

Математическая модель функционирования коммутатора в полностью оптической сети с учётом задержек на FDL

Г. П. Башарин, Е. С. Шибаева

*Кафедра систем телекоммуникаций
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, 117198, Москва, Россия*

На сегодняшний день наиболее перспективными являются полностью оптические сети. Передача трафика по оптическим сетям осуществляется с помощью технологии коммутации, одной из которых является коммутация пакетов. Для эффективного использования полосы пропускания оптического волокна применяется маршрутизация по длине волны и полная конверсия длин волн. Основной проблемой в оптических сетях является возникновение коллизий, когда два и более пакетов одновременно передаются на одну и ту же выходную длину волны. Для решения этой проблемы используются волоконно-оптические линии задержки. Они позволяют обеспечить задержку пакетов на определённое время, предотвращая сброс пакетов и уменьшая вероятность блокировки пакетов, когда заняты все выходные длины волн. В статье рассматривается математическая модель функционирования коммутатора в оптической сети с коммутацией пакетов с учётом волоконно-оптических линий задержки и резервированием выходных длин волн. Предполагается, что применяется маршрутизация по длине волны и полная конверсия длин волн. Пакеты данных обслуживаются с учётом приоритетов. Выводятся СУГБ для равновесного распределения вероятностей и формулы для расчёта основных ВВХ отдельного оптического волокна. Проводится численный анализ полученных характеристик.

Ключевые слова: полностью оптическая сеть (AON), оптический коммутатор, оптическая коммутация пакетов (OPS), спектральное разделение каналов (WDM), волоконно-оптические линии задержки (FDL).

1. Введение

Одной из основных тенденций развития телекоммуникационных сетей является процесс «фотонизации» [1, 2] транспортных сетей, который должен привести к созданию полностью оптической транспортной сети (All-Optical Network, AON). Это концепция, воплощение которой позволит на долгое время снять вопрос о необходимости наращивания ресурсов, требуемых для удовлетворения возрастающих потребностей в передаче информации. Сейчас в экономике развитых стран происходит переход к оптической транспортной сети (Optical Transport Network, OTN) [1–3], которая станет базовой при реализации глобальной информационной инфраструктуры. OTN построена по определённым законам и отвечает специальной группе рекомендаций МСЭ-Т. OTN — не общий, а технический термин, регламентированный МСЭ-Т. OTN планируется строить путём создания в существующей ОТС с технологиями О-Е-О и Ё-О-Е островков — доменов фотонной сети [1]. Для эффективного использования полосы пропускания оптического волокна применяется маршрутизация по длине волны (Wavelength Division Multiplexing, WDM) и полная конверсия длин волн [3, §7.5]. Основной проблемой в оптических сетях является возникновение коллизий, когда два и более пакетов одновременно передаются на одну и ту же выходную длину волны. Для решения этой задачи используются волоконно-оптические линии задержки (Fiber Delay Lines, FDL) [4, 5]. Они позволяют обеспечить задержку пакетов на определённое время, предотвращая сброс и уменьшая вероятность блокировки пакетов, когда заняты все выходные длины волн.

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2012 г.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-07-00108-а и Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.U02.21.1874).

2. Архитектура оптического коммутатора

Рассмотрим архитектуру оптического коммутатора типа О-О-О с $F_{\text{ВХ}}$ входными и $F_{\text{ВЫХ}}$ выходными волокнами, при этом в каждом входном и выходном волокне поддерживается W длин волн. Поступающие сигналы на разных длинах волн демультиплексируются, передаются по оптическому волокну и мультиплексируются на выходе [6]. Предполагается наличие полной конверсии длин волн, т.е. поступивший в коммутатор сигнал по одной длине волны может покинуть его по любой свободной длине волны [7].

Далее в статье рассматривается только одно выходное волокно, на которое поступает нагрузка с $F_{\text{ВХ}}$ входных волокон (рис. 1).

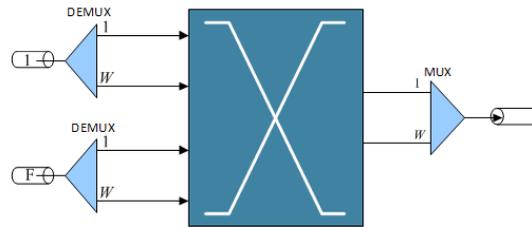


Рис. 1. Архитектура оптического коммутатора типа О-О-О

3. Математическая модель

Пусть система обслуживает $K = 2$ классов услуг, где $k = 1$ — заявки с высшим, а $k = 2$ — заявки с низким приоритетом. Здесь и далее пакеты будем называть заявками. Поток поступления заявок на выходное волокно пуассоновский с интенсивностью ε_k , $k = \overline{1, 2}$. $R = F_{\text{ВХ}}W$ — количество источников заявок. Интенсивность успешного обслуживания заявки равняется μ .

Если W_1 — число свободных длин волн, то $W - W_1$ — пороговое значение, после которого вновь поступившие низкоприоритетные заявки блокируются и теряются (рис. 2, где FDL обозначается как ∞). Высокоприоритетные заявки направляются в буферный накопитель (БН), состоящий из L FDL, причём время пребывания заявки в FDL распределено экспоненциально с параметром ν . По окончании этого периода заявка занимает свободную длину волны либо блокируется и теряется, не оказывая влияния на поступающий поток заявок.

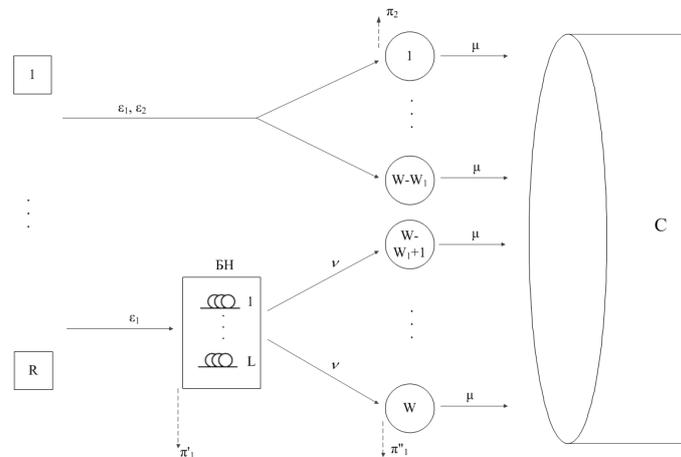


Рис. 2. Принцип работы оптического коммутатора

Среднее время задержки заявки, передающейся по FDL:

$$h = 1/\nu = \frac{l_p}{C} + \frac{l_{FDL}\tilde{n}}{c}, \quad (1)$$

где l_p — длина заявки, имеющая экспоненциальное распределение, C — пропускная способность оптического волокна, l_{FDL} — длина FDL в км, \tilde{n} — показатель преломления оптического волокна, c — скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^5$ км/сек).

Функционирование оптического коммутатора описывается двумерным марковским процессом (МП) $(X(t), Y(t), t \geq 0)$ с пространством состояний $S = \{(w, l) : w = \overline{0, W}, l = \overline{0, L}\}$, где $X(t)$ — количество занятых выходных длин в волокне, $Y(t)$ — в БН в момент времени $t \geq 0$, $|S| = (W + 1)(L + 1)$. Фрагменты диаграммы интенсивностей переходов представлены на рис. 3.

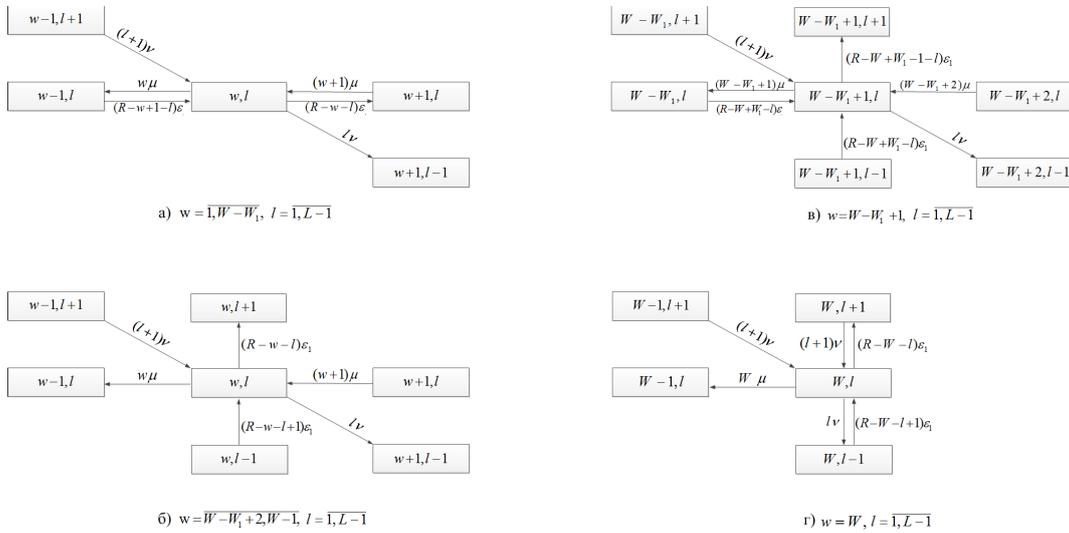


Рис. 3. Фрагмент диаграммы интенсивностей переходов

Подпространства приёма заявок классов 2 и 1 имеют, соответственно, вид:

$$S_2 = \{(w, l) : 0 \leq w \leq W - W_1, l = \overline{0, L}\}, S_1 = S \setminus S_2. \quad (2)$$

Подпространства блокировок 1- и 2-заявки имеют, соответственно, вид:

$$\bar{S}_1 = \{(w, l) : W - W_1 + 1 \leq w \leq W - 1, l = L\} \cup \{(w, l) : w = W, l = \overline{1, L}\}. \quad (3)$$

$$\bar{S}_2 = \{(w, l) : W - W_1 + 1 \leq w \leq W, l = \overline{0, L}\}. \quad (4)$$

Рассмотрим оптический коммутатор с параметрами: $F_{\text{вх}} = 2, F_{\text{вых}} = 1, W = 6, W_1 = 2, L = 3$ (рис. 4). Диаграмма переходов представлена на рис. 5.

Подпространства приёма и блокировок 2- и 1- заявок, соответственно, равны

$$S_2 = \{(w, l) : 0 \leq w \leq 4, l = \overline{0, 3}\}, S_1 = S \setminus S_2,$$

$$\bar{S}_1 = \{(5, 3)\} \cup \{(w, l) : w = 6, l = \overline{1, 3}\},$$

$$\bar{S}_2 = \{(w, l) : 5 \leq w \leq 6, l = 3\}.$$

Пусть $n_i(t), i = 1, 2$ — числа 1- и 2- заявок в выходном волокне, $n'_1(t)$ — число заявок в БН для $t \geq 0$.

$$n_1(t) \in \overline{0, 6}, n_2(t) \in \overline{0, 4}, n_1(t) + n_2(t) \leq 6, n'_1(t) \in \overline{0, 3}, 0 \leq n_1(t) + n'_1(t) \leq 9.$$

$$F = 2 \quad W = 6$$

$$L = 3 \quad W_1 = 2$$

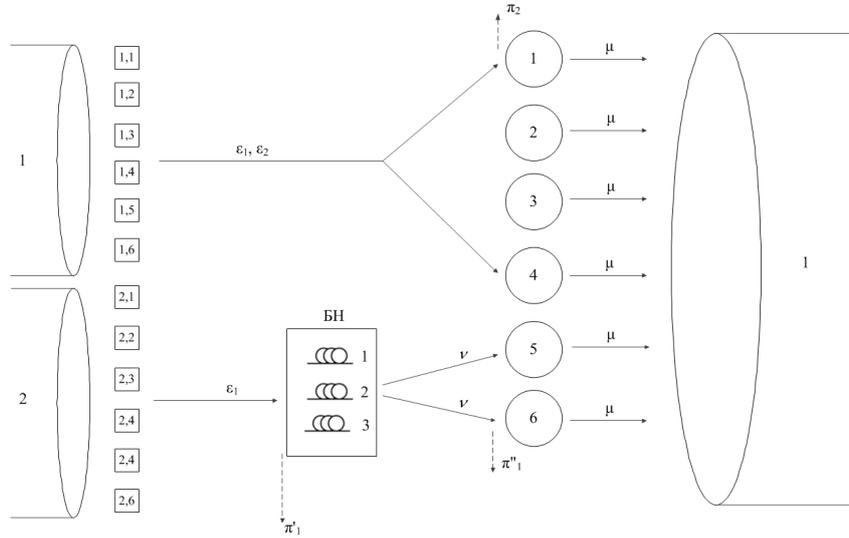


Рис. 4. Пример принципа работы оптического коммутатора с FDL

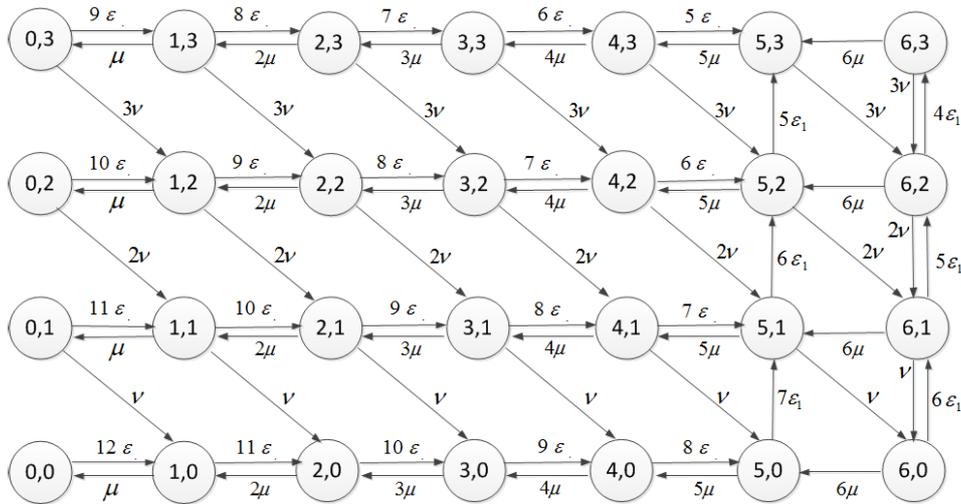


Рис. 5. Диаграмма интенсивностей переходов

Вероятность того, что заняты w выходных длин волн, определяется формулой

$$P(w) = \frac{\varepsilon(w-1)}{w\mu} P(w-1), w = \overline{1, W}, \sum_{w=0}^W P(w) = 1, \quad (5)$$

где $\varepsilon(w) = \begin{cases} (R-w)\varepsilon., w = \overline{0, W-W_1}, \\ \min(L; R-w)\nu, w = \overline{W-W_1+1, W} \end{cases}$ — интенсивность поступления заявок, когда заняты w выходных длин волн, $\varepsilon. = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

Вероятность того, что в БН l заявок, когда заняты w выходных длин волн, определяется формулой

$$p_{w,l} = P(w)q_w(l), w = \overline{0, W}, l = \overline{0, L}, \quad (6)$$

где $q_w(l) = \rho \cdot \frac{\prod_{m=1}^l [(R-w)-(m-1)]}{l!} q_w(0) = \frac{C_{R-w}^l \rho^l}{\sum_{m=0}^L C_{R-w}^m \rho^m}$.

Поэтому

$\pi_1 = \sum_{w=W-W_1+1}^W p_{w,L} + \sum_{l=1}^{L-1} p_{W,l}$, $\pi_2 = \sum_{w=W-W_1+1}^W \sum_{l=0}^L p_{w,l}$ — вероятности блокировок 1 и 2 заявок.

На практике часто полезно знать $UTIL = \sum_{w=1}^W wP(w)$ — средний коэффициент использования волокна.

4. Пример численного анализа

Рассмотрим зависимость π_1 , π_2 и UTIL от L и W_1 . Из рис. 6 и 7 видно, что меняя W_1 можно влиять на вероятности блокировок как заявок первого типа, так и второго. Увеличение W_1 приводит к уменьшению π_1 и увеличению π_2 . Изменение L позволяет корректировать вероятности π_1 , π_2 и UTIL. Для проведения численного анализа использовались следующие структурные и нагрузочные параметры:

F	W	W_1	L	ε_1 , пакет/сек	ε_2 , пакет/сек	s , пакет/сек	l_{FDL} , км	C , Гбит/сек	\tilde{n}
10	8	2	4	1000	500	250	5	10	1.55

где s — шаг изменения ε_1 и ε_2 .

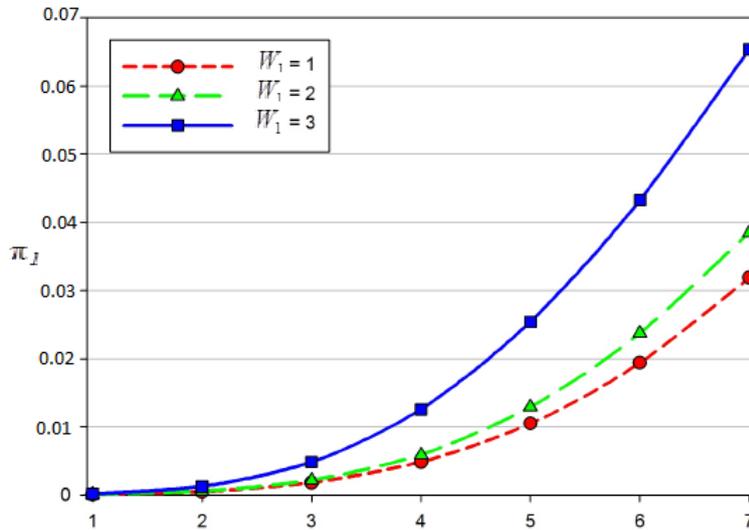


Рис. 6. Вероятность блокировки 1-заявки в зависимости от ε_1 и ε_2

5. Заключение

В данной статье предложена математическая модель работы оптического коммутатора с учётом FDL, выведены формулы для расчёта равновесного распределения вероятностей и основных ВВХ, приведён численный анализ. Используя FDL при построении оптической сети, можно значительно уменьшить потери пакетов и увеличить коэффициент использования оптического волокна.

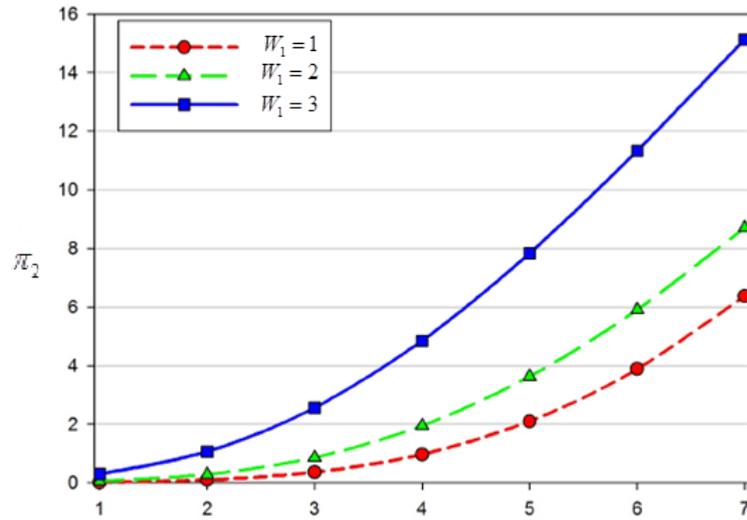


Рис. 7. Вероятность блокировки 2-заявки в зависимости от ε_1 и ε_2

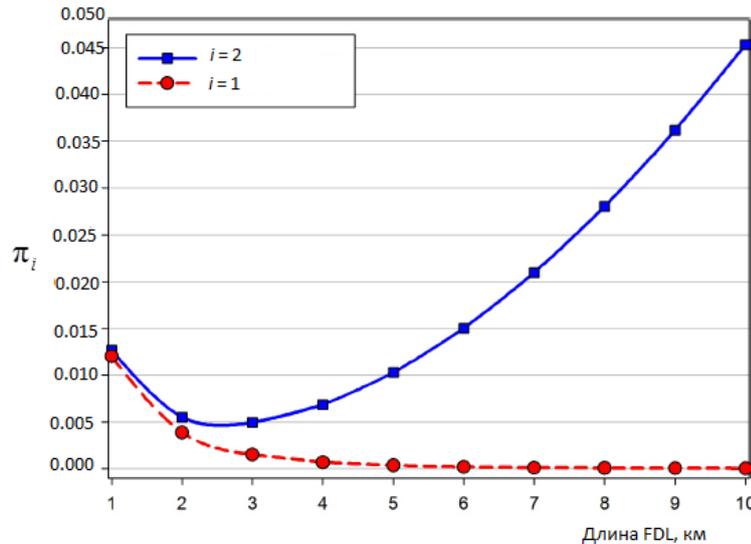


Рис. 8. Зависимость π_1 и π_2 от l_{FDL}

Литература

1. Гордиенко В. Н., Тверецкий М. С. Структура и интерфейсы фотонной сети // Электросвязь. — 2011. — № 6. — С. 26–29. [Gordienko V. N., Tveretsky M. S. Structure and Interfaces of Photon Network // Electric Communication. — 2011. — P. 26–29]
2. Меккель А. М. Полностью оптическая транспортная сеть. — М.: ФГУП ЦНИ-ИС, 2008. [Mekkel A. M. All-optical Network. — Moscow, 2008]
3. Башарин Г. П. Лекции по математической теории телетрафика. Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: РУДН, 2009. [Basharin G. P. Lecture on Mathematical Teletraffic Theory. — Moscow, 2009]
4. A Mathematical Framework for the Performance Evaluation of an All-Optical

- Packet Switch with QoS Differentiation / J. S. Vardakas, I. D. Moscholios, M. D. Logothetis, V. G. Stylianakis // IARIA International Journal On Advances in Telecommunications. — 2010. — Т. 3, № 3.
5. Chuong D. T., Loi V. D., Minh Nhat V. V. A Performance Analysis of Deflection Routing and FDLs with Wavelength-Based QoS in OBS Networks // 2011 International Conference on Cyber-Enabled Distribution Computing and Knowledge Discovery. — 2011. — Pp. 72–78.
 6. Venkatesh T., Siva Ram Murthy C. An Analytical Approach to Optical Burst Switched Networks. — Springer, 2010.
 7. Mukherjee B. Optical WDM networks. — Springer, 2006.

UDC 621.39

Mathematical Framework for the Performance Evaluation of an All-Optical Packet Switch with FDLs Utilization

G. P. Basharin, E. S. Shibaeva

*Telecommunication Systems Department
Peoples' Friendship University of Russia
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia*

Nowadays all-optical network is the most perspective. Traffic transmits in optical networks by commutation technology, one of which is packets commutation. WDM and full wavelength conversion service for effective using of optical fiber bandwidth. A vital problem in optical networks is collision initiation, when ever two or more packets are switched on the same output wavelength, at the same time. FDLs are used for solving this problem. They allow to delay packets for definite time, preventing packets dropping and reducing packet blocking when all output wavelengths are engaged. In this paper we propose a mathematical framework for the performance evaluation of an all-optical packet switch, including fiber delay lines and wavelength reservation. WDM and full wavelength conversion are also used. We present the formulas for the steady-state blocking probabilities and the PBP calculation in one destination fiber. Numerical analysis of these characteristics is also provided.

Key words and phrases: all-optical network (AON), optical switch, optical packet switching (OPS), wavelength division multiplexing (WDM), fiber delay lines (FDL).