

УДК 621.391

А.В. Лемешко, М.А. Гоголева

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## ИЕРАРХИЧЕСКО-КООРДИНАЦИОННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ MESH-СЕТЯХ СТАНДАРТА IEEE 802.11x

*С целью повышения производительности и масштабируемости беспроводных сетей предложена декомпозиционная модель и иерархическо-координационный метод распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11x. В основу метода положен принцип целевой координации, который наиболее соответствует технологическим и вычислительным особенностям решаемой задачи.*

**Ключевые слова:** беспроводная сеть, частотный канал.

### Введение

Одним из важных путей повышения производительности беспроводных сетей стандартов IEEE 802.11 a/b/g/n является использование многоканальных mesh-сетей, функционирующих на основе спецификации IEEE 802.11s [1]. Основная задача при этом заключается в оптимальном распределении частотных каналов (ЧК) между радиоинтерфейсами (РИ) mesh-станций с учетом особенностей частотного планирования, используемого в технологии беспроводной связи (ТБС), т.е. числа неперекрывающихся ЧК и их общего количества. Кроме того, должны быть учтены характеристики самих mesh-станций – их сетевая активность, территориальная удаленность, оснащенность РИ и др. С расширением территорий, охватываемых ТБС, на первое место выходят требования к повышению масштабируемости получаемых решений, где под масштабируемостью будем понимать способность беспроводной сети сохранять свою производительность в заданных пределах в условиях роста числа и территориальной распределенности mesh-станций. В этой связи актуальной представляется задача, связанная с разработкой математических моделей и методов, способных удовлетворить перечисленным выше требованиям без ущерба масштабируемости конечных решений по распределению ЧК в многоканальных mesh-сетях стандартов IEEE 802.11 a/b/g/n с учетом содержания спецификации IEEE 802.11s.

### Основной материал

Анализ известных решений задач распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандартов IEEE 802.11x. Среди всего множества методов и вычислительных алгоритмов распределения частотных каналов между радиоинтерфейсами mesh-станций многоканальной сети можно выделить две основные группы. Первая группа охватывает методы централизованного, а вторая – методы децентрализованного распределе-

ния ЧК в многоканальных mesh-сетях. Методы первой группы, которые освещены в работах [2 – 4], как правило, обеспечивают достаточно высокое качество решений по распределению ЧК, но создают ощутимый служебный трафик и вносят высокую инерционность при управлении в территориально-распределенных mesh-сетях, тем самым заметно снижая масштабируемость своей практической реализации. Методы второй группы [2], основанные на децентрализованном распределении ЧК, обеспечивают высокую масштабируемость получаемых решений, но ввиду отсутствия координации в работе отдельных mesh-станций переназначение частотных каналов вдоль одного соединения в условиях дефицита канального ресурса влечет перераспределение каналов и вдоль других соединений, что не всегда желательно.

В алгоритме CoMTaC [2] вся сеть разбивается на кластеры и распределение ЧК в них осуществляют т.н. лидеры кластера, однако координация в работе этих лидеров также не осуществляется, что снижает суммарное качество получаемых при его реализации решений. В этой связи заслуживает внимания подход, основанный на реализации идей иерархическо-координационного распределения ЧК, в рамках которого сочетаются преимущества централизованных и децентрализованных методов (алгоритмов), особенно касающихся качества и масштабируемости получаемых решений. В дальнейшем при разработке иерархическо-координационного метода распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях будет осуществлено декомпозиционное представление математической модели, предложенной в работах [3, 4], в рамках которой обеспечивается наиболее полный учет по сравнению с [2] требованиями, изложенными во введении к настоящей статье.

**Декомпозиционная модель распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11x.** В рамках предлагаемой модели предполагается известными сле-

дующие данные:  $\{R_i, i = \overline{1, N}\}$  – множество mesh-станций, где  $N$  – общее их количество в сети;  $m_j$  – число радиointерфейсов на mesh-станции  $R_j$ ;  $K$  – количество неперекрывающихся частотных каналов в mesh-сети, так, например, в технологии IEEE 802.11 b/g таких каналов  $3 \div 4$ , а в ТБС IEEE 802.11 b/g – 12 неперекрывающихся ЧК. Условимся, что многоканальная сеть будет называться однородной в случае, когда выполняется условие

$$m_1 = m_2 = \dots = m_N = m,$$

в противном случае – mesh-сеть будем называть неоднородной.

Пусть также  $\{G_z, z = \overline{1, Z}\}$  – множество зон устойчивого приема (transmission range, TR) – кластеров, которые образуют территориально удаленные mesh-станции, где  $Z$  – их общее количество в сети. Причем в рамках данной работы условимся, что кластер образует множество mesh-станций максимальной мощности, находящихся в одной зоне устойчивого приема, в рамках которой станции «слышат» друг друга, т.е. могут обмениваться данными с помощью выбранной в mesh-сети ТБС. Формально принадлежность той или иной mesh-станции к произвольной зоне устойчивого приема (кластеру) можно отразить с помощью вводимой TR-матрицы

$$D = \|d_{i,j}\|, \quad i = \overline{1, Z}; \quad j = \overline{1, N},$$

где

$$d_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я станция находится в } i\text{-й TR;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

которая, в общем случае, является прямоугольной. Количество строк в ней соответствует числу зон устойчивого приема ( $Z$ ), а число столбцов соответствует общему количеству mesh-станций ( $N$ ) в сети.

Тогда в ходе решения задачи распределения ЧК по РИ mesh-станций сети необходимо обеспечить расчет булевой переменной

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} \quad (i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, m_i}; \quad k = \overline{1, K}), \quad (2)$$

причем

$$x_{i,j}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й РИ } i\text{-й станции работает на } k\text{-м ЧК;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Результатом расчета переменных (2) должно быть разбиение mesh-сети в целом и каждой зоны устойчивого приема в отдельности на связные домены коллизий, в пределах которых mesh-станции находятся в одной TR и функционируют на одном и том же частотном канале. Связность подобных доменов должна обеспечиваться тем, что некоторые mesh-станции должны работать одновременно на нескольких ЧК. В связи с этим при расчете искомых

переменных  $x_{i,j}^k$  в каждой отдельно взятой  $G_z$  необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений [3-5]:

1. Условие включения  $i$ -й mesh-станции в сеть:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \geq m^* \quad (i = \overline{1, N}), \quad (3)$$

где  $1 \leq m^* \leq m_i$  – целочисленный параметр, характеризующий минимально необходимое число включенных РИ на произвольно выбранной mesh-станции.

2. Условие выделения  $j$ -му радиointерфейсу  $i$ -й станции не более одного ЧК:

$$\sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, m_i}). \quad (4)$$

3. Условие закрепления  $k$ -го частотного канала на  $i$ -й станции не более чем за одним радиointерфейсом:

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}; \quad k = \overline{1, K}). \quad (5)$$

4. Условие работы двух mesh-станций друг с другом не более чем на одном ЧК:

$$\sum_{k=1}^K \left[ \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \cdot \sum_{l=1}^{m_s} x_{s,l}^k \right] \leq 1 \quad (6)$$

(для каждой  $(i, s)$ -пары mesh-станций одной TR,  $i \neq s$ ),

которое вводится для устранения нежелательной структурной избыточности сети.

5. Условие связности mesh-сети в целом (связности создаваемых доменов коллизий mesh-станций):

$$p = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \geq N + K - 1, \quad (7)$$

выполнение которого совместно с условием (6) в условиях дефицита ЧК ( $K \leq N - 1$ ) гарантирует, что число включенных РИ ( $p$ ) с учетом числа mesh-станций и поддерживаемых в ТБС частотных каналов обеспечит связность сети.

Тогда результат решения задачи распределения ЧК в mesh-сети в целом можно представить в виде следующего вектора:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_Z \\ \vdots \\ \bar{x}_Z \end{bmatrix} \quad (8)$$

при

$$\bar{x}_z = \begin{bmatrix} x_{1,1}^1 \\ x_{1,1}^2 \\ \vdots \\ x_{i,j}^k \\ \vdots \\ x_{N_z,m_{N_z}}^K \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где  $N_z$  – общее число mesh-станций в  $G_z$ . Для  $z$ -й TR вектор распределения ЧК  $\bar{x}_z$  также можно представить в декомпозиционном виде:

$$\bar{x}_z = \begin{bmatrix} \bar{x}_z' \\ \bar{x}_z'' \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $\bar{x}_z'$  – вектор распределения ЧК между РИ mesh-станций, находящихся только в этой  $z$ -й TR;  $\bar{x}_z''$  – вектор распределения ЧК между РИ mesh-станций, находящихся кроме  $z$ -й TR одновременно еще и в других (другой) TR.

С целью обеспечения идентичного управления ресурсами mesh-станций, находящихся одновременно в нескольких зонах устойчивого приема, вводятся следующие условия на взаимодействие TR:

$$\bar{x}_z'' = \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z C_{zy} \bar{x}_y'' . \quad (11)$$

Кроме того, в дальнейшем понадобится декомпозиционное представление условия (7). Для этого правую часть данного условия, которая численно характеризует число включенных радиointерфейсов в mesh-сети, запишем в виде:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^K x_{i,j}^k = \sum_{z=1}^Z E_z^t \bar{x}_z, \quad (12)$$

где  $E_z$  ( $z = \overline{1, Z}$ ) – состоящие из нулей и единиц векторы размерности  $N_z \times 1$ , структура которых выбирается таким образом, чтобы суммирование включенных РИ mesh-станций, находящихся одно-

временно в нескольких TR, осуществлялось лишь один раз. Тогда с учетом равенства (12) условие (7) удобно представить в виде

$$-E_z^t \bar{x}_z \leq \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z E_r^t \bar{x}_r - N - K + 1. \quad (13)$$

В качестве критерия оптимальности получаемых решений в отличие от критерия, предложенного в работе [3 – 5], выберем минимум следующей целевой функции:

$$\min_x F \text{ при } F = \bar{f}^t \bar{x}, \quad (14)$$

которая характеризует средние затраты на частотное планирование в mesh-сети, где весовые коэффициенты – координаты вектора  $\bar{f}$  по сути являются параметрами mesh-сети и отдельных станций, подлежащие периодическому мониторингу или уточнению и характеризующие, например, относительную стоимость использования радиointерфейсов и частотных каналов, активность mesh-станций;  $[\bullet]^t$  – операция транспонирования матрицы. Если все координаты вектора  $\bar{f}$  равны нулю, то задача сводится к минимизации в mesh-сети числа включенных радиointерфейсов.

**Иерархическо-координационный метод распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11х.** Для иерархическо-координационного решения задач распределения ЧК, располагая моделью (1)-(13), выделим среди всего множества mesh-станций  $\{R_i, i = \overline{1, N}\}$  для каждой из TR  $\{G_z, z = \overline{1, Z}\}$  станцию координатор (TR-координатор), отвечающую за расчет вектора (9), а также назначим координатор для mesh-сети в целом, задачей которого является координация решений (9) с целью обеспечения выполнения условий (11) и (13). Таким образом, нулевой уровень иерархии распределения ЧК в mesh-сети образуют сами mesh-станции, первый уровень – TR-координаторы, а второй уровень – координатор сети в целом (рис. 1).

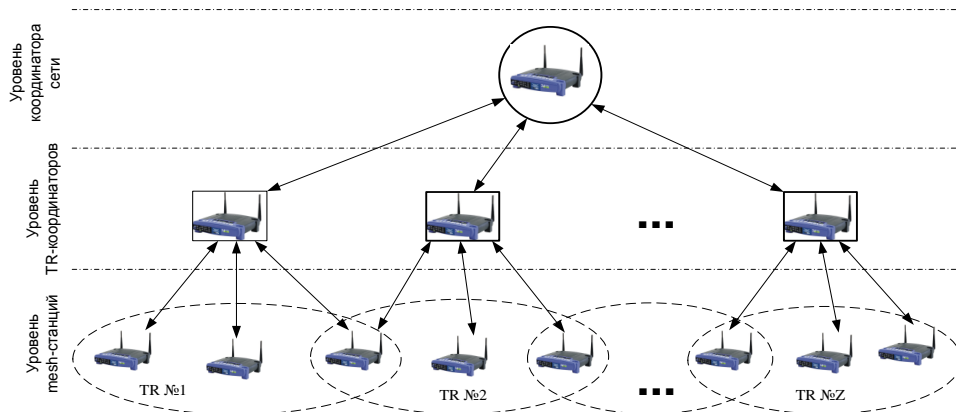


Рис. 1. Многоуровневая иерархия mesh-сети

В соответствии с теорией многоуровневых иерархических систем [6, 7] ключевой является задача распределения по уровням функций, связанных с минимизацией выражения (14) при наличии условий-ограничений (1) – (13). Для этого целевую функцию (14) представим в аддитивной форме

$$F = \sum_{z=1}^Z \bar{f}_z^t \bar{x}_z, \quad (15)$$

где векторы  $\bar{f}_z$  получаются в ходе декомпозиции вектора весовых коэффициентов  $\bar{f}$  по аналогии с декомпозицией (8) и (9).

С целью учета условий (11) и (13) в ходе минимизации функции (14) перейдем к двойственной задаче по максимизации лагранжиана:

$$\min_x F = \max_{\lambda, \mu} L, \quad (16)$$

где

$$L = \sum_{z=1}^Z \bar{f}_z^t \bar{x}_z + \sum_{z=1}^Z \bar{\lambda}_z^t \left[ \bar{x}_z - \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z C_{zy} \bar{x}_y \right] + \sum_{z=1}^Z \bar{\mu}_z^t \left[ -E_z^t \bar{x}_z - \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z E_r^t \bar{x}_r + N + K - 1 \right], \quad (17)$$

$\bar{\lambda}$  и  $\bar{\mu}$  – векторы множителей Лагранжа.

Для решения сформулированной оптимизационной задачи используем метод целевой координации [6, 7], в рамках которого лагранжиан (17) с учетом тождеств

$$\sum_{z=1}^Z \bar{\lambda}_z^t \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq z}}^Z C_{zy} \bar{x}_y = \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z \bar{\lambda}_z^t C_{zy} \bar{x}_y$$

и

$$\sum_{z=1}^Z \bar{\mu}_z^t \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z E_r^t \bar{x}_r = \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z \bar{\mu}_z^t E_r^t \bar{x}_r$$

представим в виде

$$L = \sum_{z=1}^Z \bar{f}_z^t \bar{x}_z + \sum_{z=1}^Z \bar{\lambda}_z^t \bar{x}_z - \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z \bar{\lambda}_z^t C_{zy} \bar{x}_y + \sum_{z=1}^Z \bar{\mu}_z^t \left[ -E_z^t \bar{x}_z + N + K - 1 \right] - \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z \bar{\mu}_z^t E_r^t \bar{x}_r. \quad (18)$$

Тогда для фиксированных множителей Лагранжа ( $\bar{\lambda}^*$  и  $\bar{\mu}^*$ ), вычисляемых на втором уровне иерархии (рис. 1), выражение (18) может быть представлено в форме:

$$L = \sum_{z=1}^Z L_z; \quad (19)$$

$$L_z = \bar{f}_z^t \bar{x}_z + \bar{\lambda}_z^{*t} \bar{x}_z - \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z \left[ \bar{\lambda}_y^{*t} C_{yz} \right] \bar{x}_y$$

$$+ \bar{\mu}_z^{*t} \left[ -E_z^t \bar{x}_z + N + K - 1 \right] - \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z \bar{\mu}_r^{*t} \left[ E_z^t \bar{x}_z \right]. \quad (20)$$

Особенностью записи (20), определяющей задачи первого уровня иерархии для каждой TR (рис. 1), является то, что все искомые параметры зависят только от индекса  $z$ , что позволяет решать эти задачи независимо друг от друга, что значительно повышает масштабируемость получаемых решений.

На втором уровне (рис. 1), основной задачей которого является координация решений полученных на первом уровне с целью идентичного управления mesh-станциями, находящимися одновременно в разных TR, осуществляется модификация вектора множителей Лагранжа в ходе выполнения следующих градиентных процедур:

$$\bar{\lambda}_z(\alpha + 1) = \bar{\lambda}_z(\alpha) + \nabla \bar{\lambda}_z$$

$$\text{и } \bar{\mu}_z(\alpha + 1) = \bar{\mu}_z(\alpha) + \nabla \bar{\mu}_z, \quad (21)$$

где  $\nabla \bar{\lambda}_z$  и  $\nabla \bar{\mu}_z$  – градиент функции, который рассчитывается исходя из получаемых на верхнем уровне результатов решения задач распределения частотных каналов в каждой конкретной  $z$ -й TR ( $z \in Z$ ), т.е.

$$\nabla \bar{\lambda}_z(x) \Big|_{x=x^*} = \bar{x}_z^{*''} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z C_{zr} \cdot \bar{x}_r^{*''}$$

и

$$\nabla \bar{\mu}_z(x) \Big|_{x=x^*} = -E_z^t \bar{x}_z^* - \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z E_r^t \bar{x}_r^* + N + K - 1. \quad (22)$$

С учетом функциональной иерархии многоканальной mesh-сети вычислительная структура иерархическо-координационного метода распределения частотных каналов в ней представлена на рис. 2.

## Выводы

С целью повышения производительности и масштабируемости беспроводных сетей предложена декомпозиционная модель и иерархическо-координационный метод распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11х. В рамках предложенной модели обеспечивается согласованное решение частных задач распределения частотных каналов в mesh-сети: кластеризации, выделения РИ и закрепления за ними ЧК на mesh-станциях. Декомпозиционное представление предложенной модели позволило обеспечить относительную независимость при решении задач распределения ЧК по отдельным кластерам (зонам устойчивого приема), что напрямую связано с масштабируемостью получаемых решений.

Для расчета управляющих переменных, отвечающих за распределение ЧК в mesh-сетях, предло-

жен иерархическо-координационный метод, в основу которого положен принцип целевой координации, наиболее соответствующий технологическим и вычислительным особенностям решаемой задачи. Особенностью метода является введение структурной и функциональной иерархии mesh-станций. При

этом в рамках предложенного метода функции координатора сети достаточно примитивны, что способствует снижению его вычислительной загрузки и, как следствие, инерционности координации процесса распределения ЧК, осуществляемого в рамках отдельных TR.

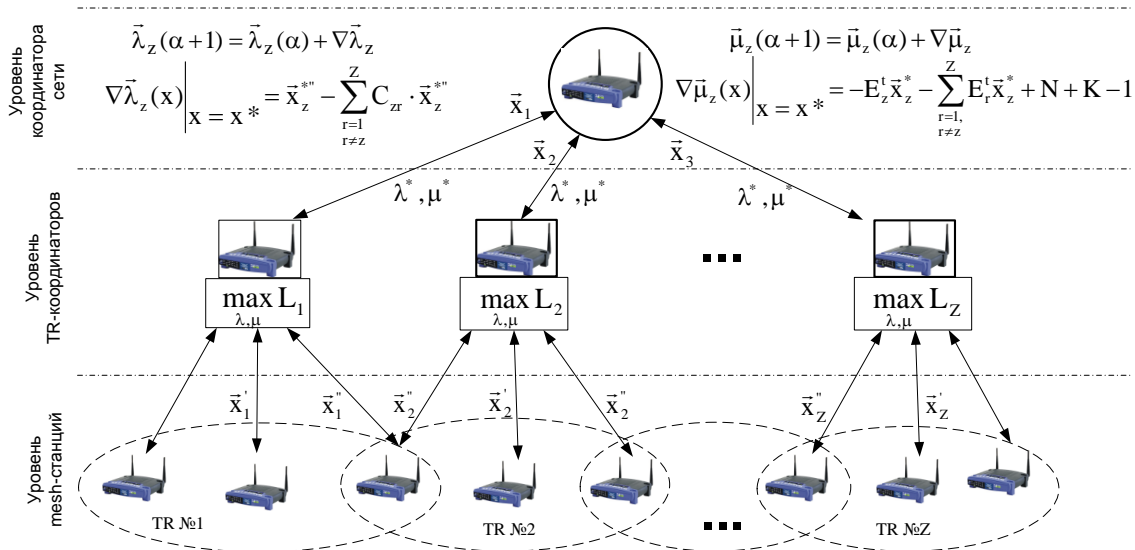


Рис. 2. Вычислительная структура иерархическо-координационного метода распределения ЧК

**Список литературы**

1. IEEE P802.11s/D2.0. Draft STANDARD for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Mesh Networking [Electronic resource] / IEEE Standards Activities Department. – [USA]: IEEE, 2008.
2. Ляхов А.И. Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности / А.И. Ляхов, И.А. Пустогаров, С.А. Шпилев // Информационные процессы. – 2008. – Том 8, № 3. – С. 173-192.
3. Лемешко А.В. Модель распределения частотных каналов с учетом территориальной удаленности станций в многоканальных mesh-сетях / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева, Д.В. Симоненко // Зб. наук. праць ХУПС. – X., 2009 – Вип. 4 (22). – С. 38-41.
4. Гоголева М.А. Обзор и классификация основных алгоритмов распределения частотных каналов в много-

- канальных mesh-сетях / М.А. Гоголева // Радиотехника: Всеукр. міжведомств. науч.-техн. сб. – X.: ХНУРЕ, 2009. – № 159. – С. 118-122.
5. Лемешко А.В. Трехиндексная математическая модель распределения частотных каналов в многоканальных MESH-сетях / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева // Збірник наукових праць НАУ ШПМЕ. ім. Г.С. Пухова. – К., 2009. – № 54. – С. 94-103.
6. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
7. Сингх М. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / М. Сингх, А. Титли. – М.: Машиностроение, 1986. – 494 с.

Поступила в редколлегию 26.01.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Поповский, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

**ІЄРАХІЧНО-КООРДИНАЦІЙНИЙ РОЗПОДІЛ ЧАСТОТНИХ КАНАЛІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ MESH-МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ IEEE 802.11x**

О.В. Лемешко, М.О. Гоголева

З метою підвищення продуктивності і масштабованості бездротових мереж запропонована декомпозиційна модель і ієрархічно-координаційний метод розподілу частотних каналів в багатоканальних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11x. У основу методу покладено принцип цільової координації, який найбільш відповідає технологічним і обчислювальним особливостям вирішуваної задачі.

**Ключові слова:** бездротова мережа, частотний канал.

**HIERARCHICAL-CO-ORDINATING DISTRIBUTING OF FREQUENCY CHANNELS IN MULTICHANNEL MESH-NETWORKS OF STANDARD OF IEEE 802.11x**

A.V. Lemeshko, M.A. Gogoleva

With the purpose of increase of the productivity and scaled of wireless networks a decomposition model and hierarchical-co-ordinating method of distributing of frequency channels is offered in the multichannel mesh-networks of standard of IEEE 802.11x. Principle of having a special purpose co-ordination, which most corresponds the technological and calculable features of the decided task, is fixed in basis of method.

**Keywords:** wireless network, frequency channel.