

УДК 681.7.068

Расчет волоконной брэгговской решетки в качестве демультиплексора в мультиплексированной линии связи

Овьян А.П., студентка

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные приборы и системы»*

*Научный руководитель: Хорохоров А.М., к.т.н.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
baryshnikov@bmstu.ru*

Быстрый рост передачи информации по одному одномодовому волокну обеспечивается спектральным уплотнением за счет роста числа одновременно передаваемых информационных каналов на разных несущих длинах волн. Скорость передачи сигналов по единичному каналу ограничивается быстродействием источников и приемников излучения. На сегодняшний день максимальные скорости передачи информации находятся в диапазоне 10-40 Гбит/с. Необходимо отметить, что практическое быстродействие электронных устройств ограничивается скоростями порядка 40 Гбит/с, поэтому дальнейшее увеличение скорости передачи сигналов по одному каналу требует использования оптических методов мультиплексирования, которые многократно увеличивают суммарный поток информации. Это осуществляется благодаря передаче по одному волокну независимых сигналов с разными длинами волн несущих – WDM (Wavelength Division Multiplexing) системы (рис.1). Каждая составляющая с определенной длиной волны представляет собой отдельный оптический канал передачи информации со своим собственным источником и приемником излучения. Информационные каналы не влияют друг на друга, так как передаются на разных несущих, и всегда можно добавить дополнительный канал в линию связи на незанятой длине волны. Такая возможность объединения и разделения информации с разными несущими длин волн основана на принципе суперпозиции (независимости) волн в линейной оптике. При этом надо принять во внимание возрастающую суммарную передаваемую мощность, которая может привести к нелинейным эффектам в волокне, а также к нежелательным перекрестным помехам от соседних каналов [1].

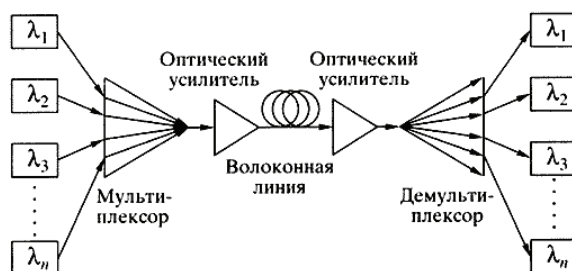


Рис.1. Структура волоконно-оптической линии связи со спектральным мультиплексированием (WDM)

Основным элементом WDM систем является демультиплексор, разделяющий отдельные спектральные каналы по отдельным волоконным трактам. Для волоконных

линий связи таким элементом, легко интегрируемым в волоконный тракт, является брэгговская волоконная решетка (БВР). В WDM системах селекция отдельных спектральных каналов происходит с помощью циркулятора [2,3], в который поступают отраженные от БВР сигналы.

Целью нашей работы является:

– разработка и расчет математической модели брэгговской волоконной решетки (БВР) для использования ее в качестве демультиплексора в мультиплексированной линии связи (WDM) с 44 каналами в оптическом диапазоне длин волн от $\lambda=1530$ нм до $\lambda=1565$ нм. Спектры каждого из отраженных информационных каналов разнесены на 100 ГГц ($\Delta\lambda=0.8$ нм), а ширина каждого информационного канала составляет 0.1 нм.

– Определение и учет величины искажения отраженных от БВР сигналов с введением понятия передаточной функции БВР, а также расчет оптимальной скорости передачи информации.

БВР физически представляет собой оптический интерферометр, встроенный в волокно. В самом простом случае – периодическое изменение показателя преломления в сердцевине одномодового оптического волокна (рис.2).

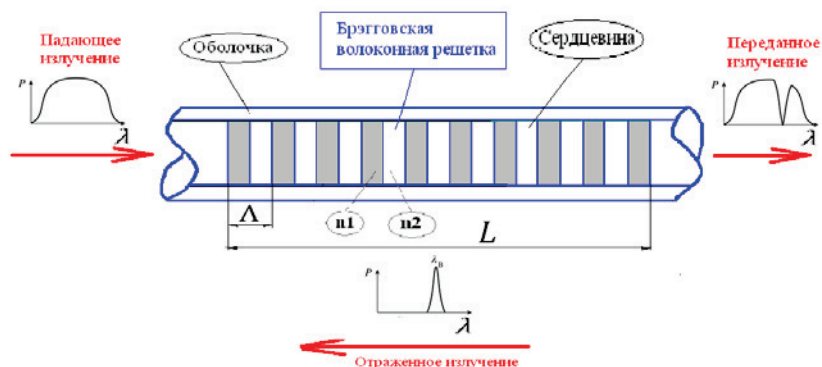


Рис. 2. Однородная брэгговская решетка длиной L с периодом L

Волокна с брэгговскими решетками являются узкополосными оптическими фильтрами, которые отражают излучение с определенной длиной волны и пропускают практически без затухания излучение на всех остальных длинах волн входного спектра сигнала [4,5].

Для расчета параметров БВР нами использовался матричный метод, основанный на теории многослойных непоглощающих оптических структур [6,7]. Этот метод позволил провести анализ 44 однородных БВР, содержащих $N=70000$ слоев с одинаковым перепадом показателей преломления ($n1 - n2 = n_{mod} = 5.29 * 10^{-4}$). Каждая последующая однородная БВР отличается от предыдущей изменением значения периода решетки с шагом $\Delta L = 2.8 * 10^{-10}$ м: $L1 = 5.2948 * 10^{-7}$ м, $L2 = 5.2976 * 10^{-7}$ м, ... $L44 = 5.4198 * 10^{-7}$ м так, что спектры отраженных информационных каналов отстоят друг от друга на 100 ГГц ($\Delta\lambda=0.8$ нм), а ширина каждого информационного канала составляет 0.1 нм.

Схема такой линии связи представлена на рис.3.

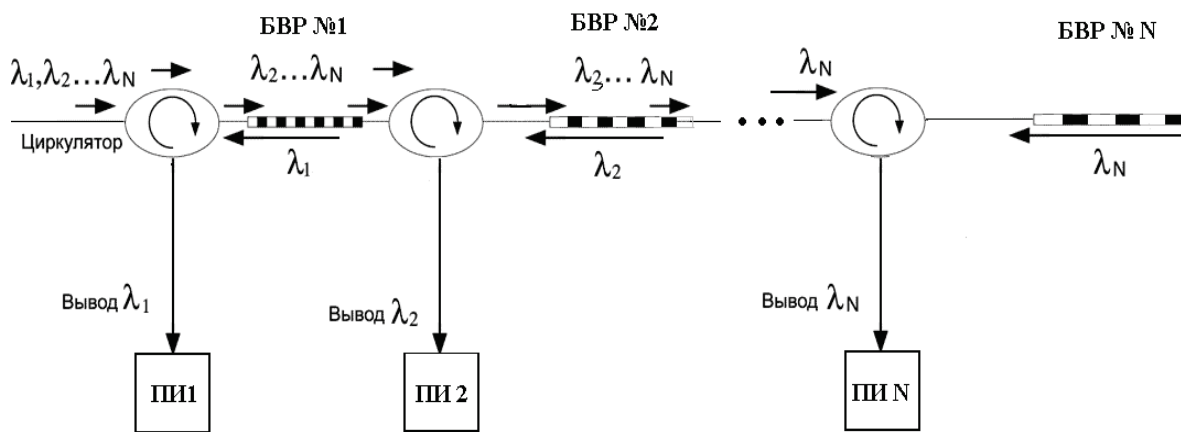


Рис. 3. Схема мультиплексированной линии связи с использованием брэгговских решеток в качестве демультиплексора (ПИ – приемники излучения)

На рис.4 представлен график спектра отражения $|r(\lambda)|^2$ неоднородной БВР, рассмотренной выше.

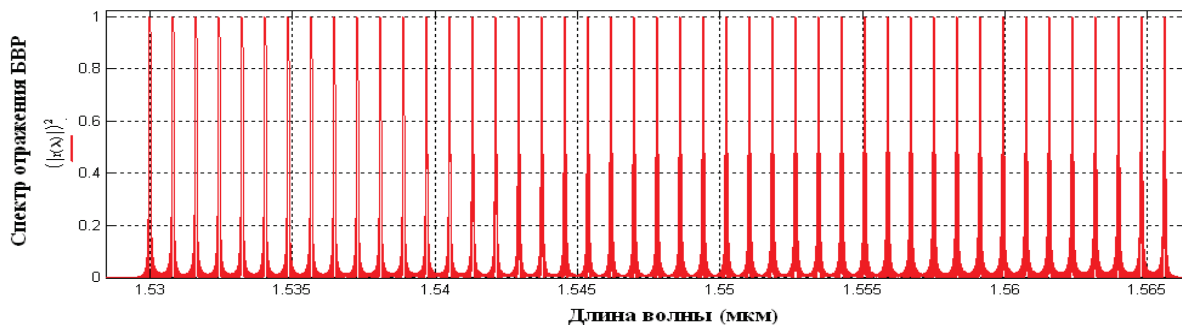


Рис. 4. Спектр отражения БВР для мультиплексированной линии связи (WDM) с 44 каналами с частотным интервалом 100 ГГц ($\Delta\lambda=0.8$ нм) в диапазоне длин волн от $\lambda=1530$ нм до $\lambda=1565$ нм

На рис. 5 представлены спектры отражения первых трех решеток БВР в увеличенном масштабе с указанием ширины спектра канала (излучателя) и величины разнесения каналов.

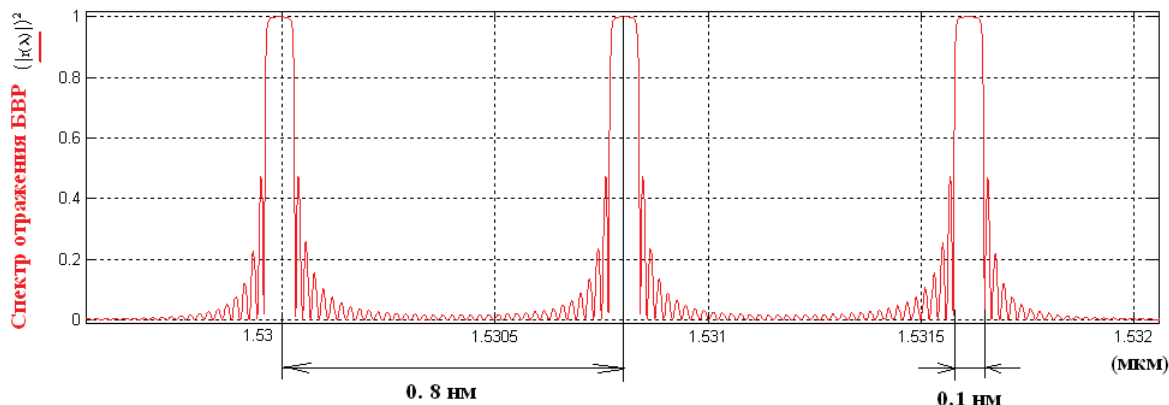


Рис. 5. Спектр отражения первых трех БВР для мультиплексированной линии связи (WDM) с частотным интервалом 100 ГГц ($\Delta\lambda=0.8$ нм)

Фазовая характеристика БВР определяется выражением:
 $\varphi_r(\lambda) = \arctg\left(\frac{\text{Im}(r(\lambda))}{\text{Re}(r(\lambda))}\right)$. Зная зависимость фазы от длины волны, можно определить задержку излучения $\tau(\lambda)$ и дисперсию $D(\lambda)$, вносимую БВР для каждого информационного канала [7]:

$$\tau(\lambda) = \frac{d\varphi}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad D(\lambda) = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\varphi}{d\omega^2},$$

где $r(\lambda)$ – амплитудный коэффициент отражения БВР.

На рис.6 вместе с графиком $|r(\lambda)|^2$ представлен график зависимости задержки $\tau(\lambda)$ отраженного излучения от длины волны. Для первой однородной БВР на $\lambda_{\text{БВР1}} = 1530$ нм задержка минимальна и составляет $\tau_1 \approx 40.9$ пс, для второй однородной на $\lambda_{\text{БВР2}} = 1530,8$ нм задержка составляет $\tau_2 \approx 380$ пс. Данные времена задержки для $\lambda_{\text{БВР1}}$ соответствует длине прохождения излучения $L_1 = \frac{\tau_1 \cdot c}{2 \cdot n_{\text{eff}}} \approx 4.26$ мм, а для $\lambda_{\text{БВР2}}$ соответствует длине прохождения излучения $L_2 = \frac{\tau_2 \cdot c}{2 \cdot n_{\text{eff}}} \approx 40$ мм.

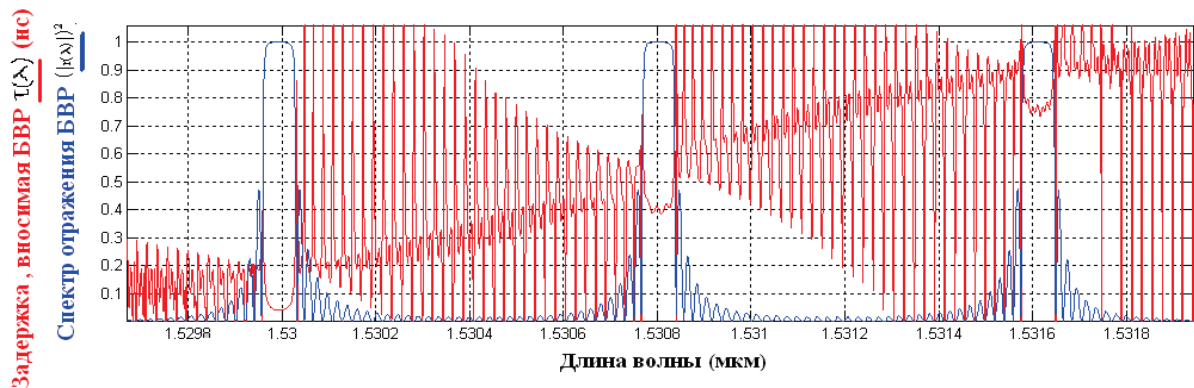


Рис. 6. Спектр отражения БВР (синяя кривая) и задержка, вносимая БВР (красная кривая)

Наиболее важным параметром брэгговской решетки является искажение отраженных сигналов (без учета дисперсии в волоконном тракте). Введем понятие *передаточной функции БВР*, которая характеризуется спектром отражения данной решетки $r(\omega)$. Пусть на вход БВР поступает оптический сигнал, спектр которого идентичен спектру БВР. С учетом введенного понятия передаточной функции спектр сигнала, отраженного от БВР, определяется как $A(\omega) = r(\omega) * r(\omega)$. Тогда отраженный сигнал по времени определяется как Фурье преобразование от $A(\omega)$:
 $A(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\omega) * r(\omega) * \exp(i\omega t) d\omega$. На рис.7 представлены графики функций $|r(\omega)|^2$, $|A(\omega)|^2$ и $|A(t)|^2$ соответственно.

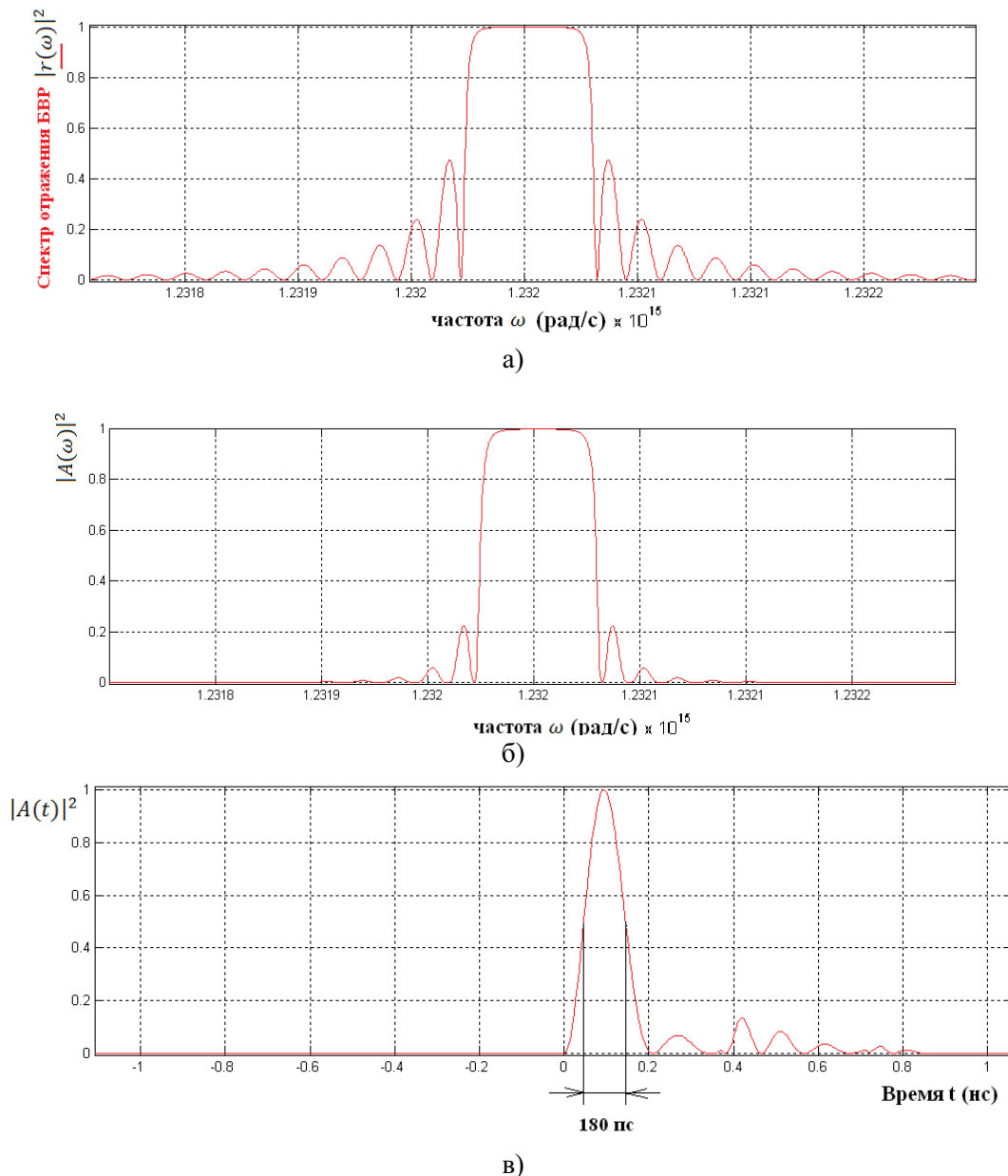


Рис. 7. а) Спектр отражения одной БВР $|r(\omega)|^2$, б) спектр сигнала $|A(\omega)|^2$, в) сигнал $|A(t)|^2$

Рассмотрим WDM линию связи с демультиплексором на основе БВР (рис.3). Рассчитаем длительность отраженных сигналов и скорость передачи информации при поступлении по волоконному тракту на вход БВР гауссовых информационных сигналов различной длительности.

1) Если длительность сигнала, поступающего на БВР, меньше чем длительность сигнала $|A(t)|^2$ (180 пс), то отраженный сигнал уширяется. Это происходит вследствие того, что ширина спектра отраженного сигнала (равная ширине спектра отражения БВР) будет меньше ширины спектра поступающего сигнала. Надо отметить, что часть

спектра поступающего сигнала не отразится и пройдет в прямом направлении БВР, что приведет к энергетическим потерям.

В то же время расчеты показали, что если длительность входного сигнала очень мала (<15 пс по уровню половины интенсивности), то отраженный сигнал остается постоянной величиной ≈ 64 пс.

2) Если длительность сигнала, поступающего на БВР, больше чем длительность сигнала $|A(t)|^2$ (180 пс), то отраженный сигнал не уширяется, а остается равным по длительности поступающему сигналу. Это происходит вследствие того, что ширина спектра поступающего сигнала меньше спектра БВР, следовательно, БВР полностью отражает такой сигнал без энергетических потерь. В результате ширина спектра отраженного сигнала равна ширине спектра поступающего сигнала. Эти результаты представлены красной кривой на рис.8 в виде зависимости длительности отраженного сигнала от длительности падающего гауссова.

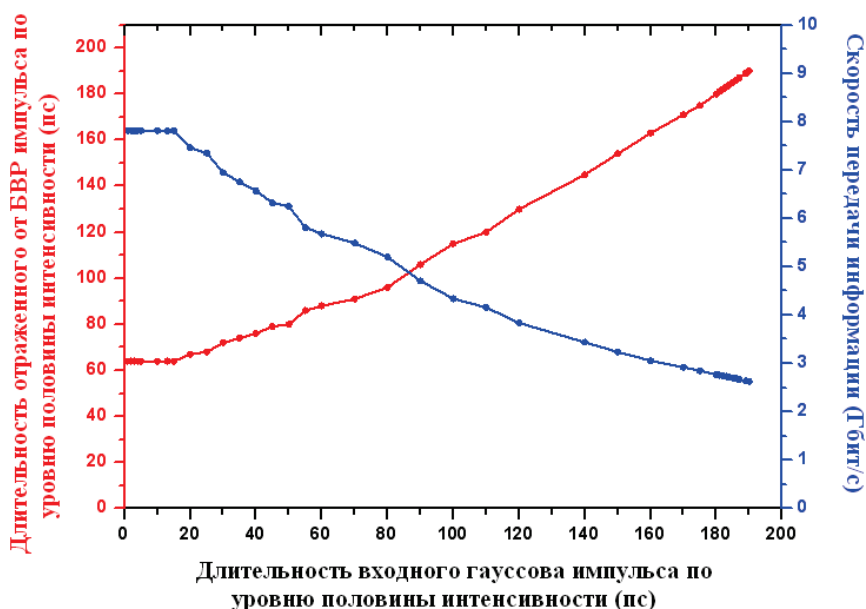


Рис. 8. Зависимость длительности отраженного от БВР импульса от длительности гауссова импульса, поступающего на БВР (красная кривая); зависимость скорости передачи информации от длительности гауссова информационного импульса, поступающего на БВР (синяя кривая)

Определим допустимые (возможные) скорости передачи информации только по одному каналу в WDM линии связи (без учета дисперсии волокна), которые ограничиваются уширением сигнала отраженного от БВР№1. Схема такого узла мультиплексированной линии связи с одной БВР представлена на рис.9.

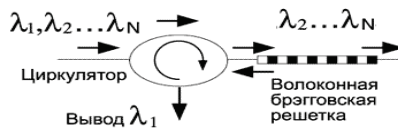


Рис. 9. Участок узла мультиплексированной линии связи с одной БВР

При скважности отраженных битовых сигналов равной двум, скорость передачи информации равна $f \approx \frac{1}{2 \cdot \Delta t_{\text{отр}}} \left[\text{Гбит/с} \right]$, где $\Delta t_{\text{отр}}$ – длительность отраженного сигнала по уровню половины интенсивности. Получена зависимость скорости передачи информации по одному каналу от длительности гауссова импульса, поступающего на БВР по уровню половины интенсивности (синяя кривая), которая представлена на рис.8.

Наиболее оптимальным вариантом передачи информации с точки зрения минимизации энергетических потерь является случай, когда ширина спектра поступающего сигнала равна ширине спектра отражения БВР. В этом случае скорость передачи информации, как следует из расчета и графика, равна $f \approx 3 \left[\text{Гбит/с} \right]$. Учитывая наличие в рассмотренной (рис.3) мультиплексированной линии связи 44 каналов в диапазоне длин волн от $\lambda=1530$ нм до $\lambda=1565$ нм, максимальная скорость передачи информации такой линии составляет $f \approx 3 * 44 = 132 \left[\text{Гбит/с} \right]$.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

- 1) Проведен расчет неоднородной БВР, которую можно использовать в качестве демультиплексора в WDM линиях связи с 44 каналами в оптическом диапазоне длин волн от 1530 нм до 1565 нм. В рассмотренной схеме предусматривается расположение каналов с частотным интервалом 100 ГГц ($\Delta\lambda=0.8$ нм), при ширине каждого информационного канала - 0.1 нм.
- 2) Определена зависимость длительности отраженного от БВР импульса от длительности поступающего на БВР гауссова информационного сигнала.
- 3) Представлена зависимость скорости передачи информации от длительности гауссова информационного импульса, поступающего на БВР по одному каналу. Максимальная скорость мультиплексированной линии связи (с 44 каналами) при минимальных энергетических потерях (без учета дисперсии в волоконном тракте) достигается тогда, когда ширина спектра поступающего сигнала равна ширине спектра отражения одной БВР, что составляет $3 \left[\text{Гбит/с} \right]$ в одном канале и $132 \left[\text{Гбит/с} \right]$ в 44 каналах.

Список литературы

1. Наний О.Е. Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи (WDM) // LIGHTWAVE Russian Edition №2,2004, Высокие Технологии.
2. Jeff Hecht, Understanding Fiber Optics, 2002 circulator
3. Yoji Makiuchi, Hiroshi Matsuura, Development of a Low-Loss Optical Circulator, Furukawa Review, No. 22, 2002. circulator
4. Хорохоров А.М., Оввян А.П. Расчет неоднородных брэгговских волоконных решеток// Наука и Образование 77-48211/447666, 2012, Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.
5. Оввян А.П. Матричная модель расчета брэгговских волоконных решеток// Студенческий Научный вестник, "Студенческая научная весна-2012", Том XII, часть 2, Москва, 2012.
6. Бреховских Л.М., Волны в слоистых средах. М.: НАУКА, 1973.
7. Erdogan T., Fiber Grating spectra. J. Lightwave Technol. 15, 1997.