

УДК 621.391.63

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАССИВНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ PON

В.И. КИРИЛЛОВ, Е.А. КОВРИГА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 8 апреля 2013

Осуществлен поэтапный анализ основных направлений оптимизации пассивных волоконно-оптических сетей PON; предложена упрощенная методика моделирования звездообразного участка сети PON.

*Ключевые слова:* пассивные волоконно-оптические сети PON, TDM-PON, WDM-PON, древовидная сеть, звездообразная сеть.

В настоящее время модернизация абонентских сетей доступа основана на переходе к пассивным оптическим сетям PON. Наиболее распространенным (в т. ч. и на территории Республики Беларусь) является стандарт GPON (Gigabit PON) в сочетании с временным разделением каналов (TDM) и древовидной топологией сети [1]. Принцип реализации такой концепции представлен на рис. 1.

Принцип действия данной сети следующий: оптический передатчик (ОП) головной станции (ГС) передает широкополосный сигнал цифрового телевидения на длине волны  $\lambda_{TV}$  (чаще всего это 1550 нм), который затем усиливается эрбиевым усилителем (EDFA) и попадает на мультиплексор (MUX). На этот же мультиплексор поступает сигнал оптического линейного терминала (OLT), как правило, установленного в помещении автоматической телефонной станции (АТС) [2].

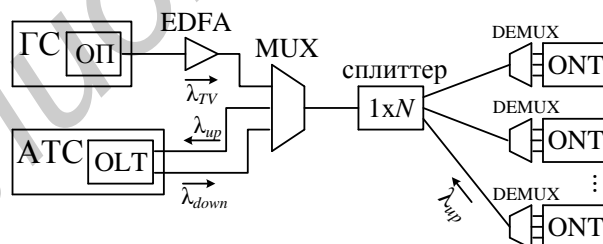


Рис. 1. Древовидная структура сети TDM-PON

OLT передает данные (Интернет, телефония и др.) на другой длине волны  $\lambda_{down}$  (1490 нм). Именно для объединения этих длин волн и необходим мультиплексор. Далее групповой сигнал проходит по оптической линии, разветвляясь по «дереву PON» с помощью пассивных устройств – сплиттеров  $1 \times N$ . Приемником сигнала у абонента является оптический сетевой терминал (ONT) со встроенным демультиплексором (DEMUX). Сигнал от OLT также является широкополосным: каждый ONT «выбирает» из потока предназначенную только ему информацию [2].

Для связи ONT с OLT используется третья длина волны  $\lambda_{up}$  (1310 нм), причем ONT передает информацию только в момент времени, отведенный для него OLT, и любой ONT не может связываться с другими ONT без участия OLT (все пакеты для любого адресата централизованно обрабатывает одно устройство в сети – OLT) [3]. Именно поэтому представленную схему часто называют TDM-PON.

Для оптимизации существующей концепции TDM-PON была предложена концепция WDM-PON со спектральным разделением каналов [4]. Существует два основных варианта технологии WDM: плотный (Dense WDM, DWDM) и разреженный (Coarse WDM, CWDM). В первом случае спектр делится на очень узкие каналы (от 0,4 нм), что, с одной стороны, обеспечивает большое число спектральных каналов, а с другой – значительно повышает стоимость оборудования WDM. Системы DWDM используются в первую очередь в магистральных сетях дальней связи. В городских сетях доступа гораздо экономичнее использовать второй вариант – CWDM. В этом случае спектр в диапазоне от 1270 до 1610 нм «нарезается» на гораздо более широкие каналы – по 20 нм [5]. Принцип реализации такой технологии в сетях PON представлен на рис. 2.

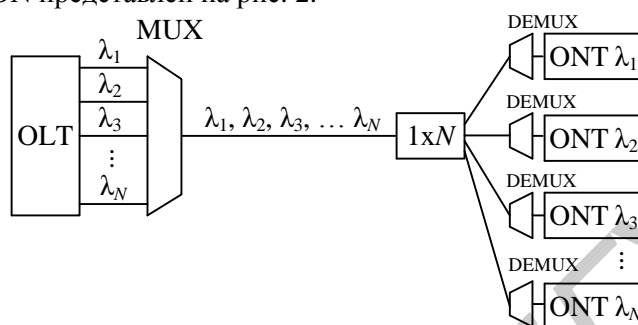


Рис. 2. Древоподобная структура сети WDM-PON

Как видно из рис. 2, каждому ONT выделена своя длина волны  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ , при этом используется стандартный древоподобный сплиттер  $1 \times N$ .

Если подойти к рассмотрению систем TDM-PON и WDM-PON как к IP-ориентированным пакетным сетям (рассматривать качество обслуживания трех видов трафика: речь (VoIP), видео (IPTV) и данные (DoIP)), то можно выделить следующие особенности [6–9]:

а) среднее время задержки передачи пакетов (кадров) в сегменте WDM-PON приблизительно в 20 раз ниже, чем для GPON;

б) влияние разброса длин линий на среднее время задержки передачи пакетов (кадров) возрастает с ростом числа абонентов, включенных в сегмент TDM-PON, а при использовании технологии WDM-PON этот параметр не оказывает влияния на среднее время задержки передачи пакетов (кадров) из-за отсутствия временной процедуры бесконфликтного доступа;

в) наименьшее влияние коэффициента вариации интервала обслуживания на среднее время задержки передачи пакетов (кадров) в обратном канале достигается при использовании технологии WDM-PON в виду отсутствия длительного процесса доступа и малой величины интервала обслуживания.

В качестве одного из направлений оптимизации данного вида сетей, а именно увеличения расстояния между OLT и ONT для подключения удаленных (возможно, корпоративных) абонентов, рассматривают применение специальных волоконно-оптических разветвителей. В частности, в работе [10] представлена конструкция сплиттера  $1 \times N$ , выполненная на основе звездообразного волоконно-оптического разветвителя  $N \times N$ .

Функционирование устройства основано на применении многолучевого интерферометра, образованного торцами центрального смесительного элемента. Сам смеситель предлагается выполнить из легированного эрбием материала. Как утверждается в [10], такое устройство обеспечивает не только равномерное разделение входного оптического сигнала, но и достаточно большой уровень выходной мощности (не менее 0 дБм), что позволяет увеличить расстояние между OLT и ONT до 100 км.

Однако у представленной на рис. 2 древоподобной сети WDM-PON сохраняется существенный недостаток – ONT по-прежнему не могут связываться друг с другом без участия OLT. Поэтому в качестве следующего шага оптимизации данного вида сетей рассматривают варианты разгрузки центрального узла OLT при взаимодействии ONT друг с другом.

Например, в работе [11] предложена следующая модель WDM-PON (см. рис. 3): древообразный разветвитель  $1 \times N$  заменен на звездообразный разветвитель типа  $N \times N$ . В этом случае, если хватает ресурса по количеству каналов, можно использовать взаимодействие как с

OLT, так и независимо между абонентскими ONT: «первая линейка» длин волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$  применяется для взаимодействия с OLT, «вторая линейка» длин волн  $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \lambda_{N+3}, \dots, \lambda_{N+K}$  используется для непосредственного взаимодействия между абонентскими ONT сетевого сегмента. При этом предполагается, что разветвитель  $N \times N$  передает во все каналы, в т.ч. смежные, все длины волн с одинаковыми коэффициентами передачи, а выбор принимаемых каналов осуществляется оборудованием абонентов (ONT) и оборудованием АТС (OLT), причем OLT вообще игнорирует длины волн «второй линейки».

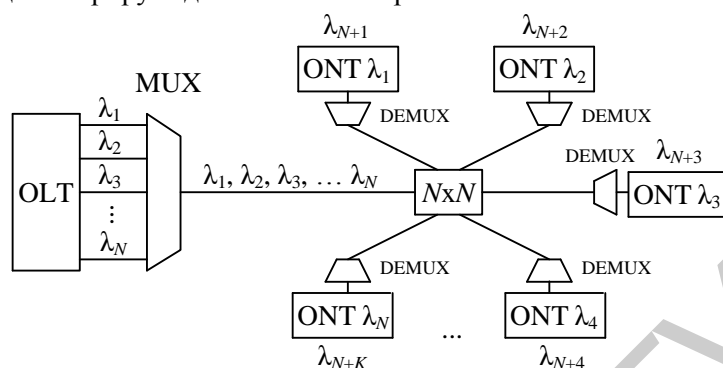


Рис. 3. Звездообразная структура сети WDM-PON

Взаимодействие ONT между собой основано на применении следующего алгоритма: каждый абонентский терминал оборудован лазерным передатчиком с перестраиваемой длиной волны (например, можно использовать лазерный генератор широкого спектра совместно с фильтром Фабри-Перо) и приемником, настроенным на свою собственную длину волны [11].

Для того чтобы отправить информационное сообщение, требуется настроить передатчик узла-отправителя на домашний канал адресата, затем передать запрос на разрешение установления соединения, дождаться разрешения и далее передавать сообщение. Чтобы выдать разрешение на возможный прием (что препятствует возникновению коллизий), каждый абонентский терминал «просматривает» все длины волн «второй линейки» в циклическом режиме до тех пор, пока не обнаруживает канал с запросом на установку соединения, содержащим свой собственный адрес (адрес приемника) [11].

В этой работе также предложена достаточно сложная математическая модель, рассматривающая всю систему в целом и требующая решения довольно сложных уравнений (для чего был использован специализированный программный пакет).

В результате математического моделирования данной системы был сделан вывод, что при взаимодействии на абонентском сегменте по предлагаемому алгоритму время доведения информации до абонента уменьшается до 10 раз.

Целью настоящей статьи является рассмотрение более простого способа математического моделирования для сегмента звездообразной сети PON, который позволяет описать возможные состояния каждого конкретного абонентского ONT в сети и привести полученную модель к известной одноканальной системе массового обслуживания с отказами [12].

Упрощенно можно полагать, что каждый абонентский ONT может находиться в одном из трех состояний:  $S_0$  – устройство свободно (например, просматривает «вторую линейку» длин волн),  $S_1$  – устройство занято приемом сообщений от другого ONT либо OLT,  $S_2$  – устройство занято передачей собственных сообщений (размеченный граф состояний приведен на рис. 4).

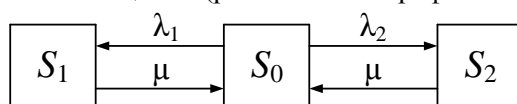


Рис. 4. Граф состояний абонентского ONT

На рис. 4 под  $\lambda_1$  понимается интенсивность потока заявок данному ONT от других ONT и OLT (заявок/с), под  $\lambda_2$  – интенсивность потока заявок от данного ONT другим ONT либо OLT (заявок/с);  $\mu$  – интенсивность потока обслуживания заявок,  $1/c$  ( $\mu = 1/t_{обсл}$ , где  $t_{обсл}$  – среднее время приема/передачи одного сообщения, с [12]).

Для графа (рис. 4) можно составить систему из трех линейных уравнений Колмогорова в предельном стационарном режиме [12]:

$$\begin{aligned} \text{а) } (\lambda_1 + \lambda_2)p_0 &= \mu(p_1 + p_2); \\ \text{б) } \mu p_1 &= \lambda_1 p_0; \\ \text{в) } \mu p_2 &= \lambda_2 p_0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $p_0, p_1, p_2$  выражают предельные вероятности состояний  $S_0, S_1, S_2$ . Решая эту систему с учетом нормировочного условия  $p_0 + p_1 + p_2 = 1$ , получим:

$$\begin{aligned} \text{а) } p_0 &= \mu / (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu); \\ \text{б) } p_1 &= \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu); \\ \text{в) } p_2 &= \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu). \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение для относительной пропускной способности  $Q$  (вероятность того, что ОНТ будет свободен) запишется в виде:  $Q = p_0$  [12].

Абсолютную пропускную способность  $A$ , сообщений/с (сколько сообщений в среднем будет передано в единицу времени) можно определить из следующего выражения [12]:

$$A = (\lambda_1 + \lambda_2)Q. \quad (3)$$

Вероятность отказа в приеме/передаче сообщения

$$P_{\text{отк}} = p_1 + p_2 = (\lambda_1 + \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu). \quad (4)$$

Зададим исходные параметры и приведем пример расчета: пусть  $\lambda_1 = 90$  заявок/с,  $\lambda_2 = 10$  заявок/с. Тогда суммарная интенсивность потока заявок  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 = 100$  заявок/с. Примем  $t_{\text{обсл}} = 1$  мс ( $10^{-3}$  с), тогда обратная среднему времени обслуживания величина  $\mu = 10^3$  1/с.

Рассчитаем основные параметры системы:

– относительная пропускная способность  $Q$  (см. формулу (2, а)):

$$Q = 10^3 / (90 + 10 + 10^3) = 0,909;$$

– абсолютная пропускная способность  $A$  (см. формулу (3)):

$$A = (90 + 10) \cdot 0,909 = 90,9 \text{ сообщений/с};$$

– вероятность отказа в обработке заявки  $P_{\text{отк}}$  (см. формулу (4)):

$$P_{\text{отк}} = (90 + 10) / (90 + 10 + 10^3) = 0,091.$$

При этом вероятность отказа по причине приема сообщения составит  $p_1 = 90 / (90 + 10 + 10^3) = 0,082$ , а вероятность отказа по причине передачи сообщения –  $p_2 = 10 / (90 + 10 + 10^3) = 0,009$ .

Для большей наглядности рассматриваемого примера, используя формулу (2, а), приведем графики зависимости относительной пропускной способности  $Q$  от среднего времени приема/передачи одного сообщения  $t_{\text{обсл}}$  (рис. 5, а) и от суммарной интенсивности потока заявок  $\lambda$  (рис. 5, б).

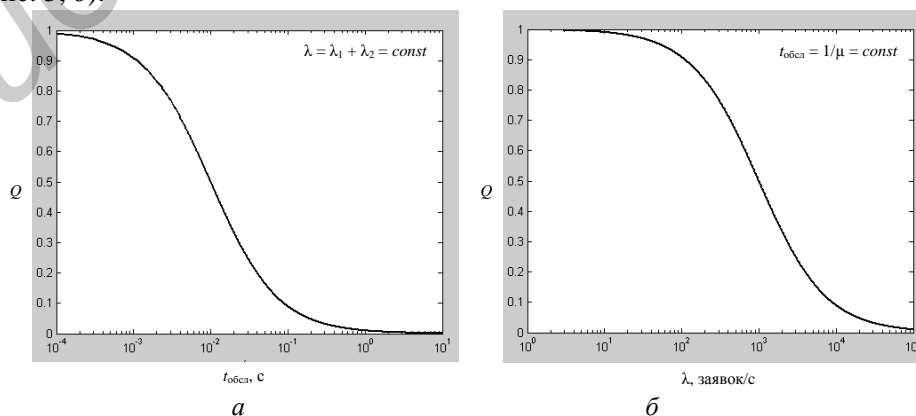


Рис. 5. Графики зависимости относительной пропускной способности  $Q$  от среднего времени приема/передачи одного сообщения  $t_{\text{обсл}}$  (а) и суммарной интенсивности потока заявок  $\lambda$  (б)

Как видно из рис. 5, представленные графики полностью отражают характер получившихся выражений: чем меньше среднее время приема/передачи сообщения (чем выше скорость передачи информации в системе), тем больше вероятность успешной обработки ONT поступившей заявки (см. рис. 5, а); чем меньше общая интенсивность потока заявок, направленных на ONT, тем больше относительная пропускная способность  $Q$  (см. рис. 5, б).

Таким образом, проведя мониторинг участка звездообразной сети PON и получив необходимые усредненные параметры сети, а также рассмотрев каждый ONT отдельно по вышеприведенной методике, можно оценить качество работы сети в целом и отдельного абонента в частности, применяя простейшие общедоступные средства вычисления.

## THE MAIN TENDENCIES OF OPTIMIZATION OF THE PASSIVE FIBER-OPTICAL NETWORKS PON

V.I. KIRILLOV, K.A. KAURYHA

### Abstract

The stepwise analysis of the main tendencies of optimization of the passive fiber-optical networks PON is carried out; the simplified method of modeling of a star-shaped area of the PON network is offered.

### Список литературы

1. *Егоршев Д.Е.* // Т-COMM: Телекоммуникации и транспорт. 2010. № 7. С. 182–183.
2. *Кириллов В.И., Коврига Е.А.* // Веснік сувязі. 2012. № 4. С. 37–41.
3. Введение в технологию PON. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.ic-line.ua](http://www.ic-line.ua). – Дата доступа: 22.02.2013.
4. *Скляр О.К.* Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб., 2010.
5. *Волков А.В.* // LIGHTWAVE Russian Edition. 2007. № 1. С. 24–32.
6. *Никульский И.Е., Пяттаев В.О.* // Техника связи. 2008. № 6. С. 8–10.
7. *Никульский И.Е., Филиппов А.А.* // Вестник связи. 2010. № 2. С. 4–8.
8. *Никульский И.Е.* // Вестник связи. 2011. № 2. С. 49–50.
9. *Никульский И.Е.* // Вестник связи. 2011. № 4. С. 38–41.
10. *Виноградова И.Л., Каибиев А.А., Султанов А.Х.* // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т. 10, № 4. С. 23–30.
11. *Виноградова И.Л., Конюхова В.М., Султанов А.Х.* // Инфокоммуникационные технологии. 2011. Т. 9, №2. С. 11–18.
12. *Кремер Н.Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика. М., 2004.