

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАНАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ WiMAX СЕТИ В РЕЖИМЕ MESH

Евсеева О.Ю.¹, Аль-Аззави Эсса Мохаммед²

¹ - Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина,

² - Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Украина,

E-mail: evseeva.o.yu@gmail.com

A mathematical model on joint routing and scheduling in WiMax mesh network

In order to improve effectiveness of WiMax wireless mesh network (IEEE 802.16) a mathematical dynamic model on in the state space is offered. Model is aimed at joint solution of the tasks of routing and control channel resources in such networks through optimal allocation of time slots on the link layer.

Технология беспроводного доступа WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access), регламентируемая стандартами IEEE семейства 802.16, занимает одну из ключевых позиций в построении сетей уровня MAN (Metropolitan Area Network). В рамках сетей фиксированной связи WiMax (IEEE 802.16d) возможны два режима их организации: режим точка-многоточка (Point-to-Multipoint) и режим однорангового взаимодействия (mesh-mode). Причем в последнем случае абонентские станции (Mesh Subscriber Station, MSS) взаимодействуют друг с другом напрямую, без участия базовой станции (Mesh Base Station, MBS), и каждая MSS выполняет функции промежуточного узла (маршрутизатора). Как результат, режим mesh является более предпочтительным с точки зрения территории покрытия и эффективности использования канальных ресурсов, однако его реализация требует более сложных алгоритмов сетевого управления.

Особенность организации канального уровня в WiMax mesh-сетях заключается в использовании принципа временного разделения (Time Division Multiple Access TDMA) в качестве метода доступа к общему радиоканалу. Тогда в качестве единичного ресурса канального уровня выступают временные слоты (minislot), объединяемые во фреймы [1]. Поскольку на физическом уровне предполагается использование мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), каждый слот содержит определенное количество OFDM-символов. Количество пользовательских данных (байт), передаваемых в одном слоте, зависит от общей длительности фрейма, от числа OFDM-символов в слоте, типа модуляции и схемы

кодирования, выбор которых в свою очередь определяется помехово-сигнальной обстановкой на каждом конкретном участке. Поскольку длительность фреймов на канальном уровне WiMax mesh-сети фиксируется оператором связи, число OFDM-символов, приходящихся на один слот, а значит и количество байт в каждом из них известны. Тогда задача распределения канальных ресурсов представляет собой задачу назначения каждому потоку, поступившему на обслуживание, определенной совокупности временных слотов в рамках одного фрейма. Таким образом, результирующее распределение слотов между станциями mesh-сети определяет объемы канальных ресурсов, выделяемых каждой из них, т.е. скорость, с которой станция может передавать пользовательские потоки данных. Фактически речь идет о резервировании ресурсов, однако, как известно, резервирование должно осуществляться в рамках маршрута, в соответствии с которым поток будет доставлен конечному адресату. Т.е. задача управления канальными ресурсами mesh-сети не может быть отделена от задачи маршрутизации в ней.

Основная проблема, связанная с реализацией mesh-режима, заключается в отсутствии четко регламентированных протоколов сетевого и транспортного уровней, а заложенные в стандарт принципы управления канальными ресурсами носят эвристический характер [1]. Зачастую предлагаемые протокольные решения для маршрутизации и управления канальными ресурсами для mesh-сетей носят децентрализованный характер и организовываются путем обмена соседними станциями служебными сообщениями, на основании которых эти станции «договариваются» о порядке использования общих канального ресурсов [2, 3].

С целью совместного решения задач маршрутизации и управления канальными ресурсами, а также формирования оптимальных решений была предложена динамическая математическая модель mesh-сети стандарта WiMax в пространстве состояний, где в качестве переменных состояния выбраны величины $q_{i,j}(k)$, отражающие объем данных, находящийся на i -м узле сети и предназначенный для передачи j -му узлу в момент времени t_k ; а в качестве переменных управления выступают булевы переменные $\tau_{i,j}^{r,l}(k)$, указывающие на использование r -го временного слота в канале (i, j) на k -м интервале для передачи потока, адресованного узлу l .

В основу модели положена система разностных уравнений [4, 5]

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

где $k=0, 1, 2, \dots$; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – интервал дискретизации (период перерасчета управляющих переменных $\tau_{i,v}^{r,j}(k)$); $m_{i,j}(k)$ – количество байт, передаваемых в одном слоте канала (i, j) ; S_i^1 – множество узлов mesh-сети, смежных с i -м узлом; $\xi_{i,j}(k)$ – интенсивность поступления данных на i -й узел в момент времени t_k , адресованных j -му узлу; n – количество фреймов, передаваемых в течение времени Δt , $n = \Delta t / T_F$; T_F – длительность

одного фрейма. Кроме того на переменные состояния накладываются ограничения, гарантирующие отсутствие переполнений буферных устройств узлов:

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

где q_i^{\max} – максимальный размер очереди, допустимый на i -й станции.

Дополнительные ограничения на переменные управления связаны с возможностью повторного использования слотов станциями, претендующими на один и тот же слот:

$$\sum_l \sum_{\substack{j, \\ j \neq i}} \tau_{i,j}^{r,l}(k) + \sum_l \sum_{\substack{(g,j), \\ g \in S_i^2}} \tau_{g,j}^{r,l}(k) \leq 1, \quad (3)$$

где S_i^2 – множество станций, связанных с i -й станцией явлением интерференции. Условие (3) может быть упрощено

$$\sum_l \sum_{(i,j) \in E} \tau_{i,j}^{r,l}(k) \leq 1, \quad (4)$$

в этом случае r -й временной слот на k -м интервале дискретизации (управления) будет использован в системе лишь один раз. Уравнение состояния (1) может быть записано в векторно-матричной форме

$$\vec{q}(k+1) = \vec{q}(k) + M(k)\vec{\tau}(k)n + \vec{\xi}(k), \quad (5)$$

где $\vec{q}(k) = [q_{1,2}(k), \dots, q_{i,j}(k), \dots, q_{N_v, N_v-1}(k)]^T$ – вектор состояния mesh-сети k -м интервале дискретизации размера $N_v(N_v-1) \times 1$, отражающий загруженность очередей на ее узлах; $\vec{\tau}(k)$ – управляющий вектор размера $N_F N_e (N_v-1) \times 1$, элементами которого являются переменные $\tau_{i,j}^{r,l}$; N_v – общее количество узлов mesh-сети; N_e – количество каналов в сети; N_F – количество слотов в одном фрейме, используемых для передачи пользовательских данных; $M(k)$ – 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 (1), и принцип формирования которой согласован с порядком элементов в $\vec{\tau}(k)$; $\vec{\xi}(k) = \Delta t [\xi_{1,2}(k), \dots, \xi_{i,j}(k), \dots, \xi_{N_v, N_v-1}(k)]^T$ – вектор пользовательской нагрузки размера $N_v(N_v-1) \times 1$, отражающий объем данных, которые поступают в сеть на k -м интервале.

В рамках представленной модели (1) – (4) задача распределения временных слотов, обеспечивающего доставку пользовательских потоков конечным адресатам (задача маршрутизации), может быть сформулирована как оптимизационная со следующим стоимостным функционалом в качестве целевой функции

$$J = \sum_{k=1}^a [\vec{q}^T(k) W_q \vec{q}(k) + \vec{\tau}^T(k) W_\tau \vec{\tau}(k) - \vec{\tau}^T(k) W_{reuse} \vec{\tau}(k)] \rightarrow \min, \quad (6)$$

где a – количество интервалов Δt , для которых осуществляется расчет управляющих переменных; W_q , W_τ – диагональные неотрицательно определенные весовые матрицы; W_{reuse} – диагональная неотрицательно определенная весовая матрица, отражающая выигрыш за счет повторного использования слотов.

В выражении (6) первое слагаемое нацеливает на минимизацию очередей на узлах mesh-сети путем доведения трафика конечным адресатам, а второе слагаемое требует минимизации используемых при этом канальных ресурсов (суммарного количества задействованных слотов), третье слагаемое отражает выигрыш за счет повторного использования слотов.

Выводы. Таким образом, совместное решение задач маршрутизации и распределения канальных ресурсов WiMax mesh-сети может быть сведено к решению оптимизационной задачи по минимизации целевого стоимостного функционала при наличии ряда ограничений, в том числе и динамических. Основное отличие предложенной модели от ранее известных состоит в ее принадлежности к классу динамических моделей в пространстве состояний, что дает следующие преимущества: учет динамического характера поступающих на обслуживание пользовательских потоков и состояния самой сети, включая динамику структуры и сигнально-помеховой обстановки; возможность управления как канальными, так и буферными ресурсами сети; возможность применения для решения задачи маршрутизации и управления канальными ресурсами наработок в области теории оптимального управления, где уравнение поведения системы в пространстве состояний занимает одно из центральных мест.

Литература

1. IEEE Std 802.16-2004, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access System. IEEE, NY, 2004. 895 p.
2. Shou-Chih Lo Efficient routing and centralized scheduling algorithms for IEEE 802.16 mesh networks / Shou-Chih Lo, Lyu-Chen Ou // International Journal of Network Management. 2011. Vol. 21, Is. 6. P. 494–512.
3. Paris S. Cross-layer metrics for reliable routing in wireless mesh networks / S. Paris, C. Nita-Rotaru, F. Martignon, A. Capone // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2013. Vol. 21, Is. 3. P. 1003–1016.
4. Shetiya H. Algorithms for routing and centralized scheduling to provide QoS in IEEE 802.16 mesh networks / H. Shetiya, V. Sharma // In Proceedings of the 1st ACM workshop on Wireless multimedia networking and performance modeling. 2005. P. 140–149.
5. Поповский В.В. Математические модели телекоммуникационных систем. Часть 1. Математические модели функциональных свойств телекоммуникационных систем [Электронный ресурс] / В.В. Поповский, А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // Проблемы телекоммуникаций. 2011. № 2 (4). С. 3 – 41. Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_popovsky_functional.pdf.