

УСИЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИЕМА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

Я.В. РОЩУПКИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20 марта 2023

Аннотация. В работе произведено моделирование волоконно-оптической системы передачи с повышенной эффективностью приемного модуля за счет избирательного усиления оптического несущего колебания и трансформации спектра передаваемого сигнала. Обоснована и оценена структура приемного оптического модуля. Определены оптимальные параметры волоконно-оптического усилителя и схем последетекторной обработки сигнала.

Ключевые слова: волоконно-оптическая система передачи, приемный оптический модуль, вынужденное рассеивание Манделъштама-Бриллюэна, оптический усилитель.

Введение

Для повышения отношения сигнал-шум (ОСШ) и как следствие дальности связи в волоконно-оптических системах передачи можно использовать метод избирательного усиления оптической несущей с предварительной трансформацией спектра передаваемого сигнала, который подробно рассматривается в работе [1]. Основой данного метода является усиление несущего колебания принимаемого оптического сигнала при помощи оптического усилителя, который должен обеспечивать усиление только узкой полосы спектра в окрестности несущей. Большинство существующих волоконно-оптических усилителей, в том числе и широко распространенные EDFA, имеют очень широкую полосу усиления, достигающую нескольких терагерц, что неприемлемо для избирательного усиления. Наилучшим образом для данных целей подходит распределенный оптический усилитель на эффекте вынужденного рассеивания Манделъштама-Бриллюэна, который обладает узкой полосой усиления (десятки МГц), значительным коэффициентом усиления (более 30 дБ) и где в качестве усилительной среды выступает сама оптическая линия связи [2].

На передающей стороне требуется осуществить перенос спектра информационного сигнала из области низких частот в область более высоких, с тем чтобы в процессе оптической модуляции создать некоторый защитный интервал между несущей и спектральными составляющими информационного сигнала [3]. Этого можно достичь предварительным переносом информационного сигнала на поднесущую частоту или применением линейного кодирования. Передача на поднесущей не является оптимальным выбором, поскольку ОСШ для приемного устройства с поднесущей в 4 раза меньше ОСШ, которое получается с помощью приемника прямого детектирования и прямой модуляции несущей. Наиболее приемлемым представляется использование линейного кодирования информационного сигнала перед оптической модуляцией, в частности применение линейных кодов вида 1B2B и mBnB [1]. Также может быть использован код RZ, который является де-факто стандартом линейного кодирования в магистральных волоконно-оптических системах передачи. Необходимо отметить, что при использовании кода RZ (как и 1B2B) ширина спектра передаваемого сигнала будет равна удвоенной битовой скорости передачи.

Имитационная модель волоконно-оптической системы передачи

Моделирование производилось с помощью программного пакета OptiSystem компании OptiWave Inc. OptiSystem – это пакет моделирования оптических систем телекоммуникаций, разработанный для проектирования, тестирования и оптимизации каналов практически любого типа на физическом уровне. Симулятор системного уровня, основанный на реалистичном моделировании волоконно-оптических систем телекоммуникаций, OptiSystem обладает мощной средой моделирования и иерархическим определением компонентов и систем. Его возможности можно легко расширить за счет добавления пользовательских компонентов. OptiSystem подходит для широкого спектра приложений, от проектирования сетей CATV/WDM и колец SONET/SDH до проектирования оптических передатчиков, каналов, усилителей и приемников. Он имеет большую базу активных и пассивных компонентов, от простых лазерных диодов и фотодиодов, волокон, разветвителей, аттенуаторов, модуляторов до комплексных передающих и приемных оптических модулей, волоконных усилителей, регенераторов и т.д. Также широко представлены измерительные устройства оптического и электрического диапазонов. Большой набор настраиваемых параметров позволяют пользователю мониторить и оптимизировать конкретные технические характеристики устройств для повышения производительности системы в целом [4].

Имитационная модель волоконно-оптической системы передачи с трансформацией спектра и применением усилителя Мальденштама-Бриллюэна приведена на рис. 1. Система состоит из трех частей: передатчика, приемника и среды передачи.

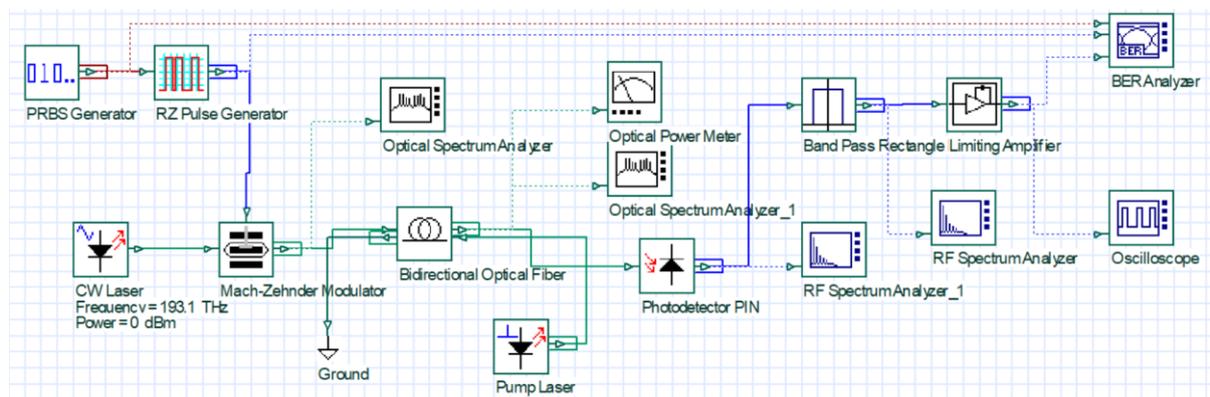


Рис. 1. Модель волоконно-оптической системы передачи

В качестве источника оптического излучения выступает полупроводниковый лазер, работающий в непрерывном режиме с частотой 193,1 ТГц (длина волны 1,55 мкм) и выходной мощностью 0 дБм. Передаваемые данные формируются генератором псевдослучайной последовательности, далее поступают на формирователь импульсов, где кодируются кодом RZ. Битовая скорость потока данных выбрана равной 2,5 Гбит/с. Это обусловлено тем, что частота лазера накачки распределенного усилителя Манделшштама-Бриллюэна должна отличаться от частоты несущего колебания на фиксированную величину, равную частоте смещения Бриллюэна, которая составляет примерно 11 ТГц для современных одномодовых волокон [5]. Если ширина спектра передаваемого сигнала превышает указанную величину, то излучение лазера накачки будет попадать в полосу сигнала, что приведет к существенным искажениям последнего. Несмотря на то, что излучение накачки и полезного сигнала распространяются в противоположных направлениях, влияние будет существенным за счет Рэлеевского обратного рассеяния и нелинейных эффектов в волокне. Для формирования линейного сигнала применен внешний модулятор Маха-Цандера, который производит модуляцию оптического излучения по интенсивности. Средой передачи является одномодовое оптическое волокно с затуханием 0,2 дБ/км. На приемной стороне установлен оптический усилитель Манделшштама-Бриллюэна, представляющий собой лазер накачки с частотой 193,111 ТГц, излучение которого вводится в оптическое волокно навстречу передаваемому сигналу. Усижительной средой является оптическая линия связи, поскольку эффект Бриллюэна возникает в стандартном волокне и не требует специальных волокон в отличие от усилителей EDFA. Оптическое излучение с усиленной

несущей детектируется р-і-п-фотодетектором. Электрический сигнал с выхода детектора проходит через полосовой фильтр. Применение именно полосового фильтра вместо ФНЧ обусловлено необходимостью подавления низкочастотных компонентов, которые подверглись существенному усилению вместе с несущей вследствие хоть и крайне узкой, однако ненулевой полосы усиления, и вызывают нелинейные искажения принятого сигнала. С целью более существенного подавления нелинейных искажений восстановленного цифрового сигнала применен усилитель-ограничитель. Для визуального контроля и измерения параметров передаваемого и применяемого сигнала использовались оптический и электрический анализаторы спектра, осциллограф, измеритель оптической мощности. Оценка эффективности системы в целом применялся анализатор битовых ошибок канала, позволяющий вычислять коэффициент битовых ошибок (BER), а также строить глаз-диаграмму принятого сигнала.

Результаты моделирования

Избирательное усиление оптической несущей можно наблюдать визуально в спектре оптического сигнала на входе фотодетектора, который получен при мощности лазера накачки 0,91 мВт и величине смещения Бриллюэна 11,0 ГГц (рис. 2).

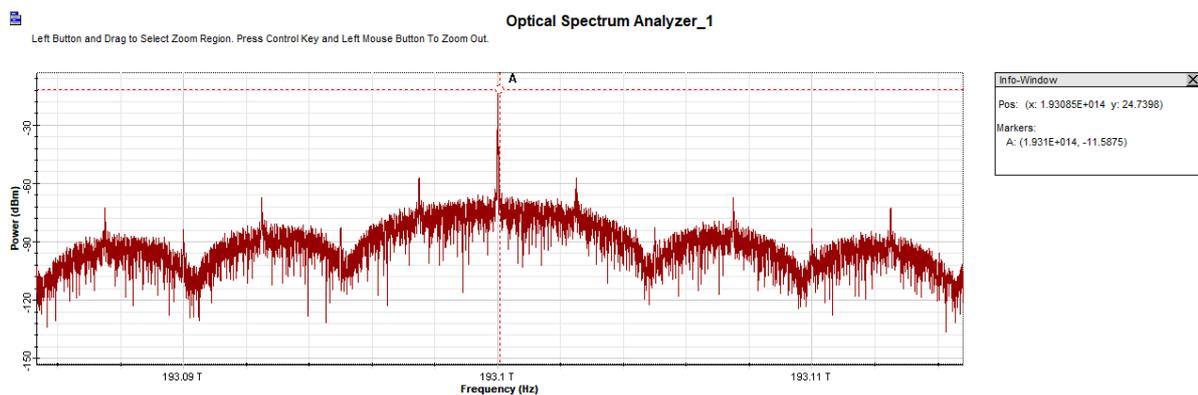


Рис. 2. Оптический спектр сигнала после избирательного усиления

Как можно заметить уровень несущей более чем на 45 дБ превосходит остальные компоненты спектра. Также усиление может быть оценено по измерению оптической мощности на выходе волокна. Зависимость оптической мощности на выходе волокна от мощности лазера накачки, полученная при величине смещения Бриллюэна 11 ГГц и мощности оптического сигнала без усиления $-40,3$ дБм, приведена на рис. 3.

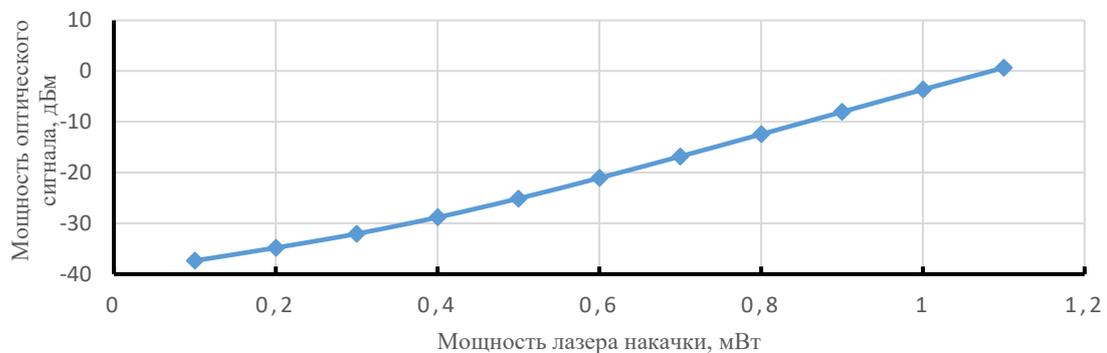


Рис. 3. Зависимость оптической мощности на выходе волокна от мощности лазера накачки

Как видно из графика, мощность сигнала линейно возрастает с ростом мощности лазера накачки. Однако, BER уменьшается с ростом усиления только до определенной мощности, а затем начинает увеличиваться, что может быть объяснено увеличением нелинейных искажений сигнала после детектирования. Зависимости BER и Q-фактора от мощности лазера накачки, полученные при тех же параметрах, приведены на рисунке 4. Можно заметить, что данные зависимости имеют выраженный экстремум, когда Q-фактор принимает свое максимальное

значение, а BER – минимальное. Таким образом можно произвести оптимальный выбор мощности лазера накачки, значение которой составит 0,91 мВт.

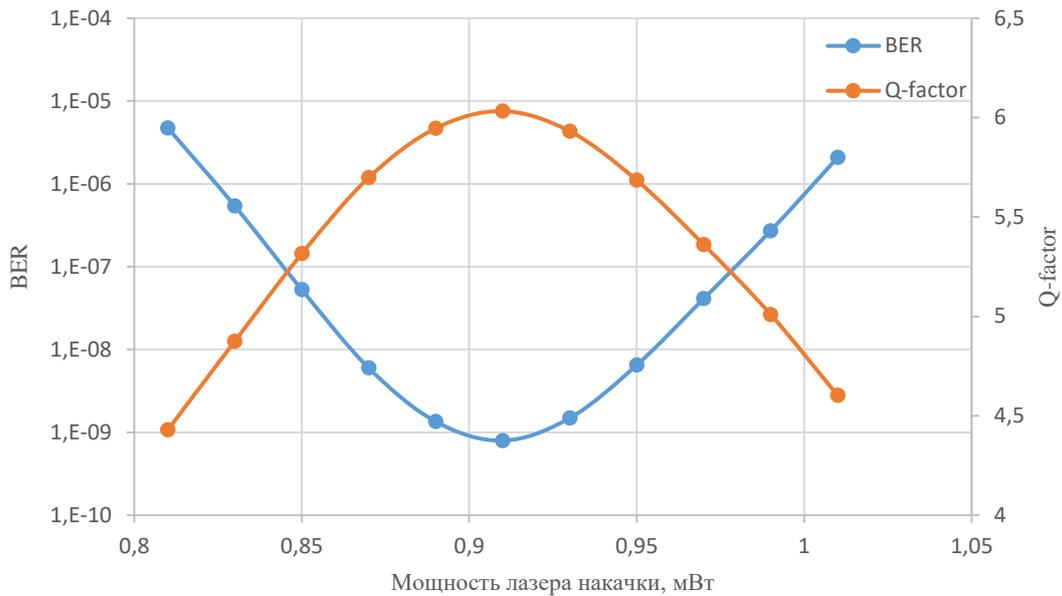


Рис. 4. Зависимость BER и Q-фактора от мощности лазера накачки

Длина оптического волокна и соответственно затухание в линии связи выбраны максимально возможными для обеспечения коэффициента битовых ошибок на более 10^{-9} . При такой длине волокна была измерена оптическая мощность на входе приемного модуля без усиления, которая составила $-40,3$ дБм. Эта величина является чувствительностью приемника, что показывает выигрыш по чувствительности исследуемого приемного модуля по сравнению с приемником без усилителя более чем на 10 дБм [6].

Также было произведено исследование зависимости коэффициента усиления усилителя от величины смещения Бриллюэна. График данной зависимости при мощности лазера накачки 0,91 мВт, длине оптического волокна 170 км и мощности оптического сигнала на выходе волокна $-40,3$ дБм приведена на рисунке 5. Наибольшее усиление было получено при величине смещения Бриллюэна 11 ГГц, что соответствует [5]. Максимальный коэффициент усиления при допустимом BER ($<10^{-9}$) составил 32,7 дБ.

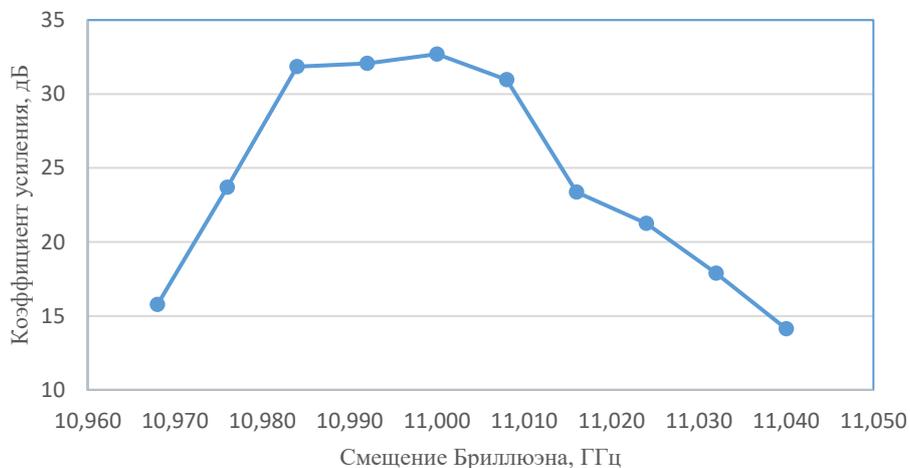


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления усилителя от величины смещения Бриллюэна

Существенную роль в восстановлении электрического сигнала и получении требуемого BER играет полосовая фильтрация. Были исследованы зависимости BER и Q-фактора

восстановленного сигнала от ширины полосы пропускания полосового фильтра, которая приведена на рис. 6. Видно, что максимальное значение Q-фактора и минимальное значение BER достигается при ширине полосы пропускания фильтра равной 2,4 ГГц.

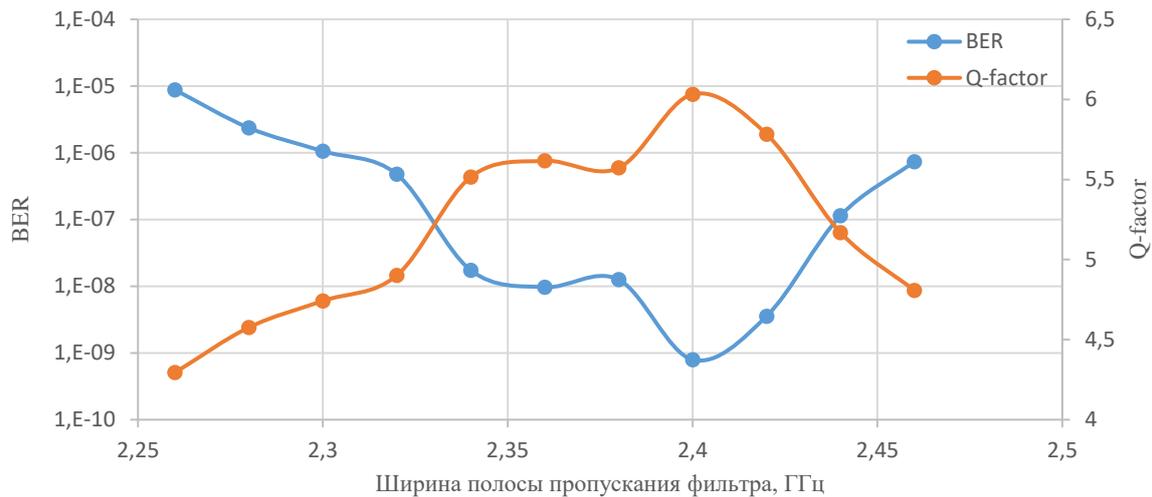


Рис. 6. Зависимость BER и Q-фактора от ширины полосы пропускания полосового фильтра

На рис. 7 приведена глаз-диаграмма электрического сигнала на выходе приемного оптического модуля и результат измерения BER при мощности лазера накачки 0,91 мВт, длине оптического волокна 170 км, мощности оптического сигнала на выходе волокна $-40,3$ дБм, величине смещения Бриллюэна 11 ГГц, коэффициенте усиления 32,7 дБ.

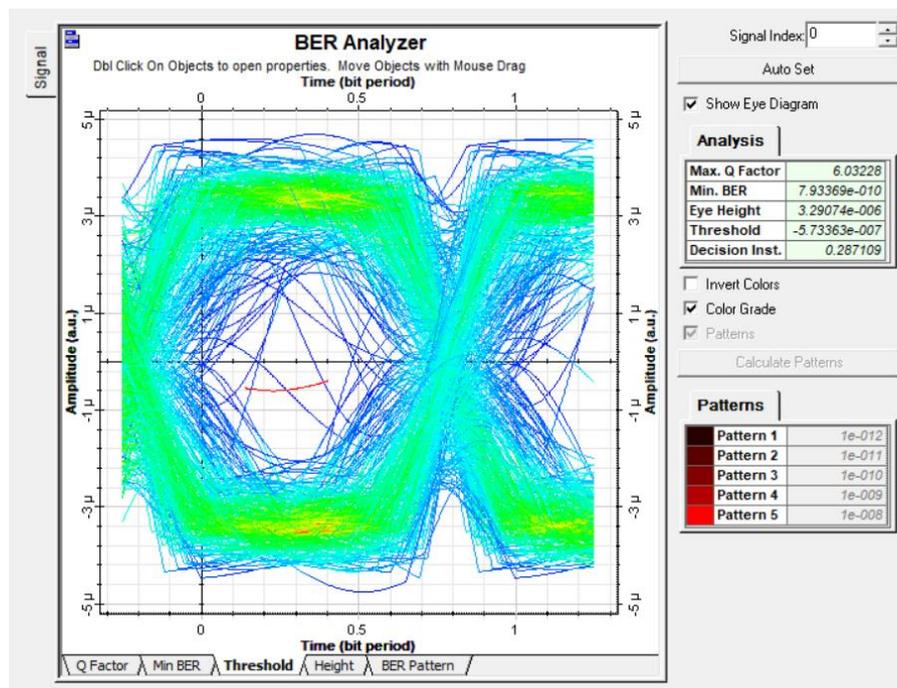


Рис. 7. Глаз-диаграмма электрического сигнала на выходе приемного оптического

Заключение

В результате моделирования волоконно-оптической системы передачи с избирательным усилением оптического несущего колебания и трансформацией спектра линейного сигнала получены следующие результаты. Определен оптимальный уровень мощности лазера накачки волоконно-оптического усилителя Манделъштама-Бриллюэна для обеспечения минимального BER, который составил 0,91 мВт. Показано, что коэффициент усиления при это составил 32,7 дБ,

что соответствует теории [2]. Получена чувствительность исследуемого приемного оптического модуля, равная $-40,3$ дБм, что соответствует теоретическим расчетам [1]. Разработана структура последетекторной части приемного модуля, которая отличается использованием полосового фильтра и усилителя-ограничителя.

OPTICAL CARRIER AMPLIFICATION TO IMPROVE THE RECEIVER EFFICIENCY IN FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS

Y.V. ROSHCHUPKIN

Abstract. A simulation of the fiber-optic communication system with increased efficiency of the optical receiver due to selective amplification of the optical carrier and the transmit signal spectrum transformation was carried out. The structure of the optical receiver module was substantiated and evaluated. The optimal parameters of the fiber-optic amplifier and post-detection processing circuits were determined.

Keywords: fiber-optic communication systems, optical receiver module, stimulated Brillouin scattering, optical amplifier.

Список литературы

1. Урядов В.Н., Рощупкин Я.В., Бунас В.Ю. и др. // Докл. БГУИР. 2015. № 8 (94). С. 11–16.
2. Yeniai A., Delavaux J.-M., Toulouse J. // J. Lightwave Technol. 2002. Vol. 20. № 8. P. 1425–1432.
3. Урядов В.Н., Рощупкин Я.В., Бунас В.Ю. и др. // Докл. БГУИР. 2016. № 4 (98). С. 10–14.
4. Khadir A. A., Dhahir B. F., Fu X. // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2014. Vol. 3, Iss. 6, P. 42 – 53.
5. Фриман Р. Волоконно-оптический системы связи. Пер. с англ. под ред. Н. Н. Слепова. М.: Техносфера, 2003.
6. Урядов В.Н., Стункус Ю.Б. // Докл. БГУИР. 2006. № 3 (15). С. 48–53.