

## МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ В IEEE 802.16 MESH-СЕТЯХ С ГАРАНТИРОВАННЫМ КАЧЕСТВОМ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
\*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

Ключевые слова: беспроводные mesh-сети, качество обслуживания, маршрутизация, распределение канальных ресурсов.

Стандарт IEEE 802.16 представляет собой технологическую основу для беспроводных mesh-сетей в рамках сетей следующего поколения, где актуальной является задача предоставления услуг гарантированного качества. Поскольку механизмы обеспечения гарантированного обслуживания стандартом не описаны, в работе предлагается математическая динамическая модель mesh-сети стандарта 802.16, которая обеспечивает оптимальное решение задач маршрутизации и распределения временных слотов в рамках выбранного класса обслуживания. Модель учитывает требования пользователей к качеству обслуживания, ограниченность канальных и буферных ресурсов сети, явление интерференции, возможность повторного использования слотов.

O.Yu. Yevsyeyeva, \* Al-Azzawi Essa Mohammed

## MODEL ON QOS-BASED CROSS-LAYERED ROUTING FOR IEEE 802.16 MESH-NETWORKS

Kharkiv National University of Radioelektronics, Kharkiv  
\*Odessa National Academy of Telecommunication named after A.S. Popov

Keywords: wireless mesh-network, quality of service, routing, link resources allocation.

IEEE 802.16 standard is a technological basis for wireless mesh networks within next-generation communications systems, where quality of service (QoS) provisioning is challenging issue. However, mechanisms for QoS-ensuring in 802.16 mesh-networks are not defined by the standard. In the paper a mathematical dynamic model of the 802.16 mesh-network with QoS is offered. The model provides an optimal solution for joint routing and time slot allocation problem within the selected class of service (QoS based cross-layered routing). The model takes into account the user's QoS-requirements, limited amount of channel and buffer resources, the phenomenon of interference and allows reusing slots on link layer in order to improve effectiveness of network in general.

Технология беспроводного доступа WiMax, регламентируемая стандартами IEEE 802.16, будучи относительно новой технологией, была разработана с учетом основных тенденций развития телекоммуникационных систем и сетей: в WiMax предусматриваются мультисервисность сети и мультимедийность передаваемого трафика, учитываются растущие требования пользователей к скоростям передачи и к качеству обслуживания (Quality of Service, QoS) в целом. Стандартом 802.16 для обслуживания абонентов сети WiMax определены пять классов (категорий) качества:

- класс гарантированного обслуживания UGS (Unsolicited Grant Service), ориентированный на передачу пакетов постоянной длины с постоянной скоростью (аналог класса обслуживания CBR); позволяет передавать потоки T1/E1 через IP;
- классы передачи пакетов переменной длины в реальном масштабе времени ertPS (Extended Real-time Polling Service) и rtPS (Real-time Polling Service), аналоги класса VBR; ориентированы на трафик VoIP, видео MPEG;
- класс передачи пакетов переменной длины с гарантированной минимальной скоростью nrtPS (Non-real-time Polling Service); ориентирован на потоки FTP, TFTP, HTTP;
- негарантированная передача BE (Best Effort), применяемая, например, для обслуживания e-mail-трафика.

В рамках группы стандартов IEEE 802.16 основное внимание в плане качества обслуживания сосредоточено на мобильных сетях (с подвижными абонентскими станциями) и

фиксированных сетях (с неподвижными или малоподвижными станциями) в режиме точка-многоточка (Point-to-Multipoint, PMP), где все потоки, независимо от адресата, проходят через базовую станцию. Однако mesh-режим, в котором станции одной сети могут взаимодействовать друг с другом напрямую, без участия базовой станции и выполнять при этом функции маршрутизаторов, имеет существенные преимущества, прежде всего, по эффективности использования канальных ресурсов и территории покрытия (обслуживания). Тем не менее, вопросы обеспечения QoS в WiMax mesh-сетях стандартами IEEE 802.16 не затронуты.

Реализация классов QoS, гарантирующих определенные значения скоростей передачи пакетов, связана с формированием маршрутов и резервированием канальных ресурсов вдоль них. Согласно стандарту IEEE 802.16-2004 в основу организации канального уровня WiMax mesh-сети положено временное разделение общего радиоресурса, тогда в качестве единичного канального ресурса выступает временной слот (minislot), имеющий фиксированную длительность и способный перенести определенное количество бит пользовательских данных. Количество бит

пользовательских данных  $m_{i,j}$ , приходящихся на один слот, зависит от типа модуляции, схемы кодирования и помехово-сигнальной обстановки на отдельных участках сети, а потому может быть разным для разных каналов  $(i, j)$  mesh-сети. Тогда задача маршрутизации может быть рассмотрена как задача распределения временных слотов, обеспечивающего доставку пользовательского трафика к конечному адресату в рамках выбранного класса обслуживания.

Как показал анализ, недостаточно полное освещение вопросов QoS в стандарте породило множество публикаций на данную тему. При этом основные усилия разработчиков сосредоточены на поиске протокольных решений, например, формата служебных сообщений и протокола обмена ними для разных классов, или подбор настраиваемых параметров для потоков различных классов в процессе «соревнования» за право начать передачу [1, 2]. При этом сохраняется сам принцип распределения слотов на основе соперничества соседних станций за право использовать определенный слот (или группу слотов). С целью повышения эффективности функционирования сети и предоставления услуг гарантированного качества эвристические процедуры маршрутизации и управления канальными ресурсами должны быть заменены на строго формализованные методы, позволяющие обеспечить оптимальные управляющие решения. В этой связи предлагается динамическая математическая модель WiMax mesh-сети в пространстве состояний, где в качестве

переменных состояния выступают величины  $q_{i,j}^z(k)$ , отражающие объем данных, находящийся на  $i$ -й станции и предназначенный для передачи  $j$ -й станции в момент времени  $t_k$ . В качестве переменных управления рассматриваются переменные  $\tau_{i,j}^{r,l,z}$

$$\tau_{i,j}^{r,l,z} = \begin{cases} 1, & \text{если } r\text{-й слот используется в канале } (i, j) \\ & \text{для передачи потока, адресованному } l\text{-й станции,} \\ & \text{в рамках } z\text{-го класса обслуживания;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

$$(i, j) \in E, \quad r = \overline{1, N_F}, \quad l = \overline{1, N_v}, \quad l \neq i, \quad z = \overline{1, N_{QoS}},$$

где  $E$  – множество каналов между станциями mesh-сети;  $N_F$  – количество слотов в одном фрейме, используемых для передачи пользовательского трафика;  $N_v$  – общее количество станций mesh-сети;  $N_{QoS}$  – количество QoS-классов, поддерживаемых сетью.

Такой выбор переменных состояния и управления обеспечивает потоковый характер модели и позволяет контролировать буферные и канальные ресурсы сети. Поскольку буферная емкость узла ограничена, на переменные состояния накладываются ограничения

$$q_{i,j}^z(k) \geq 0, \quad \sum_j q_{i,j}^z(k) \leq q_i^{z \max}, \quad (2)$$

где  $q_i^{z \max}$  – максимальный размер очереди  $z$ -го класса обслуживания на  $i$ -й станции.

Предполагается, что пакеты потоков разных QoS-классов будут обслуживаться в разных очередях, как это реализовано, например, в механизме CBWFQ. Переменные управления в соответствии с вкладываемым в них физическим смыслом должны удовлетворять одному из следующих условий:

$$\sum_z \sum_l \sum_{(i,j) \in E} \tau_{i,j}^{r,l,z}(k) \leq 1 \quad (3)$$

$$\sum_z \sum_l \sum_{\substack{j, \\ j \neq i}} \tau_{i,j}^{r,l,z}(k) + \sum_z \sum_l \sum_{\substack{(g,j), \\ g \in S_i^2}} \tau_{g,j}^{r,l,z}(k) \leq 1 \quad (4)$$

где  $S_i^2$  – множество станций, испытывающих интерференцию с  $i$ -й станцией.

Выражение (3) гарантирует, что  $r$ -й временной слот на  $k$ -м интервале дискретизации будет использован в системе лишь один раз. Однако с целью повышения эффективности использования канальных ресурсов в mesh-сети может быть применено повторное использование слотов. Достаточным условием для этого является территориальный разнос двух станций, претендующих на один и тот же временной слот, на расстояние двух переприемов (2 hops). В этом случае можно считать, что интерференция между станциями отсутствует, а переменные управления  $\tau_{i,j}^{r,l,z}$  должны быть подчинены условию (4).

Тогда динамику очередей  $z$ -го класса обслуживания на  $i$ -й станции mesh-сети можно описать следующим образом [3, 4]:

$$q_{i,j}^z(k+1) = q_{i,j}^z(k) - \sum_{\substack{v \in S_i^1, r \\ v \neq i}} \sum m_{i,v}(k) \tau_{i,v}^{r,j,z}(k) n + \sum_{\substack{g \in S_i^1, r \\ g \neq i, j}} \sum m_{g,i}(k) \tau_{g,i}^{r,j,z}(k) n + \xi_{i,j}^z(k) \Delta t \quad (5)$$

где  $k=0, 1, 2, \dots$ ;  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  – интервал дискретизации (период перерасчета и смены управляющих переменных  $\tau_{i,v}^{r,j,z}(k)$ );  $S_i^1$  – множество станций mesh-сети, смежных с  $i$ -й станцией;  $\xi_{i,j}^z(k)$  – интенсивность поступления данных на  $i$ -ю станцию в момент времени  $t_k$  в рамках  $z$ -го класса обслуживания, адресованных  $j$ -й станции;  $n$  – количество фреймов, передаваемых в течение времени  $\Delta t$ ,  $n = \Delta t / T_F$ ;  $T_F$  – длительность фрейма.

С целью предоставления сетью услуг гарантированного качества в модель вводятся дополнительные ограничения:

$$\sum_r m_{i,j}(k) \tau_{i,j}^{r,l,z}(k) \leq B_{req}^z \quad \text{или} \quad B_{req}^z \min \leq \sum_r m_{i,j}(k) \tau_{i,j}^{r,l,z}(k) \leq B_{req}^z \max \quad (6)$$

где  $B_{req}^z$  – требуемая пользователем скорость передачи потока, которая может обозначать максимальную или минимальную скорость в зависимости от запрашиваемого класса обслуживания;  $B_{req}^z \max$  и  $B_{req}^z \min$  – максимальное и минимальное значение скорости передачи потока, гарантируемые сетью, например, в случае реализации класса nrtPS.

Уравнение состояния (5) может быть записано в векторно-матричной форме

$$\vec{q}(k+1) = \vec{q}(k) + M(k) \vec{\tau}(k) n + \vec{\xi}(k) \quad (7)$$

где  $\vec{q}(k)$  – вектор состояния mesh-сети  $k$ -м интервале дискретизации размера  $N_{QoS} N_v (N_v - 1) \times 1$ , содержащий переменные  $q_{i,j}^z(k)$  и отражающий загруженность очередей на

ее узлах;  $\bar{\tau}(k)$  – управляющий вектор размера  $N_F N_{QoS} N_e (N_v - 1) \times 1$ , элементами которого являются переменные  $\tau_{i,j}^{r,l,z}$ ;  $N_e$  – количество каналов в сети,  $N_e = |E|$ ;  $M(k)$  – матрица размера  $N_v (N_v - 1) \times N_F N_e (N_v - 1)$ , элементами которой являются величины  $m_{i,j}(k)$  на  $k$ -м интервале, взятые с учетом знака (+ или -) в выражении (5), и принцип формирования которой согласован с порядком элементов в  $\bar{\tau}(k)$ ;  $\bar{\xi}(k)$  – вектор пользовательской нагрузки размера  $N_{QoS} N_v (N_v - 1) \times 1$ , отражающий объем данных  $\Delta t \xi_{i,j}^z(k)$ , которые поступают в сеть от каждой станции на  $k$ -м интервале.

Модель (1) – (7) позволяет сформулировать задачу маршрутизации в рамках выбранного класса обслуживания как оптимизационную, где в качестве искомым переменных выступают

булевы переменные  $\tau_{i,j}^{r,l,z}(k)$ , в качестве ограничений – выражения (2) – (6), а в качестве целевой функции может быть предложен стоимостный функционал

$$J = \sum_{k=1}^a \left[ \bar{q}^T(k) W_q \bar{q}(k) + \bar{\tau}^T(k) W_\tau \bar{\tau}(k) - \bar{\tau}^T(k) W_{reuse} \bar{\tau}(k) \right] \rightarrow \min \quad (8)$$

где  $a$  – количество интервалов  $\Delta t$ , для которых осуществляется расчет управляющих переменных;  $W_q$ ,  $W_\tau$  – диагональные неотрицательно определенные весовые матрицы использования буферных и канальных ресурсов соответственно,  $W_{reuse}$  – весовая матрица, отражающая выигрыш за счет повторного использования слотов.

Таким образом, в результате решения (8) имеем оптимальную стратегию динамической маршрутизации и распределения канальных ресурсов WiMax mesh-сети. При этом использование модели в пространстве состояний (5) позволяет адаптивно реагировать на изменения структуры сети, сигнално-помеховой обстановки и интенсивностей поступающих на обслуживание пользовательских потоков, обеспечивает возможность управления как канальными, так и буферными ресурсами сети с обеспечением при этом требуемых скоростей передачи в рамках запрашиваемых классов качества обслуживания.

#### Литература:

1. [Honglin Hu](#), [Yan Zhang](#), [Hsiao-Hwa Chen](#) An Effective QoS Differentiation Scheme for Wireless Mesh Networks // IEEE Network: The Magazine of Global Internetworking. 2008. Vol. 22, [Is. 1](#). P. 66 – 73.
2. [Yong Zhang](#), [Chao Dai](#), [Mei Song](#) A novel QoS guarantee mechanism in IEEE 802.16 mesh networks // Computing and informatics. 2010. Vol. 29. P. 521 – 536.
3. [Shetiya H.](#), [Sharma V.](#) Algorithms for routing and centralized scheduling to provide QoS in IEEE 802.16 mesh networks // In Proceedings of the 1st ACM workshop on Wireless multimedia networking and performance modeling. 2005. P. 140 – 149.
4. Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсева О.Ю. Математические модели телекоммуникационных систем. Часть 1. Математические модели функциональных свойств телекоммуникационных систем [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникацій. 2011. № 2 (4). С. 3 – 41.