

УДК 621.391

Модель оптической транспортной сети на основе выделенного спектрального ресурса

A model of an optical transport network based on a dedicated spectral resource

Ясинский / Yasinskii S.

Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.
ЗАО "Институт телекоммуникаций",
ведущий специалист.
г. Санкт-Петербург

Бойко/ Воуко А.

Алексей Павлович
(varenyxa89@gmail.com)

кандидат технических наук, доцент.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени
Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ
(ВАС им. С. М. Буденного),
докторант кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Одоевский / Odoevskii S.

Сергей Михайлович
(odse2017@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.
ВАС им С. М. Буденного,
профессор кафедры сетей связи и систем
коммутации.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: оптические транспортные сети – optical transport networks; выделенный спектральный ресурс – allocated spectral resource; световой путь – light path; гибкие оптические сети – elastic optical networks.

Развитие технологий гибких оптических сетей побуждает современных операторов связи перестраивать архитектуру своих транспортных сетей с целью повышения эффективности использования спектрального ресурса в оптических волокнах. В статье представлена модель оптической транспортной сети, формируемая на основе ограниченного спектрального ресурса линий. Использование модели позволит решить ряд задач анализа и синтеза с использованием различных методов оптимизации.

The development of flexible optical network technology encourages modern telecom operators to rebuild the architecture of their transport networks in order to increase the efficiency of using the spectral resource in optical fibers. The article presents a model of an optical transport network formed on the basis of a limited spectral resource. Using the model will allow solving a number of problems of analysis and synthesis using various optimization methods.

Введение

В России в соответствии с принятыми стандартами сети Единой сети электросвязи разделяются по функциональному признаку на сети доступа и транспортные сети [1]. Под транспортной сетью связи принято понимать совокупность ресурсов систем передачи (каналов, трактов, секций или участков передачи), относящихся к ним средств контроля, оперативного переключения, резервирования и управления, предназначенных для переноса информации между заданными пунктами [2].

Под оптической транспортной сетью чаще всего понимаются сети на основе транспортных технологий связи, использующие в качестве среды распространения сигналов оптическое волокно. Современные оптические транспортные сети крупных операторов связи формируются в новом технологическом базисе на основе технологий эластичных (гибких) оптических сетей [3–5]. Таким сетям свойственно наиболее эффективное использование спектрального ресурса оптических волокон в условиях динамического изменения потребностей передачи трафика в информационных направлениях.

Оптическая транспортная сеть на основе выделенного спектрального ресурса (ОТС ВСР) – это оптическая транспортная сеть, сформированная на основе волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением каналов, в которой для передачи оптических сигналов доступны специально отведённые диапазоны частот (длин волн). Под спектральным ресурсом понимается множество диапазонов частот, доступных для передачи оптических сигналов.

Для проведения исследований и экспериментов с целью получения информации о важнейших свойствах ОТС ВСР необходима разработка её математической модели [6].

Общая модель оптической транспортной сети в виде графа

Модель ОТС ВСР можно представить в виде неориентированного графа $G(A, E, S)$, где: $A = \{a_i\}, i = \overline{1, N}$ – множество вершин графа, соответствующих узлам ОТС ВСР и реализуемых оптическими транспондерами с перестраиваемыми форматами сигналов BVT (Bandwidth-Variable Transponder) и реконфигурируемыми оптическими мультиплексорами ввода/вывода ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer); $E = \{e_{ij}\}, i \neq j, i, j = \overline{1, N}$ – множество ребер графа, соответствующих волоконно-оптиче-

ским линиям связи (ВОЛС) между узлами ОТС ВСР; $S = \{s_{ij}\}$ – выделенный спектральный ресурс сети, при этом каждый элемент $s_{ij} \in S$ ставится в соответствие ребру $e_{ij} \in E$ и представляет собой множество элементарных частотных интервалов (ЭЧИ) доступное для передачи оптических сигналов в данной ВОЛС.

Каждому узлу сети $a_i \in A$ поставлен в соответствие кортеж $\langle {}^*b_i^v, p_i, \alpha_i^v \rangle, v = \overline{1, V}$, где: ${}^*b_i^v$ – множество доступных для формирования в i -м узле ОТС ВСР, характеризуемых скоростью передачи (в Гбит/с), а также видом модуляции и/или типом сигнала (*); p_i – количество доступных в i -м узле направлений для распределения световых потоков, определяемое степенью применяемого на узле ROADM; α_i^v – потери, вносимые i -м узлом при прохождении через него оптического сигнала. На графе определяется множество соответствующих пар узлов (КПУ) $Z = \{z_m\}, z_m = (a_{im}, a_{jm}), m = \overline{1, M}$, между которыми необходимо сформировать цифровые каналы передачи заданного качества со скоростями $B^{mp} = \{b_m^{mp}\}, m = \overline{1, M}$ в Гбит/с.

ВОЛС ОТС ВСР в общем виде можно представить совокупностью элементарных кабельных участков (ЭКУ), являющихся пассивной частью оптических сетей связи, и активного оборудования между ними – оптическими усилителями. Компенсаторы хроматической дисперсии (КХД) представляют собой пассивные устройства, предназначенные для исправления формы

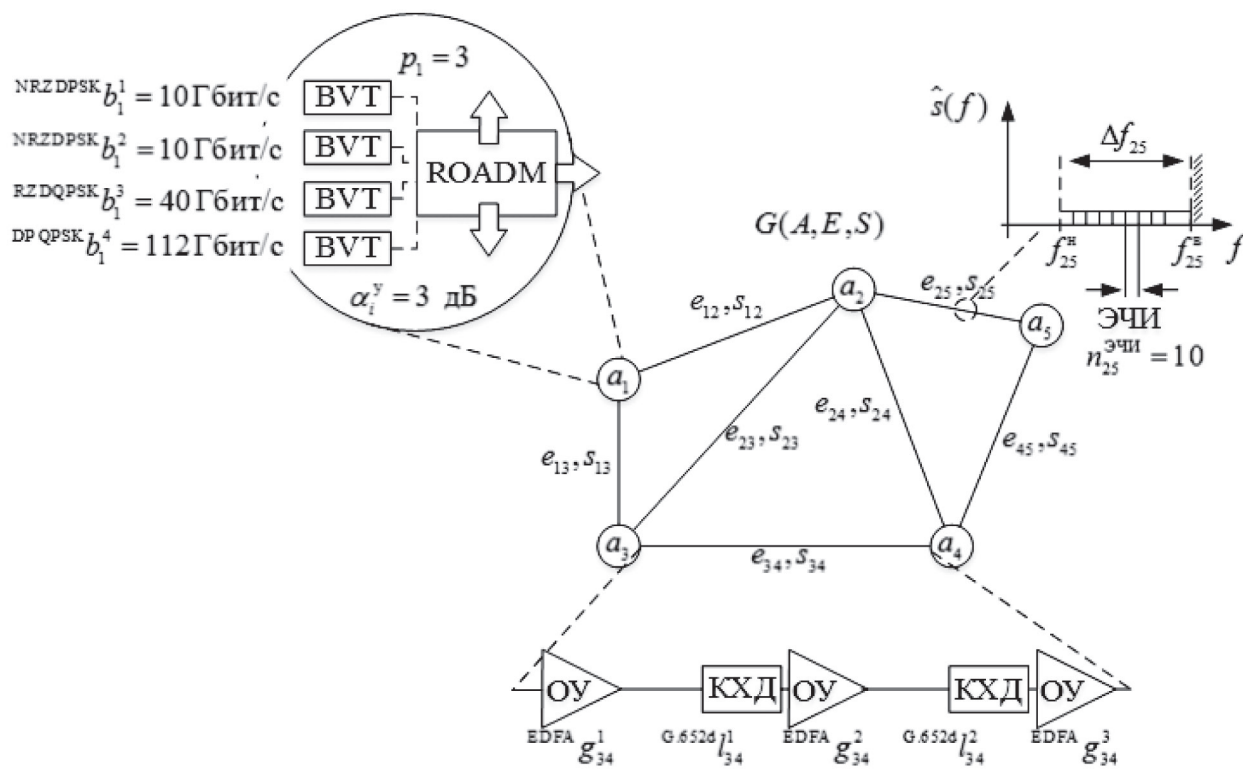


Рис. 1. Оптическая транспортная сеть на основе выделенного спектрального ресурса

оптических сигналов, и также входят в состав ЭКУ. В данной модели передающий и приемный оптические усилители относятся к ВОЛС. Каждому ребру графа $e_{ij} \in E$ поставлен в соответствие кортеж, отражающий структуру ВОЛС между i -м и j -м узлами:

$$\varphi(e_{ij}) = \langle **g_{ij}^1, ***l_{\text{ЭКУ } ij}^1, **g_{ij}^2, ***l_{\text{ЭКУ } ij}^2, \dots, ***l_{\text{ЭКУ } ij}^t, **g_{ij}^{t+1} \rangle, t \in \overline{1, T},$$

где: $**g_{ij}^t$ – оптические усилители (**) типа (эрбиевые оптические усилители EDFA, Рамановские усилители, усилители с удаленной накачкой и др.); $***l_{\text{ЭКУ } ij}^t$ – ЭКУ на основе оптических волокон (***) типа (G.652, G.653, G.654, G.655, G.656, G.657 и др.).

Выделенный спектральный ресурс сети представляет собой множество поддиапазонов частот, доступных для передачи оптических сигналов, каждый из которых представляет собой множество ЭЧИ шириной 12.5 ГГц и значениями граничных частот, определяемыми выражением [7]: $193.1 + n \cdot 0.00625$ (ТГц), где $n \in \mathbb{Z}$. Каждому элементу $s_{ij} \in S$ соответствует кортеж $\langle n_{ij}^{\text{ЭЧИ}}, f_{ij}^n, f_{ij}^b \rangle$, где: $n_{ij}^{\text{ЭЧИ}}$ – количество ЭЧИ; f_{ij}^n, f_{ij}^b – соответственно значения нижней и верхней граничных частот. В случае разделения выделяемого в ВОЛС спектрального ресурса на несколько поддиапазонов, элементам кортежа могут быть присвоены дополнительные индексы, а их число увеличено, например $\langle n_{ij}^{\text{ЭЧИ}1}, f_{ij}^{n1}, f_{ij}^{b1}, n_{ij}^{\text{ЭЧИ}2}, f_{ij}^{n2}, f_{ij}^{b2}, \dots, n_{ij}^{\text{ЭЧИ}k}, f_{ij}^{nk}, f_{ij}^{bk} \rangle$, где k – число поддиапазонов. Таким образом, ширина k -го поддиапазона частот Δf_{ij}^k может быть вычислена с помощью выражения: $\Delta f_{ij}^k = f_{ij}^{bk} - f_{ij}^{nk} = n_{ij}^{\text{ЭЧИ}k} \cdot 12.5$ (ГГц). На рис. 1 изображена ОТС ВСП с учётом введенных обозначений.

Модель светового пути для формирования высокоскоростных цифровых каналов передачи

Формирование высокоскоростных цифровых каналов передачи между КПУ осуществляется на основе световых путей. Под световым путем будем понимать совокупность смежных ЭЧИ в последовательности ВОЛС, обеспечивающих распространение оптического сигнала в заданной полосе частот между двумя узлами без оптико-электрооптического преобразования. Более строго световой путь LP_{ij} из a_i в a_j определяется как упорядоченная последовательность ВОЛС $(e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_j})$, начинающаяся в узле a_i , заканчивающаяся в узле a_j и не проходящая через один и тот же узел ОТС ВСП дважды, причем каждые две соседних ВОЛС имеют общий узел подключения, и в каждой ВОЛС выделен одинаковый набор смежных ЭЧИ в диапазоне $f_{LP_{ij}}^n \dots f_{LP_{ij}}^b$, где $f_{LP_{ij}}^n$ и $f_{LP_{ij}}^b$ – соответственно нижняя и верхняя границы частот светового пути LP_{ij} . Ширина светового пути $\Delta f_{LP_{ij}}$ может быть вычислена с помощью выражения: $\Delta f_{LP_{ij}} = f_{LP_{ij}}^b - f_{LP_{ij}}^n$.

Так же, как и ширина поддиапазона частот, доступных для передачи оптических сигналов, ширина светового пути может быть указана в количестве ЭЧИ:

$$n_{ij}^{\text{ЭЧИ}k} = \frac{\Delta f_{LP_{ij}}^k (\text{ГГц})}{12.5}. \text{ Множество всех световых путей из } a_i \text{ в } a_j \text{ будем индексировать } k. \text{ Тогда подмножества ВОЛС и узлов, через которые проходит } k\text{-й световой путь, соответственно можно обозначить как } E_{ij}^k \text{ и } A_{ij}^k, \text{ а диапазон используемых частот – как } \{f_{LP_{ij}}^{nk}, f_{LP_{ij}}^{bk}\}.$$

При проектировании и в процессе эксплуатации ОТС ВСП одновременно решаются следующие задачи:

- выбора вида модуляции и/или типа сигнала в оптических транспондерах в зависимости от требуемых скоростей передачи в цифровых каналах B^{TP} ;
- выбора оптимальных (в определённом смысле) световых путей между корреспондирующими узлами из множества допустимых.

Множество допустимых световых путей $LP_{ij}^{\text{Д}}$ формируется на основе требуемого отношения мощности оптического сигнала к мощности шума в заданной полосе пропускания $OSNR^{\text{T}}$ (Optical Signal-to-Noise Ratio) для выбранного вида сигнала, при котором достигается заданное значение коэффициента ошибок по битам (КОБ). Световой путь считается допустимым для передачи сигнала b_i^v между узлами a_i и a_j , если $OSNR_{\text{вх } j}$ на входе j -го узла не меньше $OSNR^{\text{T}} + A_s$, где $A_s \cong 3 \dots 5$ дБ – запас по $OSNR$.

Таким образом, множество световых путей $LP_{ij}^{\text{Д}}(b_i^v)$, допустимых для передачи сигнала b_i^v между узлами a_i и a_j – это совокупность таких световых путей, которые обеспечивают передачу оптических сигналов с $OSNR_{\text{вх } j}$ не хуже требуемого (с запасом) $OSNR^{\text{T}} + A_s$:

$$LP_{ij}^{\text{Д}}(b_i^v) = \{LP_{ij}^k | OSNR_{\text{вх } j}(LP_{ij}^k) \geq OSNR_{\text{вх } j}^{\text{Т}}\}, k = \overline{1, N_{\text{Д}}}$$

где $N_{\text{Д}}$ – количество допустимых световых путей.

Значение $OSNR$ в световом пути может быть измерено или вычислено. Существуют внеполосные и внутриволосные методы измерения. Внеполосные методы измерения не дают информации о фактическом шуме, присутствующем в полосе частот светового пути, так как линейные оптические фильтры ROADM подавляют шум между световыми путями.

В работе [8] показано, что при измерении $OSNR$ в сетях на основе ROADM только метод на основе разделения оптического сигнала по поляризации OPS (Optical Polarization Splitting) позволяет получить истинное значение.

Для вычисления $OSNR$ в световом пути существует множество математических моделей [9–13], отличающихся сложностью и точностью. Наиболее сложные модели позволяют учесть нелинейные эффекты в сложных ВОЛС с компенсаторами хроматической дисперсии и оптическими усилителями различного типа. Зная характеристики элементов, принадлежащих световому пути: шум-фактор и усиление

оптических усилителей, дисперсию и затухание ЭКУ, потери, вносимые ROADMs в узлах сети, через которые осуществляется транзит, можно получить теоретическое значение OSNR на выходе светового пути.

Предлагаемые варианты постановки задачи поиска световых путей для формирования высокоскоростных цифровых каналов передачи

На основе представленной модели возможно решение множества задач анализа и синтеза ОТС ВСР с использованием различных методов оптимизации [14–15]. При решении задачи поиска световых путей возможны следующие постановки задачи:

1. Минимизация общего количества нереализованных соединений. Пусть $1_z(m)$ – индикаторная функция, равная 1, если требуемый канал для m -й КПУ $z_m = (a_{im}, a_{jm})$ не может быть установлен, $1_{z_m}(LP_m^k)$ – индикаторная функция, равная 1, если канал для КПУ $z_m = (a_{im}, a_{jm})$ реализуется на основе пути LP_m^k , использующего соответствующий спектральный диапазон $f_{LP_m^k}^{vk} \dots f_{LP_m^k}^{bk}$.

Тогда задача минимизации общего количества нереализованных соединений выглядит так:

$$\min \sum_{m=1}^M 1_z(m) \cdot 1_{z_m}(LP_m^k),$$

при условии:

$$1_z(m) + \sum_{LP_m^k \in LP_m^k} 1_{z_m}(LP_m^k) = 1, \quad \forall m = \overline{1, M},$$

означающем, что канал или не реализуется или реализуется на основе одного светового пути, и условия:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{x=1}^M 1_{e_{ij}}(LP_m^k) \cdot 1_{e_{ij}}(LP_x^q) \cdot 1(LP_m^k, LP_x^q) = 0, \quad \forall e_{ij} \in E,$$

где $1_{e_{ij}}(LP_m^k)$ – индикаторная функция, равная 1, если путь LP_m^k проходит по ВОЛС e_{ij} , $1(LP_m^k, LP_x^q)$ – индикаторная функция, равная 1, если пути LP_m^k и LP_x^q $|m, x = \overline{1, M}, m \neq x$ формируются на основе пересекающихся диапазонов частот: $(f_{LP_m^k}^{vk}, f_{LP_m^k}^{bk}) \cap (f_{LP_x^q}^{vq}, f_{LP_x^q}^{bq}) \neq \emptyset$. Ограничение гарантирует, что каждый ЭЧИ в каждой ВОЛС назначается не более чем для одного светового пути.

2. Задача минимизации общего количества используемых ЭЧИ может быть записана так:

$$\min \sum_{m=1}^M n_m^{\text{ЭЧИ}},$$

при тех же условиях, что и предыдущая задача, а также при условии:

$$\sum_{m=1}^M 1_z(m) = |Z|,$$

что соединения для всех КПУ будут установлены.

Заключение

Приведенные постановки задач сформулированы в виде задач целочисленного линейного программирования. Однако на реальных сетях при постановке задачи в таком виде количество переменных может составить десятки и сотни тысяч, что существенно затруднит её разрешение. Поиску других способов формулировки задач оптимизации ОТС ВСР на основе представленной модели посвящены дальнейшие исследования авторского коллектива статьи.

Литература

1. О связи : федеральный закон от 07.07.2003 N 126-ФЗ ; в ред. от 30.12.2021 (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2022) // Собрание законодательства РФ. Официальный интернет-портал правовой информации. – <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102082548>.
2. Фокин, В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети : Учебное пособие / В.Г. Фокин. – Москва : Эко-Трендз, 2008. – 271 с.
3. Фокин, В. Г. Гибкие оптические сети : Учебное пособие / В.Г. Фокин, Р.З. Ибрагимов. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 252 с.
4. Lypez, V. Elastic Optical Networks Architectures, Technologies, and Control / V. Lypez, L. Velasco. – Luxemburg : Springer, 2016. – 299 с.
5. Bijoy, C. C. Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design, Control, and Management / C.C. Bijoy, O. Eiji. – New Delhi : South Asian University, 2020. – 232 с.
6. Чуднов, А. М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем / А.М. Чуднов. – Санкт-Петербург : ВАС, 2021. – 193 с.
7. Recommendation G.694. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. – URL : <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/> (дата обращения: 24.01.2024).
8. Moench, W. How to measure the true OSNR in ROADMs-based networks / W. Moench. – URL: https://www.en4tel.com/pdfs/osnrroadm_wp_lab_tm_ae.pdf (дата обращения: 21.01.2024).
9. OSNR-aware Control of Optical White Boxes on Elastic Optical Networks / A.S. Camila Diniz, A. Miquel Garrich, G. Zervas, A.A. Darli // Asia Communications and Photonics Conference (China, Wuhan, 2016.). – 2016. – P. 2–5.
10. Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал. – Москва : Мир, 1996. – 324 с.
11. Нелинейные искажения как нелинейный шум в когерентных волоконно-оптических линиях связи / А.Е. Жителев, В.А. Конышев, С.Н. Лукиных [и др.] // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47, № 12. – С. 1135–1139.
12. Совершенствование математических моделей волоконно-оптического линейного тракта / П.И. Кузин,



А.П. Бойко, В.Н. Обердерфер [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2022. – Т. 19, № 2 (212). – С. 26–31.

13. Бойко, А. П. К проблеме автоматического обнаружения топологии физического уровня оптической транспортной сети специального назначения / А.П. Бойко, П.И. Кузин // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2023. – № 5–6 (179–180). – С. 65–70.

14. Одоевский, С. М. Обоснование критерия эффективности функционирования современных пакетных транспортных сетей связи специального назначения / С.М. Одоевский, О.В. Яровикова // Международная научно-техническая и научно-методическая конференция Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : сборник научных статей (Санкт-Петербург, 03–04 марта 2015 г.). – 2015. – С. 1389–1394.

15. Оптимизационные методы распределения каналов передачи данных телекоммуникационной системы распространения геоинформации по типам трафика / С.А. Ясинский, П.В. Лебедев, А.Н. Григорчук [и др.] / Информация и Космос. – 2022. – № 4. – С. 32–36.