

УДК 621.382.621.395

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛНОВОГО ОПТИЧЕСКОГО И ВРЕМЕННОГО УПЛОТНЕНИЯ КАНАЛОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В.Н. УРЯДОВ, Ю.Б. СТУНКУС

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

Поступила в редакцию 15 марта 2006

Проведено сравнение волнового и временного уплотнения каналов в волоконно-оптических системах передачи с точки зрения уменьшения бюджета системы. Показано, что волновое уплотнение по сравнению с системой с временным уплотнением на  $p-i-n$  фотодиоде имеет преимущество начиная с гигабитных скоростей передач.

*Ключевые слова:* волоконно-оптические системы передачи, волновое уплотнение, временное уплотнение, бюджет системы, чувствительность, длина волны.

### Введение

Технологии волнового уплотнения (WDM, CWDM) и временного уплотнения (TDM) применяются для увеличения информационной пропускной способности волоконно-оптической системы передачи. Хотя они не конфликтуют, а скорее дополняют друг друга, представляет интерес сравнение таких их характеристики, как гибкость структуры линий связи, скорость передачи и влияние на относительный уровень ошибок по битам, определение целесообразности применения этих технологий для наращивания информационной емкости ВОСП.

В технологии WDM нет многих ограничений и технологических трудностей, свойственных TDM. Для повышения пропускной способности, вместо увеличения скорости передачи в едином составном канале, как это реализовано в технологии TDM, в технологии WDM увеличивают число каналов (длин волн), применяемых в системах передачи.

Рост пропускной способности при использовании технологии WDM осуществляется без дорогостоящей замены оптического кабеля. Применение технологии WDM позволяет сдавать в аренду не только оптические кабели или волокна, но и отдельные длины волн. По одному волокну на разных длинах волн можно одновременно передавать самые разные приложения — кабельное телевидение, телефонию, трафик Интернет, "видео по требованию" и т.д. Как следствие этого, часть волокон в оптическом кабеле можно использовать для резерва.

Применение технологии WDM позволяет исключить дополнительную прокладку оптических кабелей в существующей сети. Даже если в будущем стоимость волокна уменьшится за счет использования новых технологий, волоконно-оптическая инфраструктура (проложенное волокно и установленное оборудование) всегда будет стоить достаточно дорого. Для ее эффективного использования необходимо иметь возможность в течение долгого времени увеличивать пропускную способность сети и менять набор предоставляемых услуг без замены оптического кабеля. Технология WDM предоставляет именно такую возможность, при этом, однако, уменьшается бюджет системы, так как оптические мультиплексоры и демultipлексоры вносят дополнительное затухание.

В технологии TDM пропускная способность увеличивается за счет увеличения скорости передачи битов в линии связи. Насколько быстрой может быть сделана эта скорость — в пределах определенных фундаментальных ограничений оптического волокна — зависит от используемых электронных компонентов. Чтобы получать данные от каждого источника, хранить их, передавать в течение соответствующих тайм-слотов, считывать и корректно доставлять получателю, требуется применение цифровых интегральных схем. Все эти цифровые компоненты должны работать со скоростью, равной или близкой к суммарной скорости передачи линии связи. Для каждого канала, независимо от его пропускной способности, должно быть установлено электронное оборудование, способное поддерживать полную пропускную способность линии связи. Это касается и оптического приемника, увеличение быстродействия которого приводит к уменьшению чувствительности и сокращению таким образом пропускной способности. В данной работе проводится исследование целесообразности применения методов волнового и временного уплотнения для увеличения пропускной способности ВОСП. Критерием оценки является бюджет мощности системы.

### Теоретический анализ

В работе [1] показано, что значение порога чувствительности для фотоприемника с  $p-i-n$ -фотодетектором определяется следующим выражением:

$$P_{p-i-n} = \frac{A_\lambda}{\eta_m} \sqrt{i_{p-i-n}^2}, \quad (1)$$

где  $A_\lambda = Q_{\text{ош}}(hc/e\lambda)$  — коэффициент, пропорциональный энергии падающего фотона;  $Q_{\text{ош}}$  — параметр, характеризующий вероятность ошибки (в нашем случае  $Q_{\text{ош}}=6,36$ , что соответствует  $P_{\text{ош}}=10^{-10}$ );  $h, c, e$  — физические постоянные ( $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света;  $e$  — заряд электрона);  $\eta_m$  — квантовая эффективность — величина, показывающая эффективность преобразования фотон-электрон, равная для современных фотоприемников  $\eta_m=0,75-0,9$ ;  $\sqrt{i_{p-i-n}^2}$  — среднеквадратичное значение шумового тока приемного модуля с  $p-i-n$ -фотодиодом.

При длине волны  $\lambda=1,3$  мкм коэффициент  $A_\lambda=5,7$  Вт/А и при длине  $\lambda=1,55$  мкм коэффициент  $A_\lambda=4,8$  Вт/А. Энергия падающего излучения, соответствующая одному и тому же фототок, уменьшается с увеличением длины волны.

Мощность шума оптического приемного модуля с  $p-i-n$ -фотодетектором и полевым транзистором на входе можно определить, используя выражение [2]

$$\overline{i_{p-i-n}^2} = 4kT(2\pi C_\Sigma)B^2 \left[ \frac{In_2}{2K} + \frac{In_3(2\pi C_\Sigma)BF_n}{S_m} \right], \quad (2)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура;  $C_\Sigma$  — суммарная емкость фотодиода, предварительного усилителя и монтажа;  $F_n$  — шум-фактор полевого транзистора;  $In_2, In_3$  — интегралы Персона;  $S_m$  — крутизна полевого транзистора;  $K$  — коэффициент, характеризующий глубину интегрирования во входной цепи фотоприемника, (обычно  $K=10-100$ , так как в противном случае усложняется корректирующее устройство оптического приемника). Подставляя (2) в (1) получим зависимость чувствительности оптического приемника от скорости передачи:

$$P_{p-i-n} = \frac{A_\lambda}{\eta_m} \sqrt{4kT(2\pi C_\Sigma)B^2 \left[ \frac{In_2}{2K} + \frac{In_3(2\pi C_\Sigma)BF_n}{S_m} \right]} \quad (3)$$

На рис. 1 приведена кривая расчета чувствительности оптического приемника при следующих параметрах:  $\eta_m=0,8$ ;  $A_\lambda=4,8$  Вт/А;  $C_\Sigma=0,5$  пФ (кривая 1);  $C_\Sigma=1$  пФ (кривая 2);  $In_2=0,55$ ;  $In_3=0,085$ ;  $S_m=35 \cdot 10^{-3}$  см;  $F_n=1,5$ .

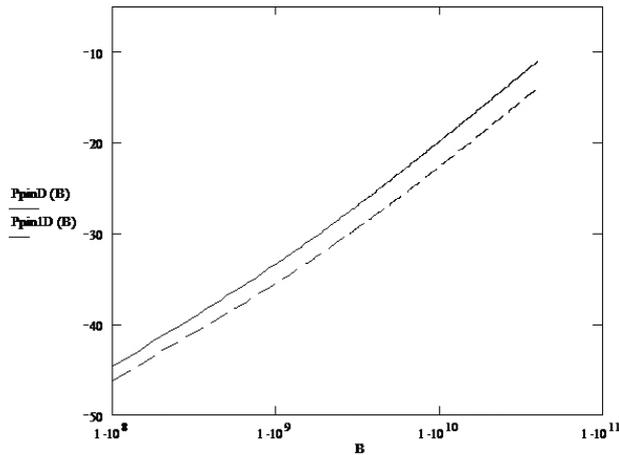


Рис.1. Зависимость чувствительности оптического приемника с  $p-i-n$ -фотодиодом от скорости передачи

Приведенные кривые показывают, что чувствительность оптического приемника с увеличением скорости передачи информации быстро уменьшается, что приводит к уменьшению бюджета системы, который равен разности уровней передающего оптического модуля и чувствительности оптического приемного устройства.

Сущность метода WDM заключается в одновременной передаче по одному волокну независимых сигналов компонентами светового пучка с различными длинами волн разных цветов. Каждая компонента с определенной длиной волны представляет собой отдельный оптический канал передачи информации со своим передатчиком и приемником. Принцип работы WDM-систем поясняет рис.2. Световые сигналы с разными длинами волн, генерируемые несколькими оптическими передатчиками, объединяются мультиплексором и вводятся в оптическое волокно линии связи. При больших расстояниях передачи на линии связи устанавливается один или несколько оптических усилителей. На приемном конце линии связи демультиплексор принимает составной сигнал, выделяет из него исходные компоненты с разными длинами волн и направляет их на соответствующие фотоприемники.



Рис. 2. Структура волоконно-оптической линии связи со спектральным мультиплексированием

Из вышеизложенного видно, что системах с WDM в оптическом канале появляется дополнительные источники потерь — оптические мультиплексор и демультиплексор. Для современных оптических мультиплексоров интерференционного типа величина затухания составляет от 1,5 до 5,2 дБ на канал — в зависимости от количества мультиплексируемых каналов. Затухание мультиплексоров интерференционного типа может меняться также в зависимости от длины волны  $\lambda_m$ , точнее от  $m$  (номера мультиплексируемого канала), что связано с особенностью его устройства [3]. Теоретически значение затухания для оптических мультиплексоров интерференционного типа в зависимости от числа каналов рассчитывается по следующей формуле:

$$\alpha_m = ((0,99^{m-1})0,98)^{-1} \quad (4)$$

где 0,99 — коэффициент отражения от пленки; 0,98 — коэффициент пропускания тонкопленочного фильтра.

На практике значение затухания мультиплексоров интерференционного типа выше. Так для мультиплексора на 4 канала оно может колебаться от 1,8 до 2,5 дБ, для мультиплексора на 32 канала — 4,2 дБ, для мультиплексора на 40 каналов — 5,3 дБ. Достоинство этих мультиплексоров — большое переходное затухание между каналами  $\approx 60$  дБ, малая чувствительность к изменениям температуры, недостатки — сложность изготовления и, как следствие, высокая стоимость. Мультиплексоры решетчатого типа отличаются простотой изготовления, вносимое затухание колеблется от 3 до 4,5 дБ: для 16 каналов — 3 дБ, для 32-х — 4 дБ, для 40 — 4,5 дБ. Недостаток — требуется температурная стабилизация, что увеличивает затраты на эксплуатацию.

Для сравнения временного и волнового уплотнения будем наращивать скорость передачи с  $B_1=2,5$  Гбит/с до  $B_n=40$  Гбит/с с шагом 2,5 Гбит/с, и рассчитывать допустимую величину затухания в оптическом тракте  $\alpha_{p-i-n}$  (бюджет системы) для

- временного мультиплексирования,
- для систем WDM с мультиплексорами интерференционного типа,
- для систем WDM с мультиплексорами решетчатого типа,
- для систем WDM с мультиплексорами интерференционного типа (при условии идеальности их конструкции — теоретический минимум затухания). Результаты сведем в табл. 1–4 соответственно.

Таблица 1. Затухание при временном уплотнении

Скорость передачи, $V_m$ , Гбит/с	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35	37,5	–40
Бюджет системы с TDM, $\alpha_{\text{ин}}$ , дБ при $P_{\text{пер}}=0$ дБ	27,89	23,76	21,26	19,46	18,1	16,9	15,92	15,1	14,31	13,64	13,0	12,46	11,95	11,47	11,03	10,61

Таблица 2. Затухание при уплотнении по длине волны (частотный план CWDM) с применением интерференционных мультиплексоров

Скорость передачи, $V_m$ , Гбит/с	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35	37,5	40
Количество спектрально-уплотняемых каналов $m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Длина волны на которой ведется передача (ITU-T G.694.2 – частотный план CWDM) $\lambda_m$ , мкм	1,29	1,31	1,33	1,35	1,37	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,49	1,51	1,53	1,55	1,57	1,59
Затухание, вносимое мультиплексором и демультимплексором $\alpha_{\text{ин}} \times 2$	2	2	2	2	2,5	2,5	2,5	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
$\alpha_{\text{ин}} \times 2$	4	4	4	4	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7
Чувствительность $P_{\text{прн}}$ дБ	-27,09	-27,15	-27,22	-27,29	-27,35	-27,41	-27,47	-27,54	-27,6	-27,66	-27,71	-27,77	-27,83	-27,89	-27,94	-28
Бюджет системы, $\alpha_{p-i-n}$ , дБ при $P_{\text{пер}}=0$ дБ	23,09	23,15	23,22	23,29	22,35	22,41	22,47	22,54	20,6	20,66	20,71	20,77	20,83	20,89	20,94	21

**Таблица 3. Затухание при уплотнении по длине волны (частотный план CWDM) с применением решетчатых мультиплексоров**

Скорость передачи, $V_m$ , Гбит/с	25	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35	37,5	40
Количество спектрально-уплотняемых каналов $m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Длина волны на которой ведется передача (ITU-T G.694.2 –частотный план CWDM) $\lambda_m$ , мкм	1,29	1,31	1,33	1,35	1,37	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,49	1,51	1,53	1,55	1,57	1,59
затухание, вносимое мультиплексором и демультимплексором $\alpha_m$	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$\alpha_m \times 2$	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Чувствительность $P_{pin}$ , дБ	-27,09	-27,15	-27,22	-27,29	-27,35	-27,41	-27,47	-27,54	-27,6	-27,66	-27,71	-27,77	-27,83	-27,89	-27,94	-28
Бюджет системы, $\alpha_{p-i,m}$ дБ при $P_{nep}=0$ дБ	21,09	21,15	21,22	21,29	21,35	21,41	21,47	21,54	21,6	21,66	21,71	21,77	21,83	21,89	21,94	22

**Таблица 4. Затухание при уплотнении по длине волны (частотный план CWDM) с применением интерференционных мультиплексоров (теоретический предел)**

Скорость передачи, $V_m, V_m$ Гбит/с	25	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35	37,5	40
Количество спектрально-уплотняемых каналов $m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Длина волны на которой ведется передача (ITU-T G.694.2 –частотный план CWDM) $\lambda_m$ , мкм	1,29	1,31	1,33	1,35	1,37	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,49	1,51	1,53	1,55	1,57	1,59
затухание, вносимое мультиплексором и демультимплексором, $\alpha_m$	0,0877	0,131	0,175	0,2186	0,2623	0,306	0,349	0,393	0,436	0,480	0,524	0,567	0,611	0,655	0,698	0,742
$\alpha_m \times 2$	0,175	0,262	0,35	0,437	0,524	0,611	0,699	0,786	0,873	0,961	1,048	1,135	1,223	1,310	1,397	1,484
Чувствительность $P_{pin}$ , дБ	-27,09	-27,15	-27,22	-27,29	-27,35	-27,41	-27,47	-27,54	-27,6	-27,66	-27,71	-27,77	-27,83	-27,89	-27,94	-28
Бюджет системы, $\alpha_{p-i,m}$ дБ при $P_{nep}=0$ дБ	26,92	26,89	26,87	26,85	26,83	26,8	26,77	26,75	26,73	26,7	26,66	26,63	26,60	26,58	26,54	26,52

Для наглядности и сравнения результатов вычислений построим зависимости чувствительности от скорости передачи по данным табл. 1–4 на одной координатной плоскости (рис. 2):

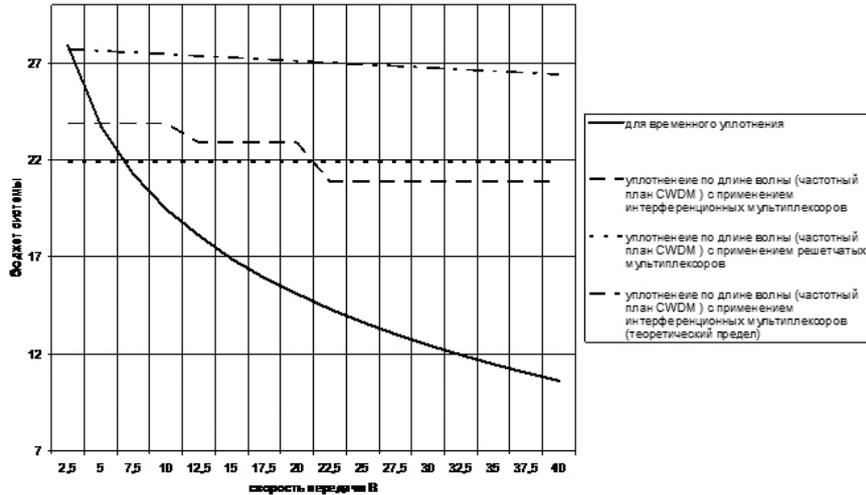


Рис. 3. Зависимость бюджета мощности системы от скорости передачи для систем с WDM и TDM

### Выводы

Анализируя полученные данные, можно сказать, что в высокоскоростных системах применение технологии WDM с точки зрения сохранения бюджета системы (длины участка регенерации) выглядит более перспективно. После скорости 7,5 Гбит/с очевидно преимущество систем с WDM при использовании любого из рассмотренных типов мультиплексоров. Также при улучшении качества интерференционных мультиплексоров и приближении их характеристик к рассчитанным теоретически по (4) (см табл. 4.) преимущество систем с WDM очевидно уже при мультиплексировании 2 каналов (в нашем случае при наращивании скорости передачи от 2,5 до 5 Гбит/с. Таким образом, использование волнового оптического уплотнения целесообразно применять в системах с гигабитной скоростью передачи, так как это обеспечивает не только гибкость и разнородность передаваемой информации, но и больший бюджет системы по сравнению с TDM.

## COMPARISON OF EFFICIENCY OF USE OF WAVE OPTICAL AND TIME MULTIPLEXING OF CHANNELS IN OPTICAL FIBER SYSTEMS

V.N. URYADOV, Y.B. STUNKUS

### Abstract

Comparison of wave and time multiplexing of channels in optical fiber systems of transfer is carried out from the point of view of reduction of the budget of system. It is shown, that wave multiplexing in comparison with system with time multiplexing on p-i-n the photo diode has advantage since speed of transfer to some GB.

### Литература

1. Тсанг У. Техника оптической связи. Фотоприемники: Пер. с англ. / Под ред. М.А. Трищенко. М., 1988.
2. Алишев Я.В., Урядов В.Н. Перспективные информационные технологии в волоконно-оптических сетях телекоммуникаций. Мн., 2003.
3. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. М., 2004.
4. ITU-T Recommendation G.694.2 "Spectral Grids for WDM application "CWDM Wavelength Grid", Jun 2002.
5. Чернов Б.К., Каминецкий И.С. Технология грубого спектрального уплотнения CWDM.
6. Основы построения и перспективы развития. LIGHTWAVE Russian edition 2004. № 2. С. 20–24.