k,\ell_k)}$  – нижняя граница рассматриваемого временного интервала, а  $\delta^{(k,\ell_k)}$  – его длина.

Проведем  $R$  измерений в моменты времени  $t_r^{(k,\ell_k)}$ ,  $r = \overline{0, R-1}$ , в пределах  $N$  различных сессий с начальными условиями  $W_{0,n}^{(k,\ell_k)}$  ( $n = \overline{0, N-1}$ ), заданными в пределах допустимой области

$$\mathfrak{Z}^{(k,\ell_k)} = \left[ W_{\min}^{(k,\ell_k)}, W_{\max}^{(k,\ell_k)} \right] \times \left[ t_0^{(k,\ell_k)}; t_0^{(k,\ell_k)} + T^{(k,\ell_k)} \right] \subset \mathfrak{R}^2, \tag{4}$$

где  $W_{\min}^{(k,\ell_k)}, W_{\max}^{(k,\ell_k)}$  – минимальная и максимальная границы варьирования функций семейства  $\{ W^{(k,\ell_k)}(h(t)) \}$  в пределах сессий. Построим на  $\mathfrak{Z}^{(k,\ell_k)}$  динамическую функцию определения передаваемой информации. При этом будем использовать описанный в [3] метод оценки адекватности трафика, в соответствии с которым необходимо выполнение следующего условия:



$$\rho\left(\Phi^{(k,\ell_k)}, \tilde{\Phi}^{(k,\ell_k)}\right) \leq \varepsilon^{(k,\ell_k)}; \quad (5)$$

при

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}^{(k,\ell_k)} &= \tilde{W}^{(k,\ell_k)}\left(h(t), W_0^{(k,\ell_k)}\right); \\ \Phi^{(k,\ell_k)} &= \left(h(t), W_0^{(k,\ell_k)}\right); \left(t, W_0^{(k,\ell_k)}\right) \in \mathfrak{Z}^{(k,\ell_k)}, \end{aligned}$$

где  $\tilde{W}(\bullet)$  – функция, аппроксимирующая  $W(\bullet)$  при заданных начальных условиях, а аргумент  $\Phi^{(k,\ell_k)}$  выделяет из семейства  $\left\{W^{(k,\ell_k)}(h(t))\right\}$  ту функцию, для которой выполнено условие

$$W^{(k,\ell_k)}\left(t_0^{(k,\ell_k)}\right) = W_0^{(k,\ell_k)}.$$

Так как  $\mathfrak{Z}^{(k,\ell_k)} \subset \mathfrak{R}^2$ , то в (5) расстояние  $\rho(\bullet)$  является стандартной метрикой пространства

$$\begin{aligned} L^2, \text{ т.е. } \max_{t, W_0^{(k,\ell_k)}} \left| \Phi^{(k,\ell_k)}, -\tilde{\Phi}^{(k,\ell_k)} \right| &\leq \varepsilon^{(k,\ell_k)}; \\ \left(t, W_0^{(k,\ell_k)}\right) &\in \mathfrak{Z}^{(k,\ell_k)}. \end{aligned} \quad (6)$$

При дальнейшем исследовании процесса построения модели трафика беспроводной сети используем классификацию категорий функционального описания количества передаваемого трафика, предложенную в [7]. В первой категории в результате выполнения сбора статистических данных реального трафика может быть построено множество измерений

$$\begin{aligned} M^{(k,\ell_k)[Q][\Xi]} &= M^{(k,\ell_k)[Q][\Xi]} + \delta\tilde{M}^{(k,\ell_k)[Q][\Xi]}, \\ (Q, \Xi > 0), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $(\bullet)^{[Q][\Xi]}$  обозначает получение значений производных по времени от 0 до  $Q-1$  и по начальным условиям от 0 до  $\Xi-1$ ;  $\tilde{M}(\bullet)$  – множество моделируемых значений параметров, изоморфное  $M(\bullet)$ ;  $\delta\tilde{M}(\bullet)$  – множество значений невязок, связанных с ошибками измерений, причем, согласно [8], ошибки некоррелированы и имеют нулевое математическое ожидание. Из (7) следует, что для фиксированного измерения  $(n,r)$  его результат равен

$$\begin{aligned} W_{n,r}^{(k,\ell_k)[Q][\Xi]} &= \\ &= \frac{\partial^{Q+\Xi} W^{(k,\ell_k)}\left(h(t), W_0^{(k,\ell_k)}\right)}{\partial t^Q \partial \left(W_0^{(k,\ell_k)}\right)^\Xi} \Bigg|_{\substack{t=h(t_r^{(k,\ell_k)}) \\ W_0^{(k,\ell_k)}=W_{0,n}^{(k,\ell_k)}}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Следовательно, в узлах  $(n,r)$  рассматриваемой категории трафика известны точные значения функции объема информации  $W^{(k,\ell_k)}\left(h(t), W_0^{(k,\ell_k)}\right)$  и ее частных производных, что позволяет для синтеза математической модели использовать метод опорных интегральных кривых [9]. В соответствии с ним рассмотрим обобщенный интерполяционный полином дифференцируемой функции (7) в базисе метрического пространства  $L^2$  над областью  $\mathfrak{Z}^{(k,\ell_k)}$ :



$$\begin{aligned} & \tilde{W}^{(k, \ell_k)} \left( h(t), W_0^{(k, \ell_k)} \right) = \\ & = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{\Xi-1} \sum_{\eta_1=0}^{R-1} \sum_{r_2=0}^{Q-1} \left( \alpha_{n_1, \eta_1}^{(k, \ell_k)[n_2][r_2]} \times \right. \\ & \left. \times f_{\eta_1 r_2}^{(k, \ell_k)} \left( h(t) \right) \varphi_{n_1 n_2}^{(k, \ell_k)} \left( W_0^{(k, \ell_k)} \right) \right), \end{aligned} \tag{9}$$

где  $\left\{ f_{\eta_1 r_2}^{(k, \ell_k)} \times \varphi_{n_1 n_2}^{(k, \ell_k)} \left( W_0^{(k, \ell_k)} \right) \right\}$  – базис интерполяционного разложения в  $L^2$ , определенный над  $\mathfrak{Z}^{(k, \ell_k)}$  в соответствии с [3];  $\alpha_{n_1, \eta_1}^{(k, \ell_k)[n_2][r_2]}$  – неизвестные коэффициенты данного разложения.

Для  $\varepsilon^{(k, \ell_k)}$ -адекватности (9) необходимо наложить на элементы множества невязок  $\delta \tilde{M}(\cdot)$  из (7)  $W^{(k, \ell_k)} \left( h(t), W_0^{(k, \ell_k)} \right)$  такое ограничение [3]:

$$\begin{aligned} & \max_{t, W_0^{(k, \ell_k)}} \left| \omega \left( h(t), W_0^{(k, \ell_k)} \right) \right| \leq \varepsilon^{(k, \ell_k)}, \\ & \left( h(t), W_0^{(k, \ell_k)} \right) \in \mathfrak{Z}^{(k, \ell_k)}. \end{aligned} \tag{10}$$

При выполнении (10) неизвестные коэффициенты разложения (9) находятся из следующей системы алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} & \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{\Xi-1} \sum_{\eta_1=0}^{R-1} \sum_{r_2=0}^{Q-1} \left( \alpha_{n_1, \eta_1}^{(k, \ell_k)[n_2][r_2]} \times \right. \\ & \left. \times f_{\eta_1 r_2}^{(k, \ell_k)[q]} \left( h(t_{\eta_1}) \right) \times \varphi_{n_1 n_2}^{(k, \ell_k)[\xi]} \left( W_{0, n}^{(k, \ell_k)} \right) \right) = \\ & = W_{n_1 \eta_1}^{(k, \ell_k)[q][\xi]}. \end{aligned} \tag{11}$$

Использование полиномов Эрмита после несложных преобразований (9) и (11) приводит к следующей модели трафика данной категории:

$$\begin{aligned} & \tilde{W}^{(k, \ell_k)} \left( h(t), W_0^{(k, \ell_k)} \right) = \\ & = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{\Xi-1} \sum_{\eta_1=0}^{R-1} \sum_{r_2=0}^{Q-1} \left( W_{n_1 \eta_1}^{(k, \ell_k)} \cdot H_{n_1 n_2} \left( W_0^{(k, \ell_k)} \right) \times \right. \\ & \left. \times W_{n_1 \eta_1}^{(k, \ell_k)} \cdot H_{n_1 n_2} \left( W_0^{(k, \ell_k)} \right) \right) = \\ & = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{\Xi-1} \sum_{\eta_1=0}^{R-1} \sum_{r_2=0}^{Q-1} \left( \frac{1}{n_1! \cdot \eta_1! \cdot q! \cdot \xi!} W_{n_1 \eta_1}^{(k, \ell_k)[q][\xi]} \times \right. \\ & \left. \times \left( \frac{\left( W_0^{(k, \ell_k)} - W_{0, n_1}^{(k, \ell_k)} \right)^\Xi}{S_{N-1} \left( W_0^{(k, \ell_k)} \right)} \right)^{\xi_1} \right) \times \\ & \left. \right|_{W_0^{(k, \ell_k)} = W_{0, n_1}^{(k, \ell_k)}} \end{aligned} \tag{12}$$



$$\times \frac{\mathfrak{N}_{N-1}(W_0^{(k, \ell_k)})}{(W_0^{(k, \ell_k)} - W_{0, n_1}^{(k, \ell_k)})^{\Xi - n_2 - \xi_1}} \times \frac{\mathfrak{N}_{R-1}(h(t))}{(h(t) - h(t_{r_1}))^{Q - r_2 - \xi_2}} \times \left. \left( \frac{(h(t) - h(t_{r_1}))^Q}{\mathfrak{N}_{R-1}(h(t))} \right)^{\xi_2} \right|_{h(t)=h(t_{r_1})},$$

где  $\mathfrak{N}_{N-1}(W_0^{(k, \ell_k)}) = \prod_{n_3=0}^{N-1} (W_0^{(k, \ell_k)} - W_{0, n_3}^{(k, \ell_k)})^H$ ;

$$\mathfrak{N}_{R-1}(h(t)) = \prod_{r_3=0}^{R-1} (h(t) - h(t_{r_3}))^Q.$$

Исходя из (1), (10) и (12) модель агрегированного трафика БСПД можно представить следующим образом:

$$W_a(h(t)) = \sum_{k=1}^K \sum_{\ell_k=1}^{L_k} \tilde{W}^{(k, \ell_k)}(h(t), W_0^{(k, \ell_k)}), \quad (13)$$

$$\max_{k=1, \overline{K}} \max_{\ell_k=1, \overline{L_k}} \max_{t, W_0^{(k, \ell_k)}} \left| \omega(h(t), W_0^{(k, \ell_k)}) \right| \leq \varepsilon_a, \quad (14)$$

$$(h(t), W_0^{(k, \ell_k)}) \in \mathfrak{Z}^{(k, \ell_k)} \quad \forall k \in \overline{1, K}, \ell_k \in \overline{1, L_k},$$

где  $\varepsilon_a$  определяет требуемую степень адекватности агрегированного трафика.

Для выполнения условия адекватности (14) в предложенной модели (13) – (14) необходимо выбрать шаги разбиения  $\gamma$  области  $\mathfrak{Z}^{(k, \ell_k)}$  исходя из условия минимизации оценки погрешности двумерной интерполяции [7]. Проведенный анализ показал, что при небольшом количестве разрывов функции  $W^{(k, \ell_k)}(h(t), W_0^{(k, \ell_k)})$  вследствие хэндовера размерность разбиения  $\gamma$  невелика и позволяет провести краткосрочное прогнозирование поведения трафика [10].

### Выводы

В статье предложен подход к разработке модели трафика позволяющей учесть особенности трафика беспроводных сетей передачи данных в современных мультисервисных сетях связи, при реализации требования к степени адекватности реальному трафику. При этом минимум затрат сетевого ресурса коммутационного оборудования для учета события хэндовер для краткосрочного прогнозирования поведения трафика достигается при реализации двумерной интерполяционной модели.

### Список литературы

1. Крылов, В.В. Теория телетрафика и ее приложения [Текст] / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
2. Олифер, В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы [Текст] / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2012. – 943 с.
3. Кучук, Г.А. Управление ресурсами инфотелекоммуникаций [Текст] / Г.А. Кучук, Р.П. Гахов, А.А. Пашнев. – М.: Физматлит, 2006. – 220 с.
4. Кучук, Г.А. Моделювання трафіка мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі [Текст] / Г.А. Кучук, І.Г. Кіріллов, А.А. Пашнев // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 9 (58). – С. 50 – 59.
5. Куроуз, Дж. Компьютерные сети. 2-е изд [Текст] / Дж. Куроуз, К. Росс. – СПб.: Питер, 2004. – 765 с.
6. Manner, J. Mobility Related Terminology [Текст] / J. Manner, M. Kojo. – Network Working Group, RFC 3753. 2004. – 234 p.

7. Булычев, Ю.Г. Синтез математических моделей динамических систем по экспериментальным данным. Деп. рук. № 2745-В97 [Текст] / Ю.Г. Булычев, А.А. Манин. – М.: ВИНТИ, 1997. – 24 с.

8. Cheng, C.S., Thomas J.A. Effective bandwidth in high-speed digital networks [Text] / C.S.Cheng, J.A. Thomas // IEEE journal on selected Areas in Communications. – 1995. – V. 13. – P. 1091 – 1100.

9. Булычев, Ю.Г. Численно-аналитическое интегрирование дифуравнений с использованием обобщенной интерполяции [Текст] / Ю.Г. Булычев // ЖВМ и МФ. – 1994. – Т. 34, № 4. – С. 520 – 532.

10. Применение алгоритма фиксированной маршрутизации для минимизации среднего времени задержки в сети. В.М. Буторин, А.В. Полянский, Е.В. Павлова // «Научные ведомости БелГУ» № 1 (144) 2013 Выпуск 25/1 с. 164-172.

## MODELLING OF THE WIRELESS NETWORK TRAFFIC

**R.P. GAKHOV**  
**N.G. KUCHUK**

*<sup>1)</sup> Belgorod National Research University*

*<sup>2)</sup> V. N. Karazin Kharkiv National University*

*e-mail:  
Gahov@bsu.edu.ru  
kuchuk56@mail.ru*

Going is considered near development of model of the traffic, based on information of the statistical monitoring of incoming informative streams and allowing to take into account the features of wireless network traffic in modern multiservice communication networks. The conducted analysis of existent models rotined that a minimum of expenses of network resource of interconnect equipment at the account of mobility of knots of off-wire network (handover) for short-term prognostication of conduct of traffic on the basis of results of the statistical monitoring of informative streams, subject agregation, arrived at during realization of interpolation model. In the process of synthesis of model realized requirement to the degree of its adequacy to the real traffic.

Key words: wireless network, traffic, multiservice network, interconnect equipment, handover.