

УДК 621.391

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА НИСХОДЯЩЕГО КАНАЛА WiMAX НА КАНАЛЬНОМ И СЕТЕВОМ УРОВНЯХ МОДЕЛИ OSI



[А.В. ЛЕМЕШКО](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники



[Х.Д.К. АЛЬ-ДЖАНАБИ](#)

Одесская национальная академия связи
имени А.С. Попова



[О.М. ХОДЖАЕВ](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract – It was found that an additional source of growth of the resource allocation efficiency in the downlink of the WiMAX technology is the improving of the consistency in the work of technological means of the Data Link and Network layers of the Open Systems Interconnection reference model. The traditional paradigm as a consequent solution of problems associated with the formation of the bandwidth of the base station radio interfaces at the Data Link layer and its further allocation at the Network layer between the set of organized queues may be revised as the concurrent solution of these problems. This is possible because these tasks are localized at the base station in the WiMAX network, but not distributed. It was further developed a mathematical model of a centralized resource allocation in the WiMAX downlink at the Data Link and Network layers of the OSI model. The novelty of the model is that it provides the consistent solution of the Data Link layer problems associated with the bandwidth allocation of the radio interface to subscriber stations in the WiMAX downlink, and problems of the OSI Network layer associated with the formation of service queues and allocation of the interface bandwidth between separate flows of packets.

Анотація – Отримала подальший розвиток математична модель централізованого розподілу ресурсу нисхідного каналу WiMAX на каналному та мережному рівнях моделі OSI. Новизна моделі полягає в тому, що вона забезпечує узгоджене розв'язання задач каналного рівня, пов'язаних з формуванням пропускних здатностей радіоінтерфейсів до станцій користувачів в нисхідному каналі WiMAX, і задач мережного рівня OSI, пов'язаних з формуванням черг обслуговування та розподілом пропускної здатності інтерфейсу між окремими потоками пакетів.

Анотация – Получила дальнейшее развитие математическая модель централизованного распределения ресурса нисходящего канала WiMAX на каналном и сетевом уровнях модели OSI. Новизна модели состоит в том, что она обеспечивает согласованное решение задач каналного уровня, связанных с формированием пропускных способностей радиоинтерфейсов с пользовательскими станциями в нисходящем канале WiMAX, и задач сетевого уровня OSI, связанных с формированием очередей обслуживания и распределением пропускной способности интерфейса между отдельными потоками пакетов.

Введение

В настоящее время продвижение современных инфокоммуникационных услуг с точки зрения повышения их мобильности и доступности напрямую связано с дальнейшим внедрением беспроводных телекоммуникационных технологий. Именно беспроводные технологии активно используются для организации персональных сетей (Personal Area Network, PAN), локальных сетей (Local Area Network, LAN), городских (Metropolitan Area Network, MAN) и территориально-распределенных сетей (Wide Area Network, WAN). При этом особой популярностью пользуется стандарт

IEEE.802.16 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [1-3], который зарекомендовал себя с положительной стороны при построении как транспортных радиосетей, так и беспроводных сетей высокоскоростного доступа для фиксированных и мобильных абонентов.

Однако сдерживающим фактором на этом пути является невысокая по сравнению с проводными решениями производительность, обеспечиваемая технологиями беспроводной связи. Для повышения производительности в новых спецификациях стандарта IEEE 802.16 находят свое применение перспективные разработки, связанные с использованием технологии Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), различных методов расширения спектра сигнала; технологий интеллектуальных или фазированных антенных решеток; организационных мероприятий по изменению территориального местоположения базовых станций; более эффективных схем модуляции и кодирования сигналов; методов поляризации и пространственно-временной обработки и др. Наряду с перечисленными решениями на практике все чаще повышение производительности беспроводных технологий основывается на эффективном использовании и распределении доступного сетевого ресурса: частотного, временного, канального, буферного и др. В этой связи все больше внимания ученых, проектировщиков сетевого оборудования и разработчиков соответствующих стандартов уделяется поиску эффективных решений по формированию и оптимальному распределению частотно-временного ресурса, доступного на канальном, а в последующем и на сетевом уровнях OSI (Open Systems Interconnection Basic Reference Model). Проведенный анализ позволил установить, что в рамках используемой в WiMAX-сетях технологии доступа OFDMA (Orthogonal frequency-division multiple access) к основным сетевым ресурсам относят ширину частотного канала, число подканалов и поднесущих – частотные ресурсы; символ, слот – временные ресурсы; подкадр (субрейм), кадр (фрейм), пакет (burst) – частотно-временной ресурс.

I. Обзор известных решений по распределению ресурсов WiMAX-сети

Стандарт IEEE 802.16 определяет механизмы планирования и распределения ресурсов сети только для восходящих каналов связи (UpLink), оставляя право выбора подобных решений в нисходящих каналах связи (DownLink) за операторами связи и производителями сетевого оборудования. Проведенный анализ принципов построения WiMAX-сетей позволил сформулировать перечень требований, которым должны соответствовать современные технологические механизмы распределения частотно-временного и канального ресурса. К ним прежде всего стоит отнести следующие:

- поддержка мультисервисности, т.е. учет наличия в сети пакетов (поточков) различных сетевых приложений и сервисов (голос, данные, видео и др.);
- учет требований пользователей к обеспечению как дифференцированного (DiffServ), так и гарантированного (IntServ) качества обслуживания (Quality of Service, QoS);

- обеспечение сбалансированного использования доступного сетевого ресурса для предотвращения возможной перегрузки сети;
- повышение уровня согласованности решений отдельных задач, связанных с распределением разнотипных сетевых ресурсов;
- оптимизационная постановка и решение задач по распределению ресурса WiMAX-сети.

Важно отметить, что эффективность того или иного протокольного решения во многом зависит от положенного в его основу математического метода или модели. Именно математические модели и методы должны, во-первых, адекватно описывать процессы формирования и распределения сетевого ресурса, а во-вторых, обеспечить расчет необходимого множества управляющих переменных в соответствии с требованиями к уровню качества обслуживания в ходе минимизации объемов используемого сетевого ресурса. Проведенный анализ основных известных методов распределения ресурсов нисходящего канала связи технологии WiMAX, к числу которых стоит отнести следующие [4-9]: метод обеспечения максимальной скорости передачи (Maximum Sum Rate Algorithm); метод максимальной справедливости (Maximum Fairness Algorithm); метод пропорциональной справедливости планирования (Proportional Fairness Scheduling); метод кругового обслуживания (RoundRobinScheduler), позволил констатировать тот факт, что они относятся к классу эвристических решений. Даже наиболее эффективные методы Proportional Fairness Scheduling и Maximum Fairness не обеспечивают учет в явном виде требований к уровню качества обслуживания, приоритеты запросов, не способствуют оптимальному использованию доступного ресурса, что на практике приводит к избыточному выделению ресурса одним станциям и блокированию работы других пользовательских станций. По этой причине данные методы могут эффективно использоваться лишь в некоторых случаях, например, при предоставлении услуг «Best Effort» (BE) класса (обслуживание по возможности), т.е. без предоставления каких-либо гарантий по скорости передачи данных. Это заметно усложняет использование технологии WiMAX для предоставления мультисервисного доступа.

В этой связи в данной работе развивается подход, основанный на использовании оптимизационных моделей и методов, в рамках которых оптимизировался бы процесс распределения доступного сетевого ресурса нисходящего канала WiMAX технологии с учетом следующих важных факторов:

- особенностей территориального размещения и сигнально-помеховой обстановки в сети пользовательских станций (Subscriber Station, SS) и базовой станции (Base Station, BS), что напрямую определяет выбор той или иной схемы модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme, MCS);
- требований стандарта относительно формирования сетевого ресурса, подлежащего дальнейшему распределению, режимов работы нисходящего канала (DL FUSC или DL PUSC);
- приоритета запроса пользователей и требований относительно качества обслуживания (тип QoS, численные значения основных показателей).

При этом важно, чтобы рассчитанные управляющие переменные носили не статический характер, настраиваясь на этапе проектирования сети, а динамический, адаптируясь под изменяющиеся условия функционирования сети.

В работах [10-13] предложены достаточно эффективные модели решения задачи по распределению доступного частотного ресурса в WiMAX-сетях в соответствии с перечисленными требованиями. С помощью этих моделей распределения подканалов в нисходящем канале технологии WiMAX в конечном итоге осуществляется решение задачи канального уровня OSI по формированию пропускной способности радиоинтерфейса с той или иной пользовательской станцией в соответствии с ее QoS-требованиями, типом (BE, DiffServ или IntServ) и приоритетом обслуживания. В дальнейшем пропускная способность радиоинтерфейса будет распределяться уже на сетевом уровне между отдельными сервисными потоками путем организации системы очередей пакетов и осуществления соответствующего управления ими.

Ввиду того, что решение данных задач осуществляется на одной базовой станции, повысить эффективность конечного распределения ресурса нисходящего канала WiMAX можно на основе повышения согласованности действий на канальном и сетевом уровнях OSI. Необходимость обеспечения согласованного решения задач канального и сетевого уровня OSI, связанных с управлением ресурсом нисходящего канала WiMAX, вызвана тем, что в беспроводных сетях пропускная способность радиоинтерфейса базовой станции может достаточно сильно изменяться и на коротких промежутках времени даже при фиксированном порядке распределения подканалов между станциями пользователей. Это может быть вызвано, например, изменением сигнально-помеховой обстановки в направлении пользовательских станций, что влечет за собой изменение SINR, пересмотр выбранной схемы модуляции и кодирования сигналов, влияющих в результате на пропускную способность радиоинтерфейсов базовой станции. Поэтому планировщики сетевого уровня, которые решают задачи по дальнейшему распределению пропускной способности радиоинтерфейса BS WiMAX путем создания и обслуживания системы очередей IP-пакетов, должны функционировать скоординировано со средствами канального уровня, отвечающими за формирование данного канального ресурса.

Придать некоторую технологическую согласованность подобного рода решениям можно на протокольном уровне, когда задачи по распределению ресурсов WiMAX сети средствами канального и сетевого уровня решаются, как пример, последовательно. Но максимально высокую согласованность решения задач канального и сетевого уровней OSI можно обеспечить, лишь располагая единой математической моделью описания данного процесса, в которой была бы установлена функциональная взаимосвязь между соответствующими управляющими переменными. В этой связи в данной работе будет предложена математическая модель централизованного распределения ресурса нисходящего канала WiMAX, в рамках которой обеспечивается согласованное решение задач канального уровня, связанных с формированием пропускных способностей радиоинтерфейсов с пользовательскими станциями в нисходящем канале WiMAX, и задач сетевого уровня OSI, связанных с формирова-

ем очередей обслуживания и распределением пропускной способности интерфейса между отдельными сервисными потоками пакетов.

II. Подмодель сбалансированного распределения ресурса нисходящего канала WiMAX на канальном уровне OSI

За основу модели сбалансированного распределения ресурса нисходящего канала WiMAX на канальном уровне OSI возьмем результаты, подробно изложенные в работах [10-13]. В этой модели предполагаются известными следующие данные:

- 1) ширина используемого частотного канала изменяется в пределах от 1,25 МГц до 20 МГц;
- 2) выбранный режим использования подканалов (FUSC, PUSC, OPUSC, OFUSC или TUSC);
- 3) N – общее число пользовательских станций в сети;
- 4) L – множество возможных значений числа подканалов в зависимости от ширины частотного канала (табл. 1 и табл. 2). Например, для режима DL FUSC $L = \{2, 8, 16, 32\}$, а для режима DL PUSC $L = \{3, 15, 30, 60\}$;
- 5) K – выбранное количество подканалов, используемых в нисходящем канале связи;
- 6) R_{trb}^n – требуемая пропускная способность для обслуживания n -й пользовательской станции (Мбит/с);
- 7) $R^{n,k}$ – пропускная способность, которую обеспечивает выделение k -го подканала n -й пользовательской станции ($n = \overline{1, N}$, $k = \overline{1, K}$);
- 8) $BLEP$ – вероятность блоковой ошибки, получаемая гибридной системой автоматических перезапросов (Hybrid automatic repeat request, HARQ).

Пропускная способность, которую обеспечивает выделение k -го подканала n -й пользовательской станции ($R^{n,k}$), представляет собой количество переданных бит за единицу времени (секунду), исключая пилотные биты, и может быть рассчитана из выражения:

$$R^{n,k} = \frac{R_c^{n,k} k_b^{n,k} K_s (1 - BLEP)}{(T_b + T_g + T_{RTG} + T_{TRG})}, \quad (1)$$

где $R_c^{n,k}$ – скорость кода, используемого при кодировании сигнала k -го подканала, выделенного для n -й пользовательской станции; $k_b^{n,k}$ – битовая нагрузка символа k -го подканала, выделенного для n -й пользовательской станции, значения которой приведены в табл. 3; K_s – число поднесущих, используемых для передачи данных в одном подканале; $T_b = 89,6$ мкс – длительность полезной части символа; T_g – длительность защитного интервала между символами, который может принимать четыре значения относительно длительности полезной части символа: $T_g = T_b / 4 = 22,4$ мкс, $T_g = T_b / 8 = 11,2$ мкс, $T_g = T_b / 16 = 5,6$ мкс и $T_g = T_b / 32 = 2,8$ мкс; $T_{TRG} = 105,7$ мкс – дли-

тельность интервала переключения с передачи на прием (Transmit/Receive Transition Gap, TRG); $T_{RTG} = 60$ мкс – длительность интервала переключения с приема на передачу (Receive/Transmit Transition Gap, RTG).

Таблица 1. Порядок распределения поднесущих в подрежиме DL FUSC

Ширина полосы канала (МГц)	1,25	2,5	5	10	20
Количество поднесущих	128	256	512	1024	2048
Число поднесущих для передачи данных на один подканал	48	Не используется	48	48	48
Количество подканалов (коэффициент масштабирования)	2		8	16	32
Общее количество поднесущих, используемых для передачи данных	96		384	768	1536
Общее количество пилотных поднесущих	10		42	82	166
Количество поднесущих в нижнем защитном интервале	11		43	87	173
Количество поднесущих в верхнем защитном интервале	10		42	86	172

Таблица 2. Порядок распределения поднесущих в подрежиме DL PUSC

Ширина полосы канала (МГц)	1,25	2,5	5	10	20
Количество поднесущих	128	256	512	1024	2048
Число поднесущих для передачи данных на один подканал	24	Не используется	24	24	24
Количество подканалов (коэффициент масштабирования)	3		15	30	60
Общее количество поднесущих, используемых для передачи данных	72		360	720	1440
Общее количество пилотных поднесущих	12		60	120	240
Количество поднесущих в нижнем защитном интервале	11		46	92	184
Количество поднесущих в верхнем защитном интервале	10		45	91	183

Таблица 3. Значения битовой загрузки символа для различных видов модуляции

Вид модуляции	BPSK	QPSK	8-PSK	16-QAM	32-QAM	64-QAM
Битовая нагрузка символа	1	2	3	4	5	6

По аналогии с подходом, предложенным в работах [10-14], пусть в рамках предлагаемой модели в ходе решения задачи распределения подканалов между пользовательскими станциями сети необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной (x_n^k):

$$x_n^k = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й подканал выделен } n\text{-й SS;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

С точки зрения физики моделируемого процесса число переменных (2), регламентирующих процесс выделения подканалов пользовательским станциям, составляет $N \cdot K$. Управляющие переменные (2) полностью определяют порядок распределения подканалов нисходящего канала связи WiMAX технологии, однако при их расчете необходимо выполнить ряд важных условий.

Исходя из физического смысла введенных управляющих переменных (2), условие выделения k -го подканала не более чем одной пользовательской станции имеет следующий вид:

$$\sum_{n=1}^N x_n^k \leq 1, \quad (k = \overline{1, K}). \quad (3)$$

Важное место в структуре предлагаемой модели играют условия обеспечения качества обслуживания по показателям производительности. В соответствии с содержанием табл. 4 в сети WiMAX должны поддерживаться одновременно несколько типов обеспечения качества обслуживания (Best Effort, DiffServ и IntServ) для потоков различных приложений и служб. Это накладывает определенный отпечаток на вид подобных условий:

$$\sum_{k=1}^K \left(x_n^k \frac{R_c^{n,k} K_b^{n,k} K_s (1 - BLER)}{(T_b + T_g + T_{RTG} + T_{TRG})} \right) \geq \delta_n R_{mpo}^n, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (4)$$

где

$$\delta_n = \begin{cases} 1, & \text{если } n\text{-й SS необходимо обеспечить гарантии} \\ & \text{по выделяемой пропускной способности;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Таблица 4. Перечень типов QoS, поддерживаемых в стандарте IEEE 802.16

Уровень QoS	Аббре-виатура	Функциональность	Область применения
Unsolicited Grant Service (незатребованный уровень обслуживания)	UGS	Передача пакетов данных фиксированной длины с гарантированной скоростью (Constant Bit Rate, CBR), гарантированной максимальной задержкой и джиттером пакетов	Передача TDM-поточек поверх IP, передача потоков Real Video и VoIP
Extended Real-time Polling Service (расширенный сервис с опросом в режиме реального времени)	ertPS	Передача пакетов данных переменной длины с гарантированной минимальной скоростью передачи данных и ограничением на максимальную скорость передачи данных, гарантированной задержкой и джиттером пакетов с приоритизацией трафика. Предполагается возможность запроса дополнительной полосы BWA при её доступности	Стандартная телефония VoIP
Real-time Polling Service (обслуживание с опросом в реальном времени)	rtPS	Передача пакетов данных переменной длины с гарантированной минимальной скоростью передачи данных и ограничением на максимальную скорость передачи данных, гарантированным максимальным уровнем задержки с приоритизацией трафика. Уровень джиттера пакетов не гарантируется	Передача цифрового MPEG видео
Non-real-time Polling Service (обслуживание с опросом не в реальном времени)	nrtPS	Передача пакетов данных переменной длины с гарантированной минимальной скоростью передачи данных, ограничением на максимальную скорость передачи данных и приоритизацией трафика. Значения задержки не гарантируются	Передача FTP с гарантированной минимальной скоростью
Best Effort (обслуживание по возможности)	BE	Передача пакетов данных переменной длины с ограничением на максимальную скорость передачи данных и приоритизацией трафика	Сервис HTTP (просмотр web страниц)

Правая часть выражения (4) определяет суммарный объем выделенной n -й пользовательской станции пропускной способности нисходящего канала связи WiMAX ($R_{вид}^n$), зависящий от числа выделенных частотных подканалов и их характеристик (1). В левой части неравенства записаны QoS-требования пользователей дан-

ной станции. Кроме того, значение $\delta_n = 1$ отображает вариант реализации политики IntServ, основанной на резервировании канального ресурса. Варианты, при которых $\delta_n = 0$, моделируют случаи предоставления сервиса Best Effort (обслуживание по возможности) или дифференцированного обслуживания (DiffServ).

Важным дополнением выражения (4) являются условия обеспечения сбалансированного выделения частотных подканалов пользовательским станциям в соответствии с их приоритетами[14]:

$$\frac{R_{\text{свид}}^n}{(Pr_n + 1)R_{\text{прб}}^n} \geq \beta, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (5)$$

где

$$R_{\text{свид}}^n = \sum_{k=1}^K \left(x_n^k \frac{R_c^{n,k} k_b^{n,k} K_s (1 - BLER)}{(T_b + T_g + T_{RTG} + T_{TRG})} \right), \quad (n = \overline{1, N}), \quad (6)$$

Pr_n – это величина приоритета n -й пользовательской станции, например, типа предоставляемого сервиса (табл. 5); β – управляющая переменная, которая характеризует нижний динамически управляемый порог удовлетворения требований всех пользовательских станций сети по пропускной способности.

В общем случае имеет место условие

$$\beta \geq 0. \quad (7)$$

Таблица 5. Вариант соответствия типов сервисов и приоритетов в сети WiMAX [8]

Тип сервиса (сервисный класс WiMAX)	Назначаемый приоритет
ErtPS	4
UGS	3
rtPS	2
nrtPS	1
BE	0

Как показали результаты исследования данной модели, при максимизации параметра (7) по переменным (2) она способствует сбалансированному выделению числа подканалов пользовательским станциям WiMAX сети с учетом их приоритета (Pr_n) и количественных требований к уровню QoS ($R_{\text{прб}}^n$).

III. Подмодель управления очередями, организованными на радиointерфейсах базовой станции сети WiMAX

Технологические механизмы управления очередями, которые отвечают за их формирование и контроль перегрузки радиointерфейсов, играют важную роль в обеспечении как гарантированного, так и дифференцированного качества обслуживания. Важно отметить, что неэффективное управление очередями при высокой загрузке сети, как правило, сопровождается неконтролируемым ростом задержек и необоснованных потерь пакетов. Существующие механизмы управления очередями основаны преимущественно на административных настройках, которые реализуются в ходе ручного конфигурирования коммутационного оборудования. Но ручные настройки не позволяют оперативно реагировать на изменение загрузки радиointерфейсов базовой станции, вызванной изменением сигнально-помеховой обстановки или колебаниями циркулирующего в сети трафика.

В ходе проведенного анализа перспективных теоретических решений в области управления очередями установлено, что необходимо использовать потоковые модели и методы, приводящие к получению оптимальных решений с точки зрения загрузки очередей интерфейса и улучшения показателей качества обслуживания в целом. В работах [15, 16] сформулированы требования, которым должны удовлетворять перспективные решения по управлению очередями, к числу которых относятся учет потоковой структуры мультимедийного трафика; оптимизационная постановка и решение задачи управления очередями; поддержка дифференциации обслуживания пакетов на интерфейсах маршрутизаторов ТКС в соответствии с их QoS-требованиями; реализация динамических стратегий управления очередями; простота алгоритмическо-программной и аппаратной реализации. Кроме того, важно обеспечить согласованное решение отдельных интерфейсных задач, связанных с классификацией и маркировкой пакетов; созданием и настройкой очередей на интерфейсе; агрегированием потоков и распределением пакетов по очередям интерфейса с учетом приоритетов передаваемых потоков, требований к качеству обслуживания, характеристик создаваемых очередей и интерфейса в целом; определение порядка обслуживания очередей; распределение пропускной способности интерфейса между отдельными очередями.

Развивая подход, предложенный в работах [15, 16] и максимально удовлетворяющий перечисленным требованиям, в состав предлагаемой модели наряду с выражениями (1)-(7) входит дополнительная система условий, основанных на анализе следующих исходных данных:

Q_n – общее число очередей, организованных на n -м радиointерфейсе базовой станции, т.е. на интерфейсе в направлении n -й SS;

M_n – количество сервисных потоков, поступающих по нисходящему каналу связи WiMAX от базовой станции через n -й радиointерфейс к соответствующей пользовательской станции;

a_i^n – величина средней интенсивности i -го потока, измеряемая в пакетах в секунду (1/с), поступающего на n -й радиointерфейс базовой станции ($n = \overline{1, N}$; $i = \overline{1, M_n}$);

$\text{Pr}_{i,n}^{\text{flow}}$ – приоритет пакетов i -го потока, поступающего на n -й радиointерфейс базовой станции;

$\text{Pr}_{j,n}^{\text{queue}}$ – приоритет j -й очереди пакетов, организованной на n -м радиointерфейсе базовой станции.

Для задания приоритета пакетов используется соответствующее поле в байте типа обслуживания (Type of Service, ToS) заголовка IP-пакета. При использовании метода маркировки пакетов на основе IP-precedence число приоритетов равно 8 ($0 \div 7$). В ходе использования шестибитного поля DSCP (DiffServ Code Point) число приоритетов пакетов равняется 64 ($0 \div 63$). Приоритет каждой из очередей (от 1 до Q_n) назначается равномерно, охватывая все возможные значения приоритета пакетов.

Для обеспечения максимальной дифференциации обслуживания пакетов для каждого из сервисных потоков должна быть организована индивидуальная очередь. Однако на практике число поддерживаемых очередей с помощью того или иного механизма управления очередью обычно строго фиксировано, например:

- FIFO организует одну очередь;
- механизм приоритетных очередей (Priority Queueing, PQ) поддерживает 4 очереди;
- механизм заказных очередей (Custom Queueing, CQ) – 16 очередей;
- механизм взвешенных справедливых очередей (Weighted Fair Queueing, WFQ) «по умолчанию» организует 256 очередей, число которых можно административно (т.е. вручную) увеличить до 4096;
- механизм классовых очередей (Class-Based WFQ, CBWFQ) поддерживает 64 очереди, каждая из которых, работая в режиме WFQ, может разбиваться на 256 дочерних очередей.

Организация избыточного числа очередей на интерфейсе, т.е. очередей, которые простаивают, на практике приводит к росту задержек, связанных с формированием и обслуживанием этих очередей. Поэтому в самом общем случае примем, что на n -м радиointерфейсе количество сервисных потоков превышает число организованных на интерфейсе очередей, т.е. имеет место неравенство

$$M_n > Q_n, \quad (8)$$

что определяет необходимость агрегирования потоков, т.е. направления пакетов различных сервисных потоков в одну и ту же очередь. Для поддержки высокого уровня дифференциации обслуживания в одну и ту же очередь должны направляться пакеты потоков с приблизительно равными приоритетами обслуживания.

В ходе управления ресурсом радиointерфейсов на сетевом уровне OSI надо обеспечить решение следующих задач:

1) Распределить пропускную способность радиointерфейса, сформированную на канальном уровне OSI, между отдельными очередями (Resource Allocation).

2) Определить порядок направления того или иного потока в заданную очередь, организованную на интерфейсе (Congestion Management).

В ходе решения первой задачи, связанной с распределением пропускной способности радиointерфейса между отдельными очередями, в рамках данной модели нужно рассчитать множество вещественных переменных b_j^n , ($j = \overline{1, Q_n}$). Каждая из этих переменных определяет величину пропускной способности радиointерфейса базовой станции WiMAX, выделенную для обслуживания пакетов из j -й очереди.

В рамках предлагаемой модели за результат решения второй задачи отвечает множество булевых переменных

$$y_{i,j}^n \in \{0,1\}, (i = \overline{1, M_n}, j = \overline{1, Q_n}), \quad (9)$$

каждая из которых характеризует долю i -го потока, направленного на обслуживание в j -ю очередь на n -м радиointерфейсе базовой станции.

Таким образом, в рамках предлагаемой модели централизованного распределения ресурса нисходящего канала WiMAX на канальном и сетевом уровнях модели OSI необходимо рассчитать множество управляющих переменных трех типов. При этом первый тип переменных – x_n^k , ($n = \overline{0, N}, k = \overline{1, K}$) (2), отвечая за формирование пропускной способности каждого из N радиointерфейсов (6), определяет порядок распределения подканалов в нисходящем канале WiMAX. Второй тип управляющих переменных b_j^n распределяет ресурс канального уровня между очередями сетевого уровня OSI, а переменные третьего типа $y_{i,j}^n$ (9) отвечают за формирование очередей пакетов также на сетевом уровне OSI.

На вновь введенные переменные b_j^n и $y_{i,j}^n$ согласно их физическому смыслу накладывается ряд важных условий. Например, для обеспечения корректного распределения пропускной способности того или иного радиointерфейса $R_{\text{свд}}^n$ переменные b_j^n должны отвечать следующим условиям:

$$0 \leq b_j^n, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{Q_n} b_j^n \leq \sum_{k=1}^K \left(x_n^k \frac{R_c^{n,k} k_b^{n,k} K_s (1 - BLER)}{(T_b + T_g + T_{RTG} + T_{TRG})} \right), \quad (n = \overline{1, N}). \quad (11)$$

Условия (11) определяют функциональную взаимосвязь переменных, отвечающих за распределение ресурса нисходящего канала WiMAX на канальном (x_n^k) и сетевом (b_j^n) уровнях OSI.

На величины переменных третьего типа также накладывается ряд условий. Первый вид условий – условия сохранения потока на радиointерфейсе базовой станции:

$$\sum_{j=1}^{Q_n} y_{i,j}^n = 1, \quad (n = \overline{1, N}; i = \overline{1, M_n}). \quad (12)$$

Выполнение условий (12) совместно с (9) дает гарантию того, что все пакеты того или иного потока поступят на одну из очередей, организованных на радиointерфейсе базовой станции WiMAX. Для предотвращения перегрузки пропускной способности радиointерфейса (Congestion Avoidance), выделенного той или иной очереди, в ходе расчета разнотипных управляющих переменных также необходимо выполнить ряд условий:

$$\sum_{i=1}^{M_n} a_i^n y_{i,j}^n < b_j^n, \quad (n = \overline{1, N}; j = \overline{1, Q_n}). \quad (13)$$

Условия (13) определяют функциональную связь управляющих переменных, регламентирующих процессы распределения ресурсов радиointерфейсов базовой станции на сетевом уровне.

С целью поиска не только допустимого решения задач, связанных с расчетом переменных x_n^k , b_j^n и $y_{i,j}^n$ в рамках условий (2)-(7), (9)-(13), но и определения их оптимальных значений, важно определиться с критерием оптимальности получаемых решений. Данный критерий, с одной стороны, должен максимально согласовываться с физическим смыслом решаемой задачи по распределению ресурсов WiMAX сети на канальном и сетевом уровнях OSI, а с другой – обеспечивать получение искомого оптимального решения с приемлемой точностью в реальном времени. В этой связи согласованный централизованный расчет управляющих переменных трех разных типов (x_n^k , b_j^n и $y_{i,j}^n$) обеспечен в ходе минимизации целевой функции следующего вида:

$$F = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{Q_n} c_j^n \cdot b_j^n + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{M_n} \sum_{j=1}^{Q_n} c_{i,j}^n \cdot y_{i,j}^n - c_\beta \beta, \quad (14)$$

где c_j^n – условная стоимость выделения j -й очереди единицы пропускной способности n -го радиointерфейса базовой станции; $c_{i,j}^n$ – условная стоимость (метрика) ис-

пользования пакетами i -го потока j -й очереди, организованной на n -м радиоинтерфейсе базовой станции сети WiMAX; c_{β} – метрика, определяющая важность результата решения задач канального уровня, связанных с балансировкой числа выделяемых подканалов той или иной пользовательской станции.

Выбор подобного критерия оптимальности, связанного с минимизацией целевой функции (14), также способствует повышению согласованности решения задач канального уровня (формирование ресурса радиоинтерфейсов в нисходящем канале WiMAX) и задач сетевого (формирование очередей пакетов и выделением им пропускной способности радиоинтерфейса) уровней OSI. Первое слагаемое в (14) определяет суммарную условную стоимость выделения пропускной способности радиоинтерфейсам базовой станции сети WiMAX, второе слагаемое характеризует суммарную условную стоимость формирования и заполнения очередей на радиоинтерфейсах BS, а третье слагаемое определяет максимизируемый нижний управляемый порог удовлетворения требований всех пользовательских станций по пропускной способности.

Для обеспечения оптимального агрегирования потоков по очередям, организованных на том или ином радиоинтерфейсе базовой станции, в рамках данной модели метрика $c_{i,j}^n$ в выражении (14) будет определяться согласно выражению [16]:

$$c_{i,j}^n = w_y (\mathbf{Pr}_{i,n}^{flow} - \mathbf{Pr}_{j,n}^{queue})^2 + 1, \quad (i = \overline{1, M_n}, j = \overline{1, Q_n}, n = \overline{1, N}). \quad (15)$$

Использование подобной метрики (15) нацелено на то, чтобы критерием направления того или иного потока в определенную очередь являлось максимальное совпадение (соизмеримость) их приоритетов $\mathbf{Pr}_{i,n}^{flow}$ и $\mathbf{Pr}_{j,n}^{queue}$. С помощью параметра w_y регулируется влияние первого слагаемого в функции (14) на ее результирующее значение в целом.

В рамках централизованной модели распределения ресурса нисходящего канала WiMAX в выражении (6) приоритет n -й станции предлагается следующим образом связать с характеристиками передаваемых к ней потоков пакетов:

$$Pr_n = \frac{\sum_{i=1}^{M_n} a_i^n \cdot \mathbf{Pr}_{i,n}^{flow}}{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{M_n} a_i^n}, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (16)$$

а требования по производительности, например, определялись как

$$R_{прб}^n = \sum_{i=1}^{M_n} a_i^n, \quad (n = \overline{1, N}). \quad (17)$$

Условия (17) определяют минимальные требования по пропускной способности, исходя из скоростей передачи пакетов отдельными потоками. На практике нередко используют показатели воспринимаемого качества обслуживания (Quality of Experience, QoE) при оценке степени удовлетворения требований пользователей [17-19]. В частности, в табл. 6 представлены требования к пропускной способности, выделяемой для того или иного потока VoIP, чтобы обеспечить заданный уровень качества обслуживания по показателю MoS (Mean Opinion Scores). Оценка MoS изменяется в пределах от 1 до 5.

Таблица 6. Взаимосвязь параметров VoIP-потока, характеристик используемого кодека и MOS-оценок

Тип используемого кодека	Скорость передачи (кбит/с)	Средняя задержка пакета	Требования по выделяемой пропускной способности (кбит/с)	Оценка MoS
G.711	64	20	83	4,1
G.726	16	20	58	4,0
G.729	8	20	26,4	3,92
G.723.1	5,3	30	18,4	3,65

В табл. 7 представлены требования к пропускной способности, выделяемой для видеопотока с различным разрешением.

Таблица 7. Взаимосвязь параметров видеопотока, характеристик используемого кодека и MOS-оценок

Тип видеопотока	Скорость передачи	Требования по выделяемой пропускной способности
Видеоконференция (H.323)	192 кбит/с	230 кбит/с
	384 кбит/с	460 кбит/с
	512 кбит/с	614 кбит/с
	768 кбит/с	920 кбит/с
Видеоконференция высокого разрешения (High Definition, HD)	1024 кбит/с	1,2 Мбит/с
	1472 кбит/с	1,8 Мбит/с
	1920 кбит/с	2,3 Мбит/с
	3840 кбит/с	4,6 Мбит/с

Размерность оптимизационной задачи, определяемая числом управляющих переменных x_n^k , b_j^n и $y_{i,j}^n$, а также одной переменной β , приблизительно составляет

$$N \cdot K + N \cdot \bar{Q} + N \cdot \bar{M} \cdot \bar{Q} + 1, \quad (18)$$

где \bar{Q} – среднее число организованных на каждом конкретном интерфейсе очередей пакетов; \bar{M} – среднее число потоков, поступающих через каждый конкретный радиointерфейс на пользовательскую станцию.

Таким образом, в рамках предложенной модели обеспечивается решение задачи по централизованному распределению ресурса нисходящего канала WiMAX на канальном и сетевом уровнях модели OSI. С помощью данной модели решение технологической задачи было сведено к решению математической задачи смешанного целочисленного линейного программирования, связанной с минимизацией целевой функции (14) при наличии условий-ограничений (2)-(7), (9)-(13). В ходе использования методики, предложенной в работе[19] можно перейти от решения задачи целочисленной оптимизации к решениям задачи нелинейного программирования для снижения вычислительной сложности получаемых решений.

IV. Пример решения задачи централизованного распределения ресурса нисходящего канала WiMAX на канальном и сетевом уровнях модели OSI

Для наглядности получаемого решения и подтверждения его работоспособности продемонстрируем работу предложенной модели на следующем примере. Пусть к рассмотрению принимаются следующие исходные данные:

- ширина нисходящего канала – 10 МГц;
- количество пользовательских станций (SS) равнялось трем ($N = 3$);
- число частотных подканалов – 16 ($K = 16$);
- матрица пропускных способностей подканалов (1) имеет вид:

$$\|R^{n,k}\| = \begin{vmatrix} 0,3 & 0,5 & 0,2 & 0,9 & 0,6 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,3 & 0,5 & 0,2 & 0,9 & 0,6 & 0,3 & 0,4 & 0,5 \\ 0,5 & 0,7 & 0,5 & 0,8 & 0,1 & 0,6 & 0,5 & 0,3 & 0,5 & 0,7 & 0,5 & 0,8 & 0,1 & 0,6 & 0,5 & 0,3 \\ 0,6 & 0,3 & 0,6 & 0,5 & 0,3 & 0,2 & 0,8 & 0,1 & 0,6 & 0,3 & 0,6 & 0,5 & 0,3 & 0,2 & 0,8 & 0,1 \end{vmatrix}.$$

Исходные данные по параметрам очередей (их количество и приоритет) и характеристикам потоков (их интенсивность и приоритет) представлены на рис. 1. В WiMAXсети базовая станция взаимодействовала с тремя пользовательскими станциями через соответствующие радиointерфейсы. Причем на первом радиointерфейсе организовывалось четыре очереди, а на втором и третьем – по три очереди. В рамках рассмотренного примера (рис. 1) на первом интерфейсе обслуживалось шесть потоков, на втором – четыре потока, а на третьем радиointерфейсе – пять потоков. Характеристики потоков (их приоритеты и интенсивности) указаны в таблицах в нижней части рис. 1. На этом же рисунке показан результат решения поставленной задачи, представленный порядком распределения частотных подканалов между радиointерфейсами, распределением пропускной способности радиointерфейсов между отдельными очередями, а также схемой агрегирования потоков между очередями.

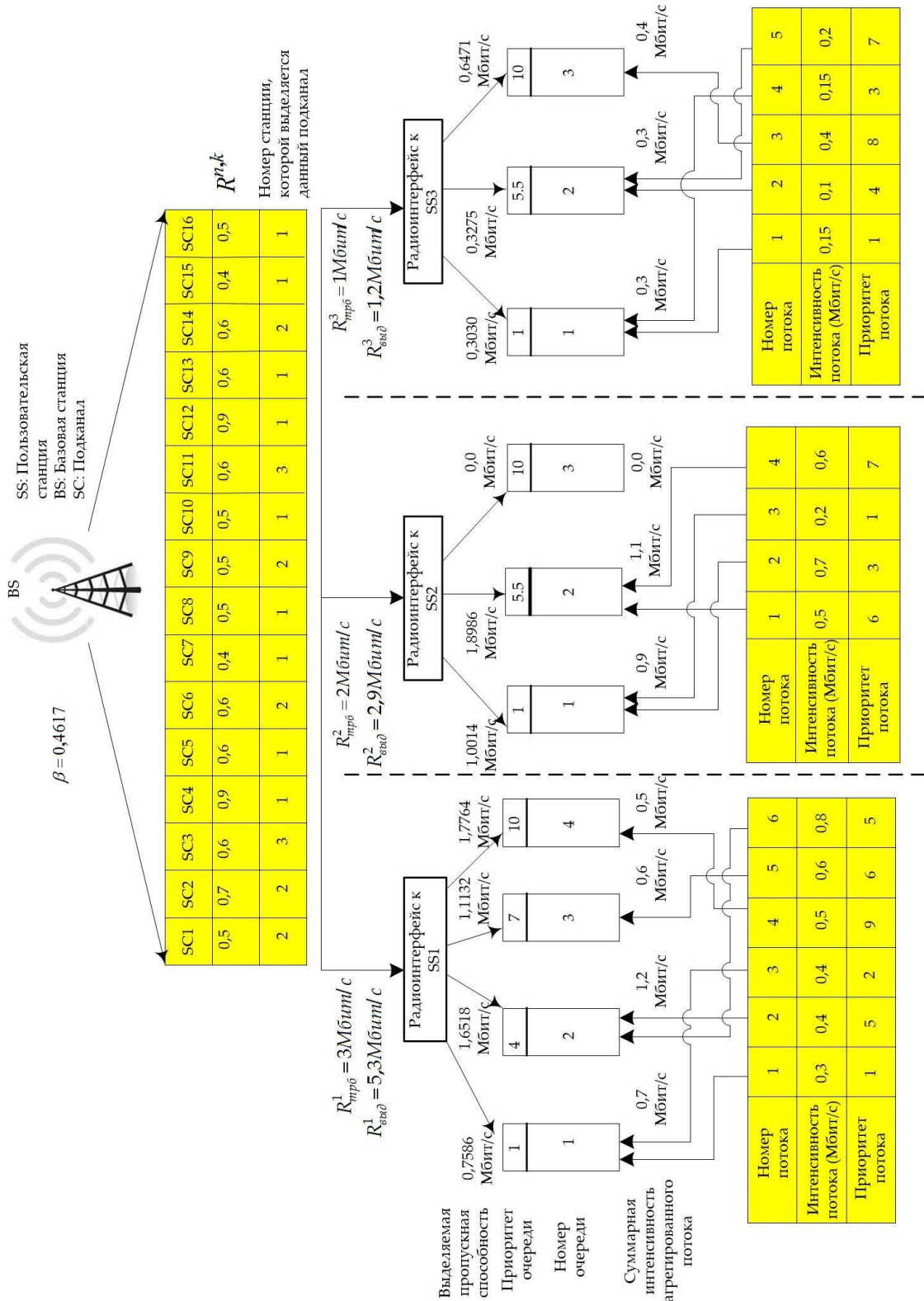


Рис. 1. Пример решения задачи централизованного распределения ресурса нисходящего канала WiMAX на канальном и сетевом уровнях модели OSI

Результаты расчета подтвердили работоспособность предложенной модели централизованного распределения ресурса нисходящего канала технологии WiMAX (2)-(7), (9)-(14). Ресурс пропускной способности нисходящего канала был распределен между тремя радиointерфейсами согласно числу и классам (приоритетам) поступающих на них потоков, требований к качеству обслуживания. Чем выше был приоритет потоков, тем больше пропускной способности нисходящего канала WiMAX выделялось данному радиointерфейсу. Если на интерфейс не поступал поток с приоритетом, близким к приоритету очереди (15), то данная очередь, например, очередь №3 второго радиointерфейса, пакетами не заполнялась, что способствовало минимизации времени на обслуживание очередей, а пропускная способность радиointерфейса распределялась между остальными непустыми очередями.

Выводы

1. Выдвинута гипотеза, что дополнительным источником роста эффективности решений по распределению ресурса нисходящего канала технологии WiMAX является повышение уровня согласованности в работе технологических средств (механизмов) канального и сетевого уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем. Традиционная парадигма, заключающаяся в последовательном решении задач, связанных с формированием пропускной способности радиointерфейсов базовой станции на канальном уровне и дальнейшим ее распределением на сетевом уровне между множеством организуемых очередей, может быть пересмотрена в сторону одновременного решения перечисленных задач. Это возможно по той причине, что подобные задачи решаются локализовано на базовой станции сети WiMAX, а не распределенно.

2. В ходе проведенного исследования установлено, что при решении задач распределения пропускной способности радиointерфейсов базовой станции WiMAX на сетевом уровне необходимо использовать потоковые модели, приводящие к получению оптимальных решений с точки зрения загруженности очередей интерфейса и улучшения показателей качества обслуживания в целом. В рамках данных моделей важно обеспечить также согласованное решение отдельных интерфейсных задач, связанных с классификацией и маркировкой пакетов; созданием и настройкой очередей на интерфейсе; агрегированием потоков и распределением пакетов по очередям интерфейса с учетом приоритетов передаваемых потоков, требований к качеству обслуживания, характеристик создаваемых очередей и интерфейса в целом; определению порядка обслуживания очередей; а также распределением пропускной способности интерфейса между отдельными очередями.

3. Получила дальнейшее развитие математическая модель централизованного распределения ресурса нисходящего канала WiMAX на канальном и сетевом уровнях модели OSI. Новизна модели состоит в том, что она обеспечивает согласованное решение задач канального уровня, связанных с формированием пропускных способностей радиointерфейсов с пользовательскими станциями в нисходящем канале

WiMAX, и задач сетевого уровня OSI, связанных с формированием очередей обслуживания и распределением пропускной способности интерфейса между отдельными сервисными потоками пакетов.

4. На численном примере продемонстрирована работоспособность предлагаемой модели, а также адекватность получаемых на ее основе решений на канальном и сетевом уровнях OSI по распределению ресурса нисходящего канала технологии WiMAX.

Список литературы:

1. *Andrews J.G., Ghosh A., Muhamed R.* Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking. // Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series. – 2007. – 449 p.
2. *Вишневский В.М., Портной Л.С., Шахнович И.В.* Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.
3. *Генко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В.* Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – К.: «ЕКМО», 2009. – 672 с.
4. *Sateesh G., Bheri P., Rajesh P., Rama Rao A.* Analysis of the Packet Scheduling Algorithms of WiMAX // Proceedings on International Conference on Computer Science and Engineering. – 2012. – P. 106-110.
5. *Mustapha R., Abuteir A., Samra Aiman Abu A.* Deadline Maximum Signal to Interference Ratio Scheduling Algorithm for WiMAX // International Journal of Computer Applications. – 2012. – № 43(5). – P. 27-32.
6. *Nie W., Wang H., Park J.H.* Packet Scheduling with QoS and Fairness for Downlink Traffic in WiMAX Networks // Journal of Information Processing Systems. – 2011. – V. 7, № 2. – P. 261–270.
7. *Puranik S.R., Vijayalakshmi M., Kulkarni L.* A Survey and Analysis on Scheduling Algorithms in IEEE 802.16e (WiMAX) Standard // International Journal of Computer Applications, October. – 2013. – P. 1-10.
8. *Jakimovski K., Janevski T.* Priority Based Uplink Scheduling Scheme for WiMAX Service Classes. I.J. // Information Technology and Computer Science, August. – 2013. – P. 66-74.
9. *Shabani A.H., Beg M.T., Khade A.A.-H.* Survey of DownLink Data Allocation Algorithms in IEEE 802.16 WiMAX // International Journal of Distributed and Parallel Systems. – 2012. – V. 55, № 6. – P. 197-207.
10. *Гаркуша С.В.* Разработка и анализ модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16 // Вісник національного університету «Львівська політехніка»: Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2012. – № 738. – С. 177–185.
11. *Лемешко О.В., Гаркуша С.В.* Модель превентивного обмеження швидкості передачі низхідного каналу зв'язку технології WiMAX в умовах перевантажень // Вісник національного університету «Львівська політехніка»: Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2013. – № 766. – С. 132–138.
12. *Гаркуша С.В., Гаркуша Е.В.* Результаты разработки модели распределения подканалов в сети WiMAX // Системи обробки інформації. – 2014. – Вип. 2 (118). – С. 153–159.
13. *Lemeshko O.V., Al-Janabi Haider D., Al-Janabi Hussam D.* Research of Impact Downlink Parameters And Service Discipline On Balancing Process The Subchannels Number Allocated

to Subscriber Stations In WiMAX // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2015. – Вып. 183. – С. 32-41.

14. *Lemeshko O.V., Haider D. Al-Janabi, Hussam D. Al-Janabi.* Priority-Based Model of Sub-channel Allocation in WiMAX Downlink // Scholars Journal of Engineering and Technology. – 2016. – 4(4). – P. 200-206.

15. *Lemeshko O.V., Ali A.S., Semenyaka M.V.* Results of the Dynamic Flow-Based Queue Balancing Model Research // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the international Conference TCSET'2012. – Lviv-Slavske, Ukraine, February 21-24, 2012. – P. 318-319.

16. *Симоненко А.В., Андрушко Д.В.* Математическая модель управления очередями на маршрутизаторах телекоммуникационной сети на основе оптимального агрегирования потоков и распределения пакетов по очередям // Проблемы телекоммуникаций. – 2015. – № 1 (16). – С. 94 - 102. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_simonenko_queue.pdf.

17. *Evans, J., Filsfils C.* Deploying IP and MPLS QoS for Multiservice Networks: Theory & Practice. – Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco, CA, USA, 2007. – p. 456.

18. *Tanenbaum A.S., Wetherall D.J.* Computer Networks, Fifth Edition. – Prentice Hall, Mass, 2011. – 962 p.

19. *Lemeshko O.V., Al-Dulaimi A.M., Al-Janabi H.D.* Method of presentation integer problem frequency resource allocation in LTE and WiMAX networks as nonlinear programming // Системи обробки інформації. – 2016. – № 2. – С. 109-113.