

Параметри пропорційно-інтегруючих фільтрів детектора вибрано з таблиці. За цих параметрів контрольні значення BER отримано за значно нижчого допустимого відношення сигнал/шум. Наприклад, для ймовірності бітової помилки 10^{-5} , яка є стандартом для коміркового зв'язку, значення мінімально необхідного SNR на 1.2 дБ нижче, ніж у звичайному детекторі. Це повторно підтверджує високу завадостійкість досліджуваного модифікованого детектора.

Висновки. Здійснено імітаційне моделювання, під час якого досліджували завадостійкість модифікованого детектора з використанням вузькосмугових пропорційно-інтегруючих фільтрів. За експериментальний сигнал вибрано OQPSK сигнал. У результаті моделювання встановлено, що якість детектування покращується зі зростанням значення інерційності фільтра та зі зменшенням коефіцієнта пропорційності. Визначено діапазон оптимальних значень цих параметрів, за яких працездатність детектора зберігається, а завадостійкість сигналу значно зростає порівняно зі звичайним детектором. Отримане відношення BER до SNR сигналу теж доводить ефективність модифікованої схеми.

1. Бондарев А.П., Максимів І.П. Дослідження впливу пропорційно-інтегруючих фільтрів на якість детектування ФМ сигналів // *Радіоелектроніка та телекомунікації*. – Львів, 2010.
2. Веселовский К. Системы подвижной радиосвязи // *Горячая линия "Телеком"*. – М., 2006.

УДК 621.391

С.В. Гаркуша

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДКАНАЛОВ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.16

© Гаркуша С.В., 2012

Представлена математическая модель распределения подканалов в широкополосных беспроводных сетях стандарта IEEE 802.16. Сформулированы требования, выдвигаемые к математическим моделям распределения подканалов. Проведен анализ получаемых решений при использовании различных критериев оптимальности.

Ключевые слова: подканал, поднесущая, математическая модель, IEEE 802.16, критерий оптимальности.

The article presents a mathematical model of the distribution of sub-channels in the broadband wireless standard IEEE 802.16. Formulated the requirements for mathematical models of the distribution of subchannels. The analysis of the solutions obtained by using different optimality criteria.

Key words: subchannel, subcarrier, the mathematical model, IEEE 802.16, optimality criterion.

Введение. В основу городских беспроводных сетей (Wireless Metropolitan-Area Network, WMAN), основанных на стандарте IEEE 802.16 (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) [1, 2], положена телекоммуникационная технология, разработанная с целью предоставления универсальной беспроводной связи на больших расстояниях для широкого спектра устройств (от рабочих станций и портативных компьютеров до мобильных телефонов). Однако использование достаточно широкого диапазона частот (2–11 ГГц для подключения пользовательских станций) и большой зоны радиопокрытия (несколько десятков километров) обычно приводит к серьезным помехам и многолучевому распространению сигнала. В результате этого в

технологии WiMAX для передачи данных использовано множество поднесущих, формируемых на основе мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM), а также множественного доступа на основе ортогонального частотного разделения (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA). При этом использование OFDM позволяет уменьшить шум в канале связи, минимизировать эффект многолучевости, а также избавиться от интерференционных эффектов, которые являются основными проблемами беспроводной связи. В свою очередь использование OFDMA позволяет достаточно гибко распределять ресурсы, которые ограничены для беспроводных сетей [3].

Одним из основных ресурсов, на которые накладываются ограничения в беспроводных сетях, является доступный частотный диапазон. Несмотря на достаточно широкий частотный диапазон в широкополосных сетях, необходимо эффективно распределить его между операторами связи с целью удовлетворения требований пользователей, а также обеспечения приемлемого уровня доходов для поставщиков услуг. В соответствии с IEEE 802.16 [1, 2], эти запросы должны быть обслужены в режиме реального времени. Таким образом, использование подходов, выполняющих распределение ресурсов и поддерживающих один тип трафика, становится неэффективным. Также должна выполняться поддержка разнообразного типа трафика. В результате этого возникает необходимость в разработке новых подходов по распределению ресурсов, одновременно удовлетворяющих разнообразные требования качества обслуживания (Quality of Service, QoS) и условия передачи разнородного трафика.

В статье решается задача распределения частотных ресурсов OFDMA в беспроводной широкополосной сети WiMAX с целью повышения ее производительности. Предложена математическая модель распределения частотного ресурса при централизованной схеме построения беспроводной сети, в которой место центральной станции занимает базовая станция (БС). Необходимо заметить, что БС, в централизованной схеме построения, выделяет ресурсы для пользовательских станций, основываясь на информации о состоянии каналов (channel states information, CSI).

Спецификации физического уровня IEEE 802.16. Изначально стандарт IEEE 802.16 задумывался как совокупность различных спецификаций для реализации функций физического уровня, которые базируются на принципах контроля доступа к среде (Medium Access Control, MAC). Для различных версий стандарта IEEE 802.16 предложены пять различных спецификаций [4–6]:

- WMAN-SC (Single Carrier – единственная поднесущая) – единственная спецификация, ориентированная на работу оборудования в диапазоне частот 10–66 ГГц в сетях с топологией «точка-точка» и «точка-многоточка». Эта спецификация предполагает, что станции сети находятся в режиме прямой видимости, поскольку затухание столь высокочастотных сигналов при отражении достаточно велико;

- WMAN-SCa – модифицированная «низкочастотная» вариация спецификации WMAN-SC, разработанная для диапазонов частот ниже 11 ГГц. Эта спецификация претерпела ряд изменений с целью обеспечения функционирования базовых и пользовательских станций при отсутствии прямой видимости;

- WMAN-OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) – оборудование этой спецификации предназначено для работы в диапазоне частот 2–11 ГГц в сетях с топологией «точка-многоточка» и «mesh». Характерным отличием этой спецификации является использование технологии OFDM;

- WMAN-OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access – множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов) – в основу этой спецификации положена спецификация WMAN-OFDM, которая претерпела усовершенствования в части реализации множественного доступа на базе технологии OFDMA. Оборудование этой спецификации предназначено для работы в диапазоне частот 2–11 ГГц;

- WHUMAN (Wireless High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network – высокоскоростная нелицензируемая сеть масштаба города) – спецификация предназначена для работы на

нелицензируемых частотах в диапазоне 2–11 ГГц (для США и Европы преимущественно в диапазоне 5–6 ГГц).

Все спецификации, которые ориентированы на обеспечение работы оборудования в диапазоне частот 2–11 ГГц, в основном отличаются от спецификации WMAN-SC инновациями в организации физического уровня. WiMAX Forum. Из всех предложенных были сертифицированы лишь две спецификации – WMAN-OFDM и WMAN-OFDMA, которые и положены в основу глобальной стандартизации оборудования WiMAX [5].

IEEE 802.16 определяет три вида методов разделения каналов: множественный доступ с разделением по времени (Time Division Multiple Access, TDMA), OFDM и OFDMA, в индивидуальном порядке. TDMA используется в спецификациях WMAN-SC и WMAN-SCa, работая в режиме разделения времени и основываясь на временных интервалах. Он разделяет время на интервалы, обеспечивая при этом полосу пропускания для каждого отдельно взятого пользователя. Таким образом, только один пользователь может работать в рамках одного временного интервала. Необходимо заметить, что каждым временным интервалом может производиться избыточный опрос одного пользователя, что приводит к потере полосы пропускания.

Методы OFDM и OFDMA используются в спецификациях WMAN-OFDM и WMAN-OFDMA соответственно. OFDM и OFDMA делит канал на ортогональные и независимые поднесущие. В свою очередь набор поднесущих формирует подканал. При этом поднесущие в подканале могут располагаться как последовательно, так и на некотором расстоянии друг от друга. Виды методов разделения каналов в WiMAX приведены на рис. 1 [7, 8].

Основное отличие между OFDM и OFDMA заключается в том, что OFDM обеспечивает доступ, в рамках одного символа, только для одного пользователя. При этом число неиспользованных подканалов отбрасывается. OFDMA предоставляет каждому пользователю одновременно необходимое количество подканалов. В результате этого канал при OFDMA можно использовать более эффективным и гибким способом.

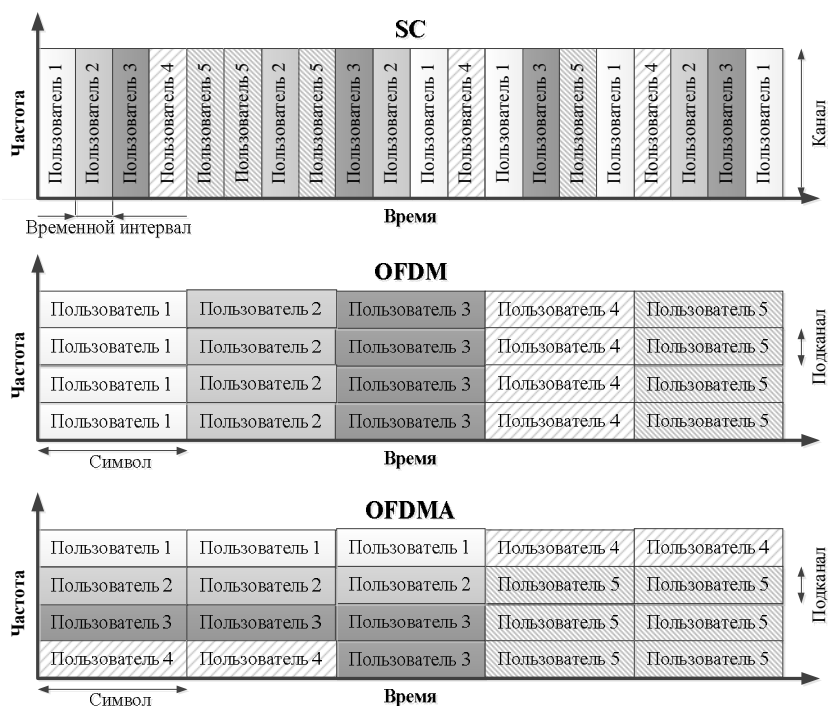


Рис. 1. Виды методов разделения каналов в WiMAX

Далее приведены пояснения основных терминов, используемых в различных спецификациях, а именно [5]:

- поднесущая – первичная структурная единица OFDM. Различают три типа поднесущих: для передачи данных, пилотные и «нулевые» (образующие защитные интервалы);
- подканал – наименьшая логическая структура OFDMA в частотной области. Физический подканал образуется несколькими поднесущими со смежным или распределенным расположением;
- символ – промежуток времени, на протяжении которого амплитуда и фаза модулируемых поднесущих неизменна.

Физический уровень спецификации WMAN-OFDMA. Метод OFDMA основан на технологии OFDM, но в отличие от последней ориентирован на обмен данными одновременно с несколькими пользователями. При этом отдельные поднесущие группируются в подканалы, в результате чего отдельному пользователю может быть выделен один или несколько подканалов – в зависимости от приоритета пользователя, заявленной скорости передачи и параметров QoS.

В стандартах IEEE 802.16a и IEEE 802.16d используется схема OFDMA с фиксированным «окном» быстрого преобразования Фурье (БПФ) размером 2048 поднесущих, используя рабочую полосу канала 20 МГц. В стандарте IEEE 802.16e применяется масштабируемый вариант OFDMA, реализуемый за счет изменения «окна» БПФ, что позволяет варьировать рабочую полосу канала в пределах от 1,25 МГц до 20 МГц [5].

Далее в статье рассмотрим режим OFDMA с фиксированным «окном» БПФ, параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры спецификации WMAN-OFDMA с фиксированным «окном» БПФ

Ширина полосы канала F_{BW} , МГц	Частота дискретизации $F_s = (8/7)F_{BW}$, МГц	Период дискретизации $1/F_s$, нс	Размер окна БПФ N_{FFT}	Частотный разнос между поднесущими $\Delta f = F_s / N_{FFT}$, КГц	Длительность полезной части символа T_B , мс
20	22,857	44	2048	$\approx 11,16$	89,6

В случае распределенной расстановки поднесущих в спецификации WMAN-OFDMA предусмотрены два подрежима, определяющие способ формирования «частотной структуры» подканалов [5]:

- подрежим OFDMA FUSC (Full Usage of Subcarriers) – полное использование поднесущих;
- подрежим OFDMA PUSC (Partial Usage of Subcarriers) – «парциальное» использование поднесущих.

Порядок распределения поднесущих в нисходящем направлении (Down Load, DL), от БС к пользовательским станциям, для подрежимов DL FUSC и DL PUSC с фиксированным «окном» БПФ приведен в табл. 2.

Таблица 2

Порядок распределения поднесущих для подрежимов DL FUSC и DL PUSC с фиксированным «окном» БПФ

Подрежим	DL FUSC	DL PUSC
Количество поднесущих в канале	2048	2048
Число поднесущих для передачи данных на один подканал	48	24
Количество подканалов	32	60
Общее количество поднесущих, используемых для передачи данных	1536	1440
Общее количество пилотных поднесущих	166	240
Количество поднесущих в нижнем защитном интервале	173	184
Количество поднесущих в верхнем защитном интервале	172	183

Анализ известных решений. Как показал проведенный анализ [3, 9], большинство способов (методов) распределения частотного ресурса в беспроводных широкополосных сетях стандарта IEEE 802.16 выполняет распределение поднесущих между пользовательскими станциями для обеспечения доступа к БС. При этом количество поднесущих, выделяемых одной пользовательской станции, произвольно. Однако в стандарте IEEE 802.16 указано, что поднесущие закреплены за отдельными подканалами, количество которых ограничено. Также необходимо заметить, что количество подканалов и поднесущих в них зависит от ширины канала. Анализ способов, представленных в [3, 9], позволил определить требования к перспективным решениям в этой области:

- ориентация на решение задачи распределения подканалов;
- инвариантность к рассматриваемой топологии широкополосной беспроводной сети;
- ориентация на преимущественно динамический характер решения задачи распределения подканалов;
- учет типа и характера циркулирующего в беспроводной сети трафика;
- ориентация на максимизацию производительности беспроводной сети в целом и на улучшение других показателей качества обслуживания;
- учет технологических особенностей беспроводной сети, которые определяют количество подканалов в одном частотном канале, количество поднесущих в подканале и т.п.

Математическая модель распределения подканалов в беспроводной сети стандарта IEEE 802.16. В предлагаемой модели предполагаются известными исходные данные:

- 1) N – общее число пользовательских станций в сети;
- 2) L – число подканалов в частотном канале;
- 3) $R_{mpб}^n$ – требуемая скорость передачи для обслуживания n -го пользователя, Мбит/с.

В рамках предлагаемой модели, в ходе решения задачи распределения подканалов пользовательским станциям сети необходимо обеспечить расчет булевой переменной

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

Общее количество переменных (1), которые определяют порядок распределения подканалов, зависит от количества пользовательских станций в сети, используемых подканалов и, соответственно, будет определяться выражением $N \times L$. Результатом расчета переменных (1) должно быть закрепление подканалов за пользовательскими станциями, по которым будут передаваться данные в нисходящем направлении от БС. В связи с этим, при расчете искомым переменных x_n^l необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений:

- 1) условие того, что l -й подканал выделен только одной пользовательской станции:

$$\sum_{n=1}^N x_n^l \leq 1 \quad (l = \overline{1, L}); \quad (2)$$

- 2) условие того, что n -й пользовательской станции будет гарантирована требуемая скорость обслуживания:

$$r_n \geq R_{mpб}^n, \quad (3)$$

где r_n – скорость передачи, выделяемая n -й пользовательской станции в результате решения задачи распределения подканалов.

Скорость передачи n -й пользовательской станции (r_n) зависит от количества выделенных подканалов и рассчитывается с использованием такого выражения:

$$r_n = R_l \sum_{l=1}^L x_n^l \quad (n = \overline{1, N}), \quad (4)$$

где R_l – пропускная способность одного подканала.

В свою очередь пропускная способность подканала (R_l) будет определяться как количество переданных бит за единицу времени (секунду), исключая пилотные биты, и может быть рассчитана по формуле [10]:

$$R_l = R_c k_b K_s \Delta f, \quad (5)$$

где R_c – скорость кода, используемого при кодировании сигнала (например, для модуляции 16-QAM 1/2 параметра $R_c=1/2$); k_b – уровень модуляции (битовая загрузка символа), значения которой приведены в табл. 3; K_s – число поднесущих для передачи данных в одном подканале; $\Delta f \approx 11,16$ КГц – частотный разнос между поднесущими.

Таблица 3

Значения битовой загрузки символа для различных видов модуляции

Вид модуляции	BPSK	QPSK	8-PSK	16-QAM	32-QAM	64-QAM	256-QAM
Битовая загрузка символа, бит/с/Гц	1	2	3	4	5	6	8

Используя выражения (4) и (5), условие-ограничение (3) можно представить в виде:

$$R_c k_b K_s \Delta f \sum_{l=1}^L x_n^l \geq R_{mp}^n. \quad (6)$$

Расчет искоемых переменных (1) в соответствии с условиями-ограничениями (2) и (6) целесообразно осуществлять в ходе решения оптимизационной задачи, обеспечивая минимум или максимум предварительно выбранного критерия качества решения задачи распределения подканалов в беспроводной сети стандарта IEEE 802.16. К основным требованиям к критерию оптимальности стоит отнести, с одной стороны, соответствие физике решаемой задачи, т.е. задачи распределения подканалов, а с другой – возможности получения на его основе практически реализуемых решений (результатов). Таким образом, постановка самой задачи не должна быть излишне усложнена, а для ее решения должен быть известен или разработан эффективный метод.

При выборе критерия оптимальности необходимо, например, обеспечить максимизацию скорости передачи в направлении к каждой из пользовательских станций. Так, с целью повышения общей производительности беспроводной широкополосной сети, критерий оптимальности можно представить в виде:

$$\max \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L x_n^l, \quad (7)$$

при учете условий-ограничений (2) и (6). Использование этого критерия позволит повысить общую производительность беспроводной сети путем выделения пользовательским станциям всего канального ресурса. Использование критерия оптимальности (7) вносит в математическую модель избыточность, которая выражается в выделении подканалов, которые могли бы и не использоваться.

Кроме того, задачу распределения подканалов можно решить с использованием критерия оптимальности, направленного на улучшение сигнально-помеховой обстановки в используемом диапазоне частот, а также обеспечивающего экономию частотного ресурса. Для этого необходимо минимизировать число выделяемых подканалов. В результате этого критерий оптимальности примет вид:

$$\min \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L x_n^l, \quad (8)$$

при учете условий-ограничений (2) и (6). Использование критерия оптимальности (8) позволяет избавиться от избыточности при решении оптимизационной задачи путем выделения лишь того количества подканалов, которое необходимо для удовлетворения требований по скорости передачи.

Сформулированная задача с математической точки зрения является задачей целочисленного линейного программирования – ILP (Integer Linear Programming). В модели искомые переменные x_n^l (1) являются булевыми, переменная, используемая в критериях оптимальности (7) и (8), является целочисленной, а ограничения (2) и (6) на искомые переменные носят линейный характер.

Анализ решений задачи распределения подканалов в широкополосной беспроводной сети стандарта 802.16 при использовании различных критериев оптимальности. С целью оценки качества получаемых решений при распределении подканалов, в рамках предложенной модели (1), (2), (6), рассмотрим различные постановки и решения оптимизационной задачи. Для решения задачи распределения подканалов использовались два различных критерия оптимальности:

- в первом случае – максимум выделяемых подканалов пользовательским станциям беспроводной сети (7);
- во втором случае – минимум выделяемых подканалов пользовательским станциям беспроводной сети (8).

Для анализа результатов решения задачи распределения подканалов в широкополосной беспроводной сети стандарта IEEE 802.16, при использовании различных критериев оптимальности, в качестве примера использовано конфигурацию беспроводной сети, представленную на рис. 2.

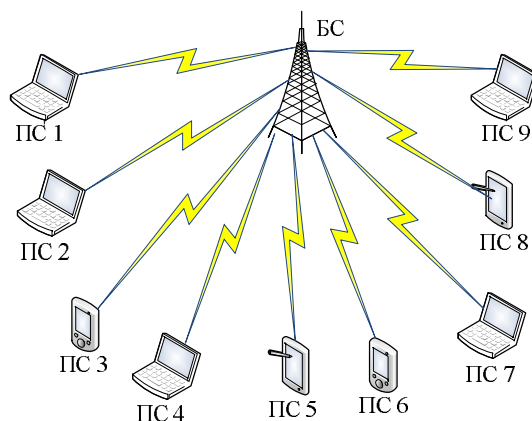


Рис. 2. Пример конфигурации беспроводной сети стандарта IEEE 802.16

При решении задачи распределения подканалов в качестве исходных данных были использованы такие:

- количество пользовательских станций, одновременно участвующих в соединении $N=9$;
- используемый подрежим OFDMA – DL FUSC;
- количество подканалов в одном канале – $L=32$ (определяется подрежимом OFDMA);
- количество поднесущих для передачи данных на один подканал – $K_s=48$ (определяется подрежимом OFDMA);
- частотный разнос между поднесущими – $\Delta f \approx 11,16$ КГц;
- вид модуляции сигнала – 16-QAM 1/2;
- уровень модуляции (битовая нагрузка символа) – $k_b=4$ (определяется видом модуляции из табл. 2);
- скорость кода, используемого при кодировании сигнала, – $R_c=1/2$ (определяется видом модуляции);
- требуемая скорость передачи, необходимая для обслуживания n -го пользователя (Мбит/с)
- $R_{тpб}^1=1$; $R_{тpб}^2=1,5$; $R_{тpб}^3=0,3$; $R_{тpб}^4=0,5$; $R_{тpб}^5=0,4$; $R_{тpб}^6=0,5$; $R_{тpб}^7=3$; $R_{тpб}^8=1$; $R_{тpб}^9=2$.

В результате решения задачи распределения подканалов с использованием критерия оптимальности (7) каждой пользовательской станции выделялось несколько подканалов, количество которых обеспечивало требуемую скорость передачи. Результаты решения задачи распределения подканалов для используемого примера приведены на рис. 3.

Номер пользовательской станции	Номер подканала																																Скорость передачи получаемая в результате решения задачи (Мбит/с)	Требуемая скорость передачи (Мбит/с)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32				
1	■	■	■																															3,14	1	
2				■	■	■	■	■	■																									5,23	1,5	
3									■																									1,05	0,3	
4										■	■																							2,09	0,5	
5											■																							1,05	0,4	
6												■	■																					2,09	0,5	
7														■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	9,42	3		
8																										■	■	■						3,14	1	
9																																	■	■	6,28	2

Рис. 3. Пример решения задачи распределения подканалов в беспроводной сети стандарта IEEE 802.16 с использованием критерия оптимальности (7)

На рис. 3 ячейка помечена серым цветом в случае, если n -й пользовательской станции выделен l -й подканал.

В результате решения оптимизационной задачи с использованием критерия оптимальности (7) (рис. 3) между пользовательскими станциями беспроводной сети стандарта IEEE 802.16 были распределены все подканалы, что обеспечило максимальную производительность беспроводной сети. Как видно из рис. 3, скорость передачи каждой из пользовательских станций, получаемая в результате решения оптимизационной задачи, значительно превышает требуемую скорость передачи. Однако в приведенном примере подканалы распределены между пользовательскими станциями кратно требуемой скорости передачи. Это является частным результатом решения задачи. Поэтому для получения сбалансированного решения задачи распределения подканалов с использованием критерия оптимальности (7) в математическую модель (1), (2), (6) необходимо внести дополнительное условие балансировки.

Далее представим результат решения задачи распределения подканалов для рассматриваемого примера возможной конфигурации беспроводной сети (рис. 2) с использованием критерия оптимальности (8), который приведен на рис. 4.

Номер пользовательской станции	Номер подканала																																Скорость передачи получаемая в результате решения задачи (Мбит/с)	Требуемая скорость передачи (Мбит/с)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32			
1	■																																	1,05	1
2		■	■																															2,09	1,5
3				■																														1,05	0,3
4					■																													1,05	0,5
5						■																												1,05	0,4
6							■																											1,05	0,5
7								■	■																									3,14	3
8												■	■																					1,05	1
9													■	■																				2,09	2

Рис. 4. Пример решения задачи распределения подканалов в беспроводной сети стандарта IEEE 802.16 с использованием критерия оптимальности (8)

Как видно из полученного результата (рис. 4), при использовании критерия оптимальности (8) скорость передачи для каждой из пользовательских станций, получаемая в результате решения оптимизационной задачи, незначительно превышает требуемую скорость передачи. Небольшое превышение требуемой скорости передачи вызвано тем, что количество поднесущих в одном подканале фиксировано, а значит, и пропускная способность каждого подканала также фиксирована. Так как пользовательским станциям выделяется лишь необходимое число подканалов, то это позволяет устранить избыточность при решении оптимизационной задачи, которая проявляется в случае выделения пользовательской станции количества подканалов, превышающего необходимое. Так как при решении задачи с использованием критерия оптимальности (8) задействуется лишь часть частотного ресурса, то это также позволяет улучшить сигнально-помеховую обстановку в используемом диапазоне частот в зоне действия сети.

Также необходимо заметить, что в решениях, представленных на рис. 3 и рис. 4, подканалы для отдельных пользовательских станций выделены последовательно. Однако это является частным решением. Подканалы отдельному пользователю могут быть выделены как последовательно, так и случайным образом, что никак не повлияет на качество решения задачи распределения подканалов.

Выводы. Установлено, что одной из основных задач в широкополосных беспроводных сетях стандарта IEEE 802.16 является задача распределения подканалов между пользовательскими станциями. В связи с этим проанализированы существующие методы распределения частотного ресурса в широкополосных беспроводных сетях стандарта IEEE 802.16. На основе недостатков проанализированных методов были сформулированы требования системного характера, направленные на устранение выявленных недостатков и подразумевающие разработку математической модели распределения подканалов в широкополосных беспроводных сетях стандарта IEEE 802.16.

На основании сформулированных требований, выдвигаемых к перспективным решениям в области распределения подканалов в широкополосных беспроводных сетях стандарта IEEE 802.16, предложена математическая модель, представленная рядом линейных условий-ограничений. Новизна модели состоит в формулировке задачи распределения частотного ресурса как задачи распределения подканалов с жестко закрепленным числом поднесущих в каждом из них. Кроме того, в ходе распределения подканалов гарантируется требуемая скорость передачи данных для каждой из пользовательских станций, путем выделения необходимого количества подканалов.

Сформулированная задача с математической точки зрения является задачей целочисленного линейного программирования – ILP (Integer Linear Programming). В модели искомые переменные x_n^l (1) являются булевыми, переменная, используемая в критериях оптимальности (7) и (8), является целочисленной, а ограничения (2) и (6) на искомые переменные носят линейный характер.

В статье проведен анализ решений оптимизационной задачи распределения подканалов в рамках предложенной модели (1), (2), (6) при использовании двух критериев оптимальности: максимума выделяемых подканалов пользовательским станциям (7) и минимума выделяемых подканалов пользовательским станциям (8). В ходе анализа было установлено, что использование критерия оптимальности (7) позволяет максимизировать общую производительность беспроводной сети, однако для сбалансированного решения задачи распределения подканалов необходимо использовать дополнительное условие балансировки. С другой стороны, использование критерия оптимальности (8) позволяет выполнить требования, выдвигаемые к скорости передачи пользовательских станций, а также обеспечить экономию частотного ресурса, путем устранения нежелательной избыточности. Избыточность решения заключается в выделении количества подканалов, превышающего их необходимое число для обеспечения требуемой скорости передачи. Также использование критерия оптимальности (8) позволяет улучшить сигнально-помеховую обстановку в используемом диапазоне частот в зоне действия беспроводной сети.

1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems // IEEE, Tech. rep. 802.16, Oct. 2004. 2. IEEE Standard for

Local and Metropolitan Area Networks Part 16 and Amendment 2 // IEEE, Tech. rep. 802.16e, Feb. 2006.
3. Mehrjoo M. Resource Allocation in OFDM-Based WiMAX / M. Mehrjoo, M.K. Awad, X.S. Shen // CRC Press, *Wireless Networks and Mobile Communications: WiMAX network planning and optimization.* – 2009. – P. 113 – 131. 4. Вишневикий В.М. *Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G* / В.М. Вишневикий, Л.С. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с. 5. Генко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. *Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития.* – К.: ЕКМО, 2009. – 672 с. 6. Шахнович И.В. *Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16 для диапазонов ниже 11 ГГц* / И.В. Шахнович // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* – 2005. – №1. – С. 8 – 14. 7. Tarhini, C. Chahed, T. *On capacity of OFDMA-based IEEE802.16 WiMAX including Adaptive Modulation and Coding (AMC) and inter-cell interference* // *15th IEEE Workshop on Local & Metropolitan Area Networks (LANMAN 2007).* – 2007. – P. 139 – 144. 8. Wang S.C., Yan K.Q., Wang C.H. *A Channel Allocation based WiMax Topology* // *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS 2009).* – 2009. – Vol.1. – P. 299 – 304. 9. Ki-Dong L. *Dynamic resource allocation in OFDMA wireless metropolitan area networks* / L. Ki-Dong, V.C.M. Leung // *Wireless Communications* – 2007. – Vol.14, Iss.1 – С. 6 – 13. 10. Ермолаев В.Т. Флакман А.Г. *Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи.* – Нижний Новгород: НГУ им. И.Н. Лобачевского, 2010. – 107 с.

УДК 517

Й.А. Захарія

Національний університет “Львівська політехніка”

ПРО ЧИСЛОВЕ ПІДСУМУВАННЯ НЕСКІНЧЕННИХ РЯДІВ

© Захарія Й.А., 2012

Розглянуто процедури числового підсумування збіжних рядів за допомогою обчислювальної техніки: перевірка збіжності ряду, вибір обмеження числового ряду для підсумування, оцінка похибок обмеження одинарного і подвійного рядів.

Ключові слова:

The summarizing procedures of numerical convergent series use the computer technique are considered: numerical series convergence control, forming of partial series for summarizing, determining of series sum calculation mistakes for single and double numerical series.

Key words:

Вступ. В аналізі поля хвиль у хвилеводах напруженість результуючого поля часто записують у вигляді нескінченної суми просторових гармонік. Звичайно, більшість таких гармонік є загасаючими, а сформовані ними ряди є подвійними. Тому в електродинамічному аналізі виникає проблема підсумування нескінченних рядів. Відзначимо, що подвійний ряд є також рядом чисел-сум одинарних рядів.

Найбажанішим є аналітичне підсумування збіжного ряду, коли сума ряду виражається функціонально у замкнутому вигляді. Сума ряду може бути тоді точною Як відомо, найпростіше аналітичне підсумування здійснюють за допомогою геометричних рядів [1]. Однак при цьому вираз для члена ряду має одну, конкретну, форму. Для підсумування рядів з іншим виглядом виразу для члена ряду використовують складні методи: метод контурних інтегралів або метод інтегральних перетворень (Лапласа, Фур'є, Мелліна). І для таких методів підсумування різновид запису члена ряду також дуже обмежений. Виникає додаткова задача: приведення виразу для члена ряду до вигляду, придатного до аналітичного підсумування. Таке перетворення не завжди вдається, тому часто звертаються і до числового підсумування рядів. Попередньо в такому ряді пришвидшують