

УДК 621.391

МЕТОД СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ДОСТУПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ RADIO OVER FIBER



[А.А. ПЕРЕВЕРЗЕВ](#), [Д.В. АГЕЕВ](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract – Radio access network over fiber technology combines both wireless and fiber-optic technology. The advantages of this technology are low attenuation, bigger network bandwidth, easy installation and management, reduced power consumption, multiservice, dynamic allocation of resources. The article is devoted to solving the problem of wireless access network design, which is based on usage on distribution network level radio over fiber (RoF) technology. Features of this method is its complexity. This method solves the problem as a design Wireless network as the synthesis of the distribution network. To solve the problem made it decomposed into three sub-tasks: frequency-territorial planning a wireless network, the synthesis of the distribution network topology, routing and wavelengths assignment they. Paid attention to the fact that routing and wavelength assigning necessary to consider the phenomenon of four-wave mixing, which has a significant impact on the probability of bit errors in data traffic on the network. Therefore, the proposed solution method is a modification of a previously known method and takes into account the phenomenon of four-wave mixing.

Анотація – У статті запропоновано метод синтезу безпроводової мережі доступу з використанням технології радіо по волокну (RoF), який дозволяє комплексно розв'язувати задачі частотно-територіального планування, синтезу топології розподільчої мережі, вибору маршрутів і призначення їм довжин хвиль. Новим результатом є також метод вибору маршрутів та призначення їм довжин хвиль з урахуванням явища чотирехвильового змішування.

Аннотация – В статье предложен метод синтеза беспроводной сети доступа с использованием технологии радио по волокну (RoF), который позволяет комплексно решать задачи частотно-территориального планирования, синтеза топологии распределительной сети, выбора маршрутов и назначения им длин волн. Новым результатом является также метод выбора маршрутов и назначение им длин волн с учетом явления четырехволнового смешивания.

Введение

Одним из перспективных направлений развития современных сетей доступа является совместное использование беспроводных и оптических технологий. Преимущество таких сетей заключается в возможности использования лучших черт обеих технологий. Для беспроводных технологий – это мобильность, высокая скорость развертывания. Оптические технологии позволяют обойти такие ограничения беспроводных сетей как ограниченность частотного ресурса, проблемы электромагнитной совместимости и другие явления, связанные с особенностями распространения радиоволн.

Использование оптических сетей в качестве транспортной среды в сетях доступа позволяет обеспечить передачу радиосигналов между контроллером базовой стан-

ции (Base Station Controller, BSC) и удаленными антенными модулями (Remote Antenna Unit, RAU) с низким затуханием непосредственно на высокой частоте. Данная технология известна в международных источниках как радио по волокну (Radio over Fiber, RoF) [1, 2]. Беспроводная сеть радиодоступа при использовании технологии RoF содержит следующие составляющие: контроллер базовых станций, удаленные антенные модули, сеть на основе волоконно-оптических линий связи.

Основным управляющим элементом в сети радиодоступа на основе технологии RoF является BSC, которая содержит приемо-передающие и формирующие модули всех базовых станций, используемых в беспроводной сети (WiFi, GSM, WiMax). На модуль RAU возлагается функция излучения и прием радиосигнала, формирующего радиоканал между абонентом и сетью. Основными компонентами RAU являются: антенна, усилитель, электрооптический преобразователь (рис. 1).

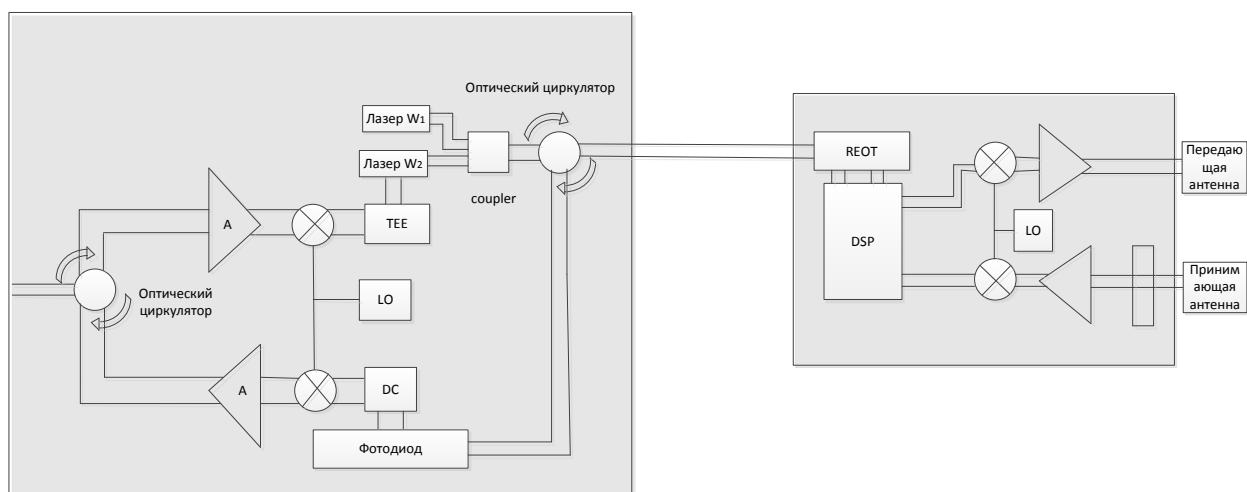


Рис. 1. Структурная схема RAU

На данный момент широкое распространение получили транспортные сети на основе технологии спектрального уплотнения каналов (Wavelength-division multiplexing, WDM), которые за счет передачи множества длин волн по одному волокну обладают большой пропускной способностью. Применение данной технологии в RoF позволяет повысить пропускную способность сети в целом, а также позволяет использовать существующие транспортные сети.

Беспроводные сети, построенные по технологии RoF, обладают преимуществом, связанным с высокой гибкостью и низкой стоимостью реконfigurирования сети (переход или добавления другой технологии), так как в этом случае изменения вносятся только в BSC (единственный, центральный элемент) и не затрагивают RAU в отличие от других сетей, где необходимо вносить изменения в конфигурацию каждой базовой станции.

I. Анализ литературных источников в направлении исследования

В последнее время наблюдается возрастание интереса как за рубежом, так и в Украине к исследованиям, направленным на изучение особенностей применения технологии RoF при построении гибридных беспроводных сетей радиодоступа и расширения его области применения.

Публикации в данном направлении можно поделить на следующие группы: решение задачи частотно – территориального планирования; методы модуляции частотного сигнала; методы уменьшения потребления мощности на RAU.

В работе [3] рассматривают метод решения задачи максимизации распределения трафика по сети радиодоступа на основе технологии RoF с учетом электромагнитной совместимости. Этот метод базируется на сведении решаемой задачи к задаче линейного программирования. Но этот метод возможно использовать только для фиксированного числа пользователей, так как при динамически изменяющемся числе абонентов размерность задачи значительно увеличивается.

Исследованиями, направленными на решение задач проектирования высокоскоростных беспроводных сетей связи с применением технологии RoF, занимаются ученые Национального технического университета Украины «КПИ», которые предложили способ нахождения полосы и количества частотных зон селективного преобразования в приемнике мобильного терминала транспортного средства. При этом учитывается минимально допустимая длина участка трассы, охватываемая одной сотой, и частотные ограничения по цифровой обработке сигналов. Кроме этого ими получен также ряд других результатов, таких как методика расчета древовидной оптической распределительной сети. К недостаткам предлагаемой ими сети можно отнести симплексный характер радиоканалов, что требует, для организации обратного канала, установки в абонентском узле оборудования WiMax [4]; отказ от преимуществ современных методов модуляции, например, механизмов адаптации к существующей помеховой обстановке, предусмотренной OFDM [5].

Несмотря на наличие большого количества публикаций, посвященных технологии RoF, недостаточно работ комплексного характера, в которых предлагались бы решение задачи структурного и параметрического синтеза беспроводной сети радиодоступа с применением технологии RoF, охватывающей решение задачи территориального частотного планирования и задачи выбора маршрутов и назначения длин волн (Routing and Wavelength Assignment).

На устранение данного недостатка направлена эта статья, в которой предложен новый метод параметрического синтеза сетей радиодоступа на основе технологии RoF. Главной особенностью данного метода является его комплексная направленность, которая позволяет совместно решать задачи частотно-территориального планирования, синтеза оптимальной топологии распределительной сети и задачи выбора маршрутов и назначения длин волн.

II. Предметная постановка задачи

Синтезируемая телекоммуникационная сеть согласно концепции NGN относится к сети доступа. Данная сеть состоит из следующих частей (рис.2):

- центральной базовой станции;
- оптической распределительной сети;
- удаленных антенных модулей (базовых станций).

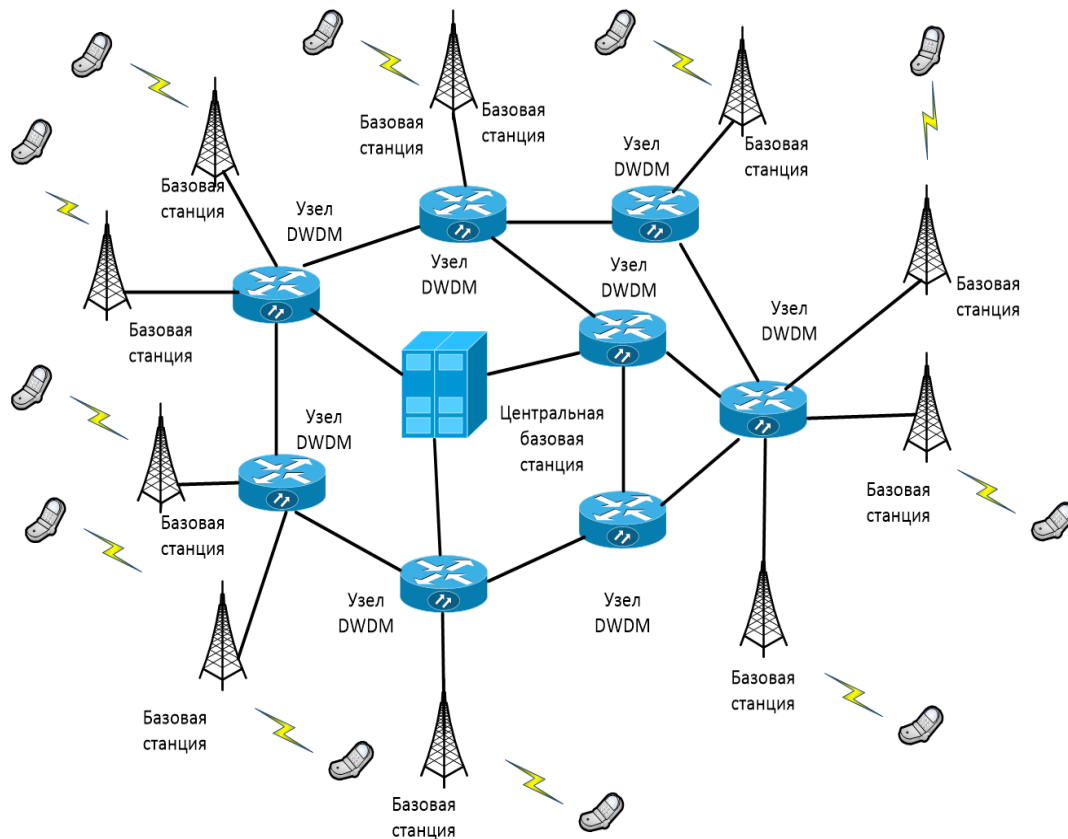


Рис. 2. Синтезируемая сеть доступа на основе технологии RoF

Данную задачу можно сформулировать следующим образом.

Задано:

$B = \{b_i\}$ – множество потенциальных мест установки базовых станций;

$R = \{r_i\}$ – множество потенциальных мест установки RAU;

$U = \{u_i\}$ – множество RAU, которые находятся в одной соте;

$N = \{n_i\}$ – множество узлов оптической WDM сети;

$\Lambda = \{\lambda_i\}$ – множество длин волн;

$D = \{d_{i,j}\}$ – матрица приведенных затрат на строительство линии связи между узлами сети.

При решении задачи необходимо выбрать места установки удаленных антенных модулей из конечного множества потенциальных мест, определить используемые частотные каналы и мощность передатчиков, синтезировать топологию распределительной сети, выбрать световые пути и назначить им длины волн.

III. Метод решения задачи

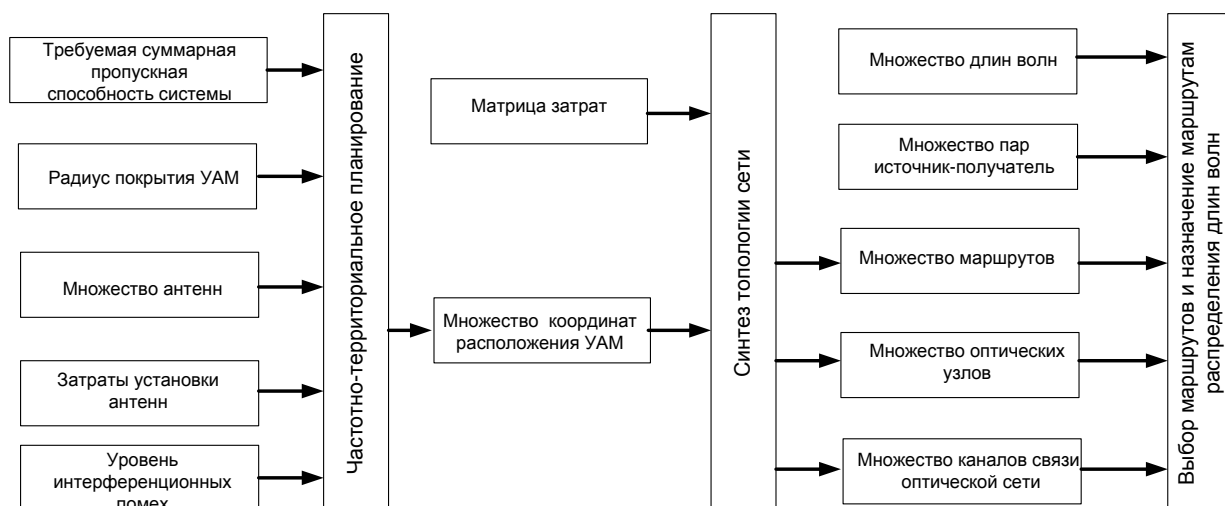
Синтез указанной сети в целом является сложной задачей. Поэтому в этой работе мы предлагаем метод решения данной задачи, который основан на декомпозиции ее на отдельные, связанные друг с другом подзадачи:

- частотно территориальное планирование;
- синтез топологии распределительной сети;
- выбор маршрутов и назначение маршрутам длин волн в оптической сети.

При решении задачи частотно территориального планирования производится синтез беспроводной сети радиодоступа, которая включает в себя выбор мест установки удаленных антенных модулей и выделение им частотных каналов. В ходе распределения частотных ресурсов необходимо учитывать плотность абонентов, зоны покрытия антенн, уровень сигнала и влияние интерференционных помех.

При синтезе топологии распределительной сети определяется топология сети с избыточной связностью, что связано с необходимостью наличия в сети альтернативных маршрутов; находится множество k - кратчайших маршрутов для каждой пары узлов сети источник-получатель. В случае модернизации существующей транспортной сети производится, при необходимости, установка дополнительных узлов; добавление дополнительных каналов связи и поиск k - кратчайших маршрутов в сети.

На рис. 2 представлена блок-схема метода синтеза сети радиодоступа на основе технологии RoF.



УАМ - Удаленный антенный модуль

Рис. 3. Блок-схема метода синтеза сети RoF

Метод подразумевает решение подзадач в определенной последовательности с использованием результатов решения одной из них как исходных данных для другой. Эти подзадачи решаются в следующей последовательности:

1. Решение задачи частотно-территориального планирования сети доступа. При этом данные о местоположении удаленных антенных модулей являются исходными данными для решения задачи синтеза топологии сети.

2. Решение задачи синтеза топологии. Найденная топология используется в качестве исходных данных для задачи выбора маршрутов и назначения длин волн в оптической сети (RWA).

3. Решение задачи выбора маршрутов и назначения маршрутам распределения длин волн в оптической сети (RWA).

Далее рассмотрим эти подзадачи более подробно.

IV. Метод решения задачи частотного территориального планирования

При решении задачи частотного территориального планирования вся территория разбивается на зоны, где в центре каждой зоны устанавливается тестовая точка TRX $a_i \in A$, заданная своими координатами. При этом качество обслуживания в данной зоне считается такой же, как в точке TRX. Места установки RAU задаются конечным множеством потенциальных мест $z_j \in Z$. При решении задачи необходимо определить места установки RAU как подмножество данного множества. Каждый устанавливаемый передатчик характеризуется частотным каналом $f_j \in F$, используемым для организации радиоканала и имеющим постоянную полосу W , мощностью P_z^f , излучаемой передатчиком, $P_z^f \in \{0, [P_z^{\min}, P_z^{\max}]\}$.

Для избегания активации взаимоисключающих передатчиков введем следующее условие:

$$\sum_{z \in G} y_z^f \leq 1, \quad z \in Z, f \in F,$$

где $G_i \subseteq Z, i = 1, \dots, |\zeta|$ – множество взаимоисключающих передатчиков, $\zeta = \{G_1, G_2, \dots, G_{|\zeta|}\}$.

Мощность сигнала $P_z^f(a)$, принимаемого в TRX a от передатчика z на частоте f , может быть определена как:

$$P_z^f(a) = \gamma_{az} \cdot P_z^f,$$

где $\gamma_{az} \in [0, 1]$ – суммарное затухание от передатчика z до TRX $a \in A$.

Введем обозначения:

$$y_a = \begin{cases} 1, & \text{если TRX } a \in A \text{ обслуживается сетью,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$y_z^f = \begin{cases} 1, & \text{если передатчик } z \in Z \text{ использует частоту } f, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$x_{az}^{fv} = \begin{cases} 1, & \text{если TRX } a \in A \text{ обслуживается передатчиком } z \in Z \\ & \text{на частоте } f \in F \text{ с использованием профиля } v \in V, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Беспроводная сеть доступа покрывает TRX, если отношение сигнал/помеха (SIR) выше определенного уровня μ . Данное требование на частоте f можно записать следующим образом:

$$\frac{\gamma_{a\beta} \cdot P_{\beta}^f}{\sum_{z \in Z \setminus \{\beta\}} \gamma_{az} \cdot P_z^f + N} \geq \mu, \quad (1)$$

где β – передатчик, обслуживающий TRX a ;
 N – уровень теплового шума.

Современные беспроводные сети поддерживают режим адаптивного выбора метода модуляции и метода помехоустойчивого кодирования. Комбинация метода модуляции и используемого помехоустойчивого кода называется профилем. Для каждого профиля $v \in V$ определена пара значений параметров $v = (\mu_v, \varphi_v)$, где μ_v – граничное значение SIR; φ_v – спектральная эффективность (бит/с·Гц). Тестовая точка $a \in A$ обслуживается, если хотя бы один передатчик z обслуживает a на частоте f с использованием профиля v . Что можно задать как:

$$y_a \leq \sum_{z \in Z} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} x_{az}^{fv}, \quad a \in A.$$

Если $x_{az}^{fv} = 1$ для некоторого $z \in Z$, $f \in F$, $v \in V$, то передатчик z должен быть активирован на частоте f :

$$x_{az}^{fv} \leq y_z^f \quad a \in A, z \in Z, f \in F, v \in V.$$

Условие соответствия требуемому уровню SIR можно записать в линейном виде для всех $a \in A$, $\beta \in Z$, $f \in F$, $v \in V$:

$$\gamma_{a\beta} \cdot P_{\beta}^f - \mu_v \sum_{z \in Z \setminus \{\beta\}} a_{az} \cdot P_z^f + M \cdot (1 - x_{a\beta}^{fv}) \geq \mu_v \cdot N,$$

где M – некоторая большая константа.

Когда TRX a покрывается сетью, то есть $x_{az}^{fv} = 1$, потребляемый трафик h_a занимает часть пропускной способности W частотного канала f . Суммарная полоса частот, требуемая для обслуживания потребляемого трафика, не должна превышать пропускную способность канала связи:

$$\sum_{a \in A} \sum_{v \in V} h_a \cdot \frac{1}{\varphi_v} \cdot x_{az}^{fv} < W, \quad z \in Z, f \in F.$$

В случае, если передатчик не активен, то есть $y_z^f = 0$ на частоте f , то излучаемая мощность равна нулю. Это условие задается неравенствами:

$$\begin{aligned} P_z^f &\geq y_z^f \cdot P_z^{\min}, \quad z \in Z, f \in F, \\ P_z^f &\leq y_z^f \cdot P_z^{\max}, \quad z \in Z, f \in F. \end{aligned}$$

Критерием оптимальности является максимум прибыли оператора связи, определяемый целевой функцией:

$$\sum_{a \in A} e_a \cdot y_a - \sum_{z \in Z} \sum_{f \in F} c_z \cdot y_z^f \rightarrow \max,$$

где c_z – стоимость монтажа и активации передатчика z ;

e_a – доход, получаемый оператором в случае предоставления услуг в TRX a .

Для решения поставленной задачи смешанного целочисленного линейного программирования предлагается использовать пакеты математического моделирования и расчета, например, такие как CPLEX. После решения задачи частотного планирования получим множество мест положения RAU, которые являются исходными данными для метода синтеза топологии сети.

V. Метод синтеза топологии распределительной сети

При синтезе топологии распределительной сети определяются волоконо-оптические линии связи, строительство которых необходимо для обеспечения связности сети. Топология сети должна иметь избыточную связность и содержать альтернативные маршруты для каждой пары узлов источник-получатель. Последнее условие обеспечивается за счет задания коэффициента связности сети, равного трем. Исходными данными для этой задачи являются:

$Z = \{z_i\}$ – множество узлов сети, которое соответствует объединению множеств узлов, где установлены RAU и множества транзитных узлов, где устанавливаются оптические кроссконнекторы;

$D = \|d_{ij}\|$ – матрица стоимости строительства волоконно-оптических линий связи.

Критерием оптимальности является минимум стоимости сети

$$\sum_{e'_{ij} \in E'} d_{ij} \rightarrow \min,$$

где $E' = \{e'_{ij}\}$ – множество ребер графа, описывающего результирующую топологию сети.

Для решения данной задачи используется метод, в основе которого лежит алгоритм М-структур [6]. В основе разработанного алгоритма лежат следующие идеи: первоначально на множестве всех узлов строят кратчайшее связное дерево, которое далее преобразуется в избыточную структуру заданной связности M_0 . Затем оптимизируют

начальную структуру M_0 по критерию минимума стоимости. Особенность модификации метода М-структур состоит в том, что на стадии доведения начальной структуры ТКС до требуемой величины связности производится замена процедуры нахождения цикла минимальной длины на процедуру нахождения КСД, соединяющего висящие вершины. Сложность алгоритма решения, в последнем случае, стала пропорциональна квадрату количества вершин графа.

После синтеза топологии сети необходимо производить поиск множества кратчайших маршрутов, однако при выборе маршрутов необходимо учитывать условие равномерности использования каналов связи, чтобы избежать большого числа узких мест в сети. Для этого используется алгоритм Йена [7]. Полученная данным методом топология сети и множество маршрутов используются в качестве исходных данных для решения следующей подзадачи.

VI. Метод выбора маршрутов и назначение маршрутам длин волн в оптической сети

Оптическая сеть связывает удаленные антенные модули с базовым контроллером и используется как транспортная сеть для передачи радиосигнала по волокну. Оптическая сеть строится по технологии WDM.

Передача информации в WDM-сетях производится вдоль световых путей. Под световым путем будем понимать последовательность оптических каналов, которые используются для передачи потока от источника к получателю на одной и той же длине волны. Указанное ограничение на использование одной длины волны вдоль всего пути может привести к уменьшению количества установленных соединений и неэффективному использованию имеющихся длин волн. Таким образом, задача выбора маршрутов и назначения длин волн в сетях WDM является важной.

При решении задачи распределения длин волн в оптических сетях (задача RWA) применяются различные методы. Один из таких методов, который гарантированно найдет глобальный оптимум, решающий данную задачу как задачу целочисленного линейного программирования, рассмотрен в работах [8, 9].

При передаче оптических сигналов в WDM сетях возникает нелинейное явление четырехволнового смешивания (ЧВС), что повышает уровень битовых ошибок (Bit Error Rate, BER). На рис 4. показана зависимость количества установленных соединений и значение Q фактора.

Значение Q фактора, используемое при построении графической зависимости, принималось равным минимальному его значению по всем установленным в сети соединениям. При этом в дальнейшем при построении графической зависимости отбрасывались соединения (освобождались длины волн) с наихудшими значениями Q-фактора.

Анализ полученной зависимости свидетельствует о наличии заметной зависимости между количеством устанавливаемых соединений и качеством передачи трафика в сети. Таким образом, можно сделать заключение, что при выборе маршрутов и назначении длин волн для установки соединения необходимо учитывать явление ЧВС.

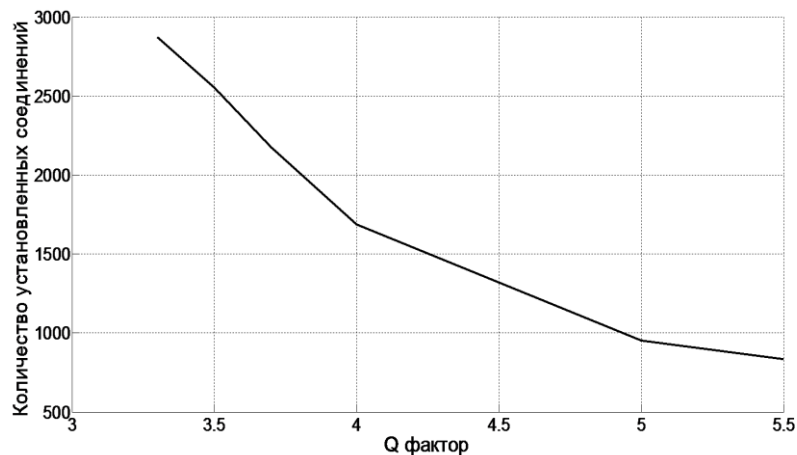


Рис. 4. Зависимость количества установленных соединений от Q фактора

Введем переменную отображающую использования длин волн в оптоволокне

$$x_{kl}^{\lambda} = \begin{cases} 1, & \text{если при } k \text{ соединении используется } \lambda \text{ длина волны в } l \text{ волокне;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Для передачи потока между источником и получателем может использоваться только одна длина волны из набора допустимых длин волн. Это условие имеет следующий вид:

$$\sum_{\lambda \in \Lambda} x_k^{\lambda} = x_k, \lambda \in \Lambda,$$

где $x_k^{\lambda} = \begin{cases} 1, & \text{если при } k \text{ соединении используется } \lambda \text{ длина волны;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

$$x^{\lambda} \geq x_k^{\lambda}, \lambda \in \Lambda, k \in K,$$

где $x^{\lambda} = \begin{cases} 1, & \text{если используется } \lambda \text{ длина волны;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

Условие того, что в любом оптическом канале связи не будет использоваться одна и та же длина волны для передачи разных информационных потоков, имеет следующий вид:

$$\sum_{k \in K} x_{kl}^{\lambda} \leq x^{\lambda}, l \in L, \lambda \in \Lambda.$$

Условия связности сети и существования пути без циклов для передачи потоков на каждой из используемых длин волн описываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum_{l \in \omega(v_i)} x_{kl}^{\lambda} &= x_k^{\lambda}, \lambda \in \Lambda, k \in K, v_i \in \{s_k, d_k\}, \\ \sum_{l \in \omega(v_i)} x_{kl}^{\lambda} &\leq 2x_k^{\lambda}, \lambda \in \Lambda, k \in K, v_i \in V \setminus \{s_k, d_k\}, \\ \sum_{l^1 \in \omega(v_i), l^1 \neq l} x_{kl^1}^{\lambda} &\geq x_{kl}^{\lambda}, \lambda \in \Lambda, k \in K, v_i \in V \setminus \{s_k, d_k\}. \end{aligned}$$

Условие того, что для пар источник-получатель будет использоваться только один маршрут:

$$\sum_{p \in P_k} x_{kp}^\lambda = x_k^\lambda, \lambda \in \Lambda, k \in K,$$

где $x_{kp}^\lambda = \begin{cases} 1, & \text{если при } k \text{ соединении используется } \lambda \text{ длина волны;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

Ограничение, используемое для уменьшения количества переменных x_{kl}^λ :

$$x_{kl}^\lambda = \sum_{\pi \in \Pi_k} b_{l\pi} x_{k\pi}^\lambda = x_k^\lambda, \lambda \in \Lambda, k \in K, l \in L.$$

Критерием оптимальности является минимум стоимости. В этом случае целевая функция, которая учитывает стоимость использования и прокладки оптоволоконных линий, имеет вид:

$$Z = \sum_{k \in K} \sum_{\lambda \in \Lambda} C_\lambda \cdot x_{ke}^\lambda + \sum_{e \in E} C_e \cdot y_e \rightarrow \min,$$

где C_λ – стоимость использования пропускной способности,

C_e – стоимость прокладки волоконно-оптической линии,

$y_e = \begin{cases} 1, & \text{если используется } e \text{ канал связи;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

Для учета явления четырехволнового смешивания введем ограничение на мощность входного сигнала в волокне WDM сети. Из работы [10] получим значение допустимого предела мощности появления четырехволнового смешивания, суммарной от мощности накачки. Однако необходимо получить граничное значение в виде мощности входного сигнала. В работе [11] приведена формула зависимости мощности накачки от суммарной мощности сигнала:

$$P_p = P_{вх} \cdot G / E_q,$$

где P_p – мощность накачки, $P_{вх}$ – входная мощность сигнала, G – коэффициент усиления усилителя, E_q – квантовая эффективность излучателя.

Следовательно, допустимое значение мощности будет иметь вид

$$P_d = P_p \cdot E_q / G$$

Ограничение на суммарную мощность входного сигнала:

$$\sum_{k \in K} \sum_{\lambda \in \Lambda} P_0 \cdot \alpha_p \cdot L_e \cdot \alpha_e \cdot x_{ke}^\lambda \leq P_d,$$

где k – соединение между парой источник-получатель; λ – длина волны; e – канал связи; P_0 – входная мощность сигнала; L_e – длина волокна; α_e – затухание в волокне; α_p – затухание, вносимое оптическими разъемами.

Введем ограничение на использование частотного плана с расстоянием между частотами длин волн в 100 ГГц:

$$M \cdot y_e \geq \sum_{k \in K} \sum_{\lambda \in \Lambda} x_{k\lambda}^e, e \in E,$$

где M – количество каналов частотного плана.

При исследовании эффективности метода выбора маршрутов и назначения длин волн проводился синтез сети ранее известным методом без учета четырехволнового смешивания и предложенным в работе методом при разном допустимом значении Q-фактора. Результат эксперимента в виде графической зависимости, связывающей значение Q-фактора и количество установленных в сети соединений, представлен на рис. 5.

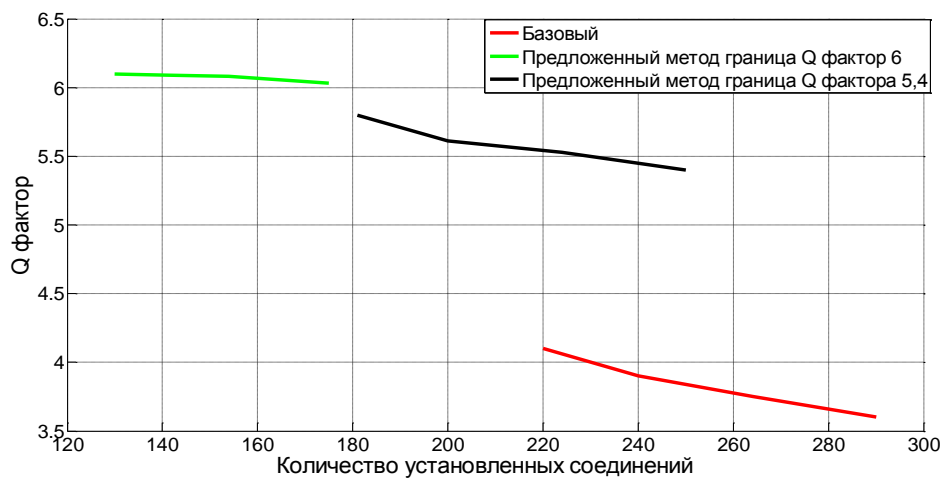


Рис. 5. Зависимость значения Q фактора от количества установленных соединений

Анализ результатов эксперимента показывает, что предлагаемый в работе метод с учетом четырехволнового смешивания позволяет решить задачу выбора маршрутов и назначения длин волн. При этом количество установленных соединений уменьшается, но гарантируется допустимое значение Q-фактора.

Исследование данного метода показало, что при увеличении количества узлов сети значительно возрастает число ограничений (так называемое явление комбинаторного взрыва), что в свою очередь приводит к возрастанию вычислительной сложности решения задачи. В данной ситуации это ограничение можно обойти за счет применения эвристических алгоритмов, таких как Табу-поиск [12, 13], алгоритм отжига [14] или генетических алгоритмов [15, 16].

К эвристическим методам решения задачи RWA относится также метод пчелиной колонии (BCO-RWA) [17], в основе которого лежит моделирование поведения пчел в процессе сбора нектара. Главным достоинством этого алгоритма является невысокая вычислительная сложность. В работе [18] проведен сравнительный анализ применения метода пчелиной колонии, генетического и итерационного алгоритмов. Метод пчелиных колоний лучше остальных продемонстрировал способность выходить из локальных оптимумов за счет использования случайного поиска. С увеличе-

нием числа вершин преимущество пчелиного алгоритма перед вышеперечисленными алгоритмами увеличивается. Основываясь на методе [17] в работе [19] предложена модификация этого метода, которая позволила учесть явление четырехволнового смешивания и возможность установки нескольких оптических конверторов.

Выводы

Разрабатываемая сейчас технология радио по волокну является перспективным решением в условиях бурного развития беспроводных сетей доступа, особенно при внедрении микро- и пико-сотовых сетей, а также беспроводных сетей кампуса. Однако, несмотря на большое количество публикаций в данном направлении, на данный момент отсутствуют работы комплексного характера, позволяющие совместно решать задачи планирования как беспроводных сетей, так и распределительных сетей с использованием технологий RoF и WDM.

В статье предложен метод синтеза беспроводной сети доступа на основе технологии RoF. Новизна метода заключается в комплексном характере данного метода, который позволяет совместно решать задачи частотно-территориального планирования, синтеза топологии распределительной сети, выбора маршрутов и назначения им длин волн. В основе предлагаемого метода лежит его декомпозиция на частные подзадачи решаемые последовательно с использованием результатов решения одной из них как исходных данных для другой.

При решении задачи выбора маршрутов и назначения им длин волн необходимо учитывать явление четырехволнового смешивания, которое оказывает заметное влияние на качество передачи информации в сетях WDM (увеличивает вероятность битовой ошибки). Без учета данного явления методы выбора маршрутов и назначения им длин волн обеспечивают установку соединений, но количество каналов с удовлетворительным значением вероятности битовой ошибки на много меньше.

Новым результатом, можно считать, предложенный в статье метод решения задачи выбора маршрутов и назначения им длин волн с учетом влияния нелинейного явления четырехволнового смешивания, что позволило повысить качество передачи по параметру Q фактор на 2,5 единицы, а соответственно уменьшить вероятность битовой ошибки.

Список литературы:

1. Lethien C., Csornyei M., Stohr A., Iezekiel S. Radio-over-fiber transport for the support of wireless broadband services // Journal of Optical Networking. – 2009. – Vol. 8, No. 2. – P. 156.
2. Koonen A.M., Larrodé G.M., Ng'oma A., Wang K., Yang H., Zheng Y., Tangdionga E. Perspectives of Radio over Fiber Technologies // Optical Fiber Communication Conference. San Diego, California United States, 2008. – P. 1 – 3.

3. *Klinkowski M., Jaworski M., Careglia D.* Channel Allocation in Dense Wavelength Division Multiplexing Radio-over-Fiber Networks // 12th International Conference on Transparent Optical Networks. Munich, Germany, 2010. – P. 1 – 5.
4. *Буртовый С.С.* Расчет топологии распределительной части интерактивной гетерогенной телекоммуникационной сети [Электронный ресурс] / С.С. Буртовый, К.С. Сундучков, А.А. Голик // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 76 – 87. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_sunduchkov_topology.pdf.
5. *Ящук А.С.* Полоса и количество частотных зон селективного преобразования в приемнике мобильного терминала [Электронный ресурс] / А.С. Ящук, К.С. Сундучков, С.Э. Волков // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 3 (8). – С. 86 – 93. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_iashuk_ofdm.pdf.
6. *Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В.* Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техника, 1986. – 168 с.
7. *Jin Y. Yen* Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network // Management Science. – 1971. – Vol. 17, No. 11. – P. 712 – 716.
8. *Banerjee D., Mukherjee B.* Wavelength Routed Optical Networks Linear formulation resource budgeting tradeoff and a reconfiguration study // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2000. – Vol. 8, No 5. – P. 684 – 696.
9. *Sridharan M., Salapaka M.V., Somani A.K.* A practical approach to operating survivable WDM networks // IEEE Journal on Selected Areas of Communications. – 2002. – Vol. 20, No 1. – P. 34 – 36.
10. *Baroni S., Bayvel P., Gibbens R.J.* On the number of wavelengths in arbitrarily-connected wavelength-routed optical networks // Optical Society of America/TOPS. – 1998. – P. 195 – 204.
11. *Каминецкий И.С.* Применение теории графов для оптимизации распределения длин волн в ВОСП СР // Труды учебных заведений связи. – 2004. – № 171. – С. 48 – 60.
12. *Morley G.D., Grover W.D.* Tabu search optimisation of optical ring transport network // Proceeding of IEEE Globecom'01. San Antonio. – 2001. – Vol. 4, No 1. – P. 2160 – 2164.
13. *Grosso A., Leonardi E., Mellia M., Nucci A.* Logical Topology Design over WDM wavelength routed networks robust to traffic uncertainties // IEEE Communication Letters. – 2001. – Vol. 5, No 4. – P. 172 – 174.
14. *Mukherjee B., Banerjee D., Mukherjee A.* Some Principles of designing a wide-area WDM optical network // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1995. – Vol. 5, No 5. – P. 489 – 500.
15. *Ali M., Ramamurthy B., Deogun J.S.* Routing algorithms for all-optical networks with power consideration: The unicast case // Proceeding of the 8th IEEE ICCCN'99. Boston-Natick MA, 1999. – P. 335 – 340.
16. *Sheu S.T., Chuang Y.R., Cheng Y. J., Tseng H.W.* A Novel optical IP Router Architecture for WDM networks // Proceeding of 15th International Conference on Information Networking, 2001. – P. 335 – 340.
17. *Teodorović D.* Bee Colony Optimization (BCO) // Swarm Intelligence for Knowledge-Based Systems. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2009. – P. 39 – 60.
18. *Курейчик В.М., Кажаров А.А.* Использование пчелиных алгоритмов для решения комбинаторных задач // Искусственный интеллект. – 2010. – № 3. – С. 583 – 589.
19. *Pereverzev A., Ageyev D. V.* Radio over Fiber Networks Synthesis Using Meta-Heuristic BCO // Communications. – 2013. – Vol. 1, № 1. – P. 9 – 15.