

ПРИМЕНЕНИЕ ПИЛОТ-СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

Я.В. РОЩУПКИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 апреля 2025

Аннотация. В работе произведено моделирование волоконно-оптической системы передачи, реализующей метод передачи оптических сигналов, основанный на введении в спектр сигнала дополнительной однотональной компоненты – пилот-сигнала и его узкополосном усилении на приеме. Определены оптимальные параметры узкополосного волоконного усилителя и схем последетекторной обработки сигнала.

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

Введение

Для повышения энергетической эффективности оптических систем передачи применяются когерентные методы приема, альтернативой которым является использование авто-когерентного метода, когда принимаемый оптический сигнал детектируется путем смешения не с излучением местного гетеродина, а с особой составляющей – пилот-сигналом, передаваемым вместе с информационным сигналом и выделяемым на приемной стороне. В этом случае существенно упрощается приемный оптический модуль, поскольку не требуются технически сложные устройства стабилизации частоты и фазы местного гетеродина. Недостатком такого подхода являются затраты энергии на передачу пилот-сигнала большой мощности, что в конечном итоге не позволяет добиться существенного улучшения энергетической эффективности. С целью преодоления данного недостатка может быть использовано узкополосное усиление на приемной стороне передаваемого пилот-сигнала малой мощности. Необходимо использование оптического усилителя, который будет обеспечивать усиление только узкой полосы спектра в окрестности пилот-сигнала. Большинство существующих волоконно-оптических усилителей 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 Мандельштама-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 [1]. Метод построения волоконно-оптической системы передачи с введением пилот-сигнала на стороне передачи и его избирательным усилением на приеме подробно рассматривается в работе [2].

На передающей стороне в спектр информационного сигнала перед модуляцией оптической несущей вводится однотональный сигнал с частотой f_d , превышающей верхнюю частоту информационного сигнала. В результате модуляции в спектре оптического сигнала помимо информационных составляющих появятся две дополнительные составляющие с частотами $f_c \pm f_d$, где f_c – частота несущего колебания. В волокне со стороны приема производится избирательное усиление составляющей с частотой $f_c + f_d$. Далее сформированный таким образом сигнал подается на вход фотодетектора.

Данный приемный оптический модуль функционирует по принципу гетеродинного приемника, а в качестве сигнала местного гетеродина выступает усиленная составляющая ($f_c + f_d$).

Значительный коэффициент усиления позволяет получить существенное увеличение мощности этой составляющей. На выходе фотодетектора будет получен информационный сигнал на поднесущей частоте $f_n = f_d$. Частота лазера накачки усилителя не будет попадать в полосу информационного сигнала, поэтому метод может быть использован для любых скоростей передачи.

Для оценки эффективности применения данного метода необходимо произвести его имитационное моделирование.

Имитационная модель волоконно-оптической системы передачи

Моделирование производилось с помощью программного пакета OptiSystem компании OptiWave Inc. OptiSystem – это инновационный 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. OptiSystem подходит для широкого спектра приложений, включающих в себя проектирование 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 [3].

Имитационная модель волоконно-оптической системы передачи с введением пилот-сигнала на стороне передачи и его избирательным усилением на приеме приведена на рис. 1.

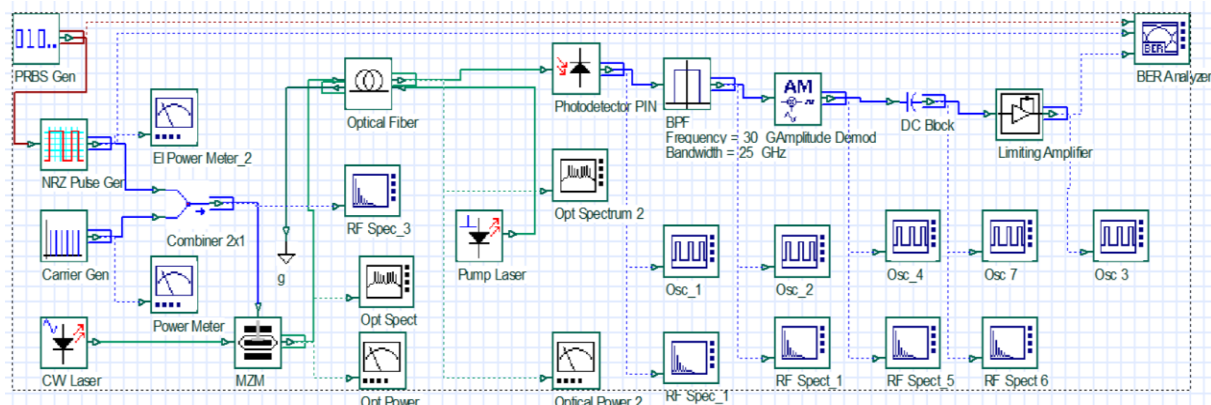


Рис. 1. Модель волоконно-оптической системы передачи

Бинарные данные формируются генератором псевдослучайной последовательности и далее поступают на формирователь импульсов, где преобразуются в электрический сигнал в формате NRZ. Битовая скорость данных выбрана равной 10 Гбит/с. Далее полезный сигнал суммируется с пилот-сигналом, представляющим собой гармонический сигнал постоянной амплитуды с частотой 30 ГГц. Частота пилот-сигнала должна как минимум в два раза превышать верхнюю граничную частоту спектра полезного сигнала [2]. Выбор значения 30 ГГц обусловлен необходимостью создать защитный интервал между копиями спектра, что смягчит требования к прямоугольности полосового фильтра в приемном оптическом модуле. В результате получится электрический сигнал, амплитудный спектр которого приведен на рис. 2.

В качестве источника оптического излучения используется полупроводниковый лазер, работающий в непрерывном режиме с частотой 193,1 ТГц (длина волны 1,55 мкм) и выходной мощностью 0 дБм. Для формирования линейного сигнала применен внешний модулятор Маха-Цандера, который производит модуляцию оптического излучения по интенсивности. Модулирующим сигналом является сумма информационного сигнала и пилот-сигнала.

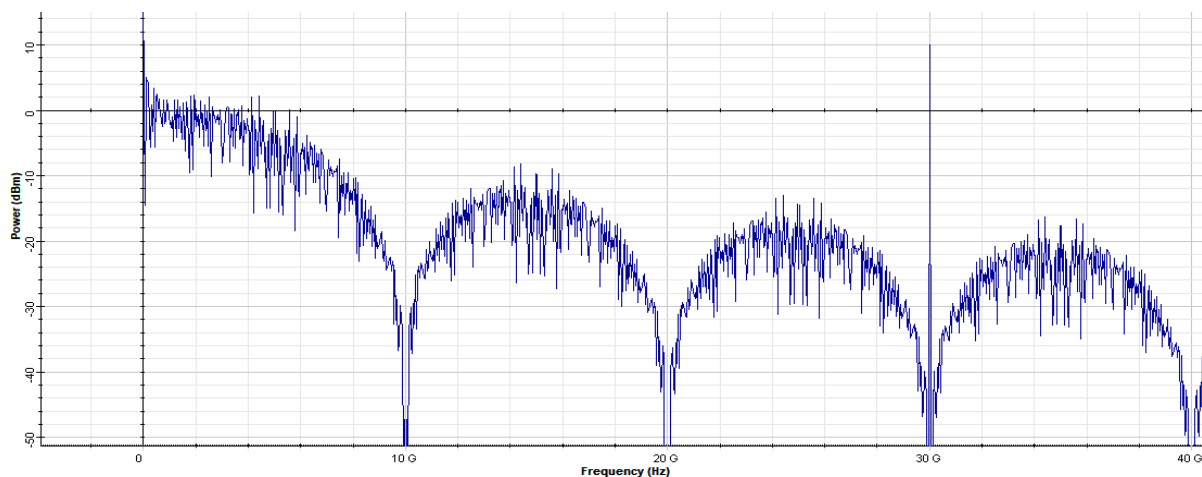


Рис. 2. Спектр сигнала на выходе сумматора электрических сигналов

Спектр оптического сигнала, помимо информационных составляющих и несущей, будет содержать две компоненты, соответствующие пилот-сигналу, с частотами 193,13 ТГц и 193,07 ТГц. Спектр линейного оптического сигнала приведен на рис. 3.

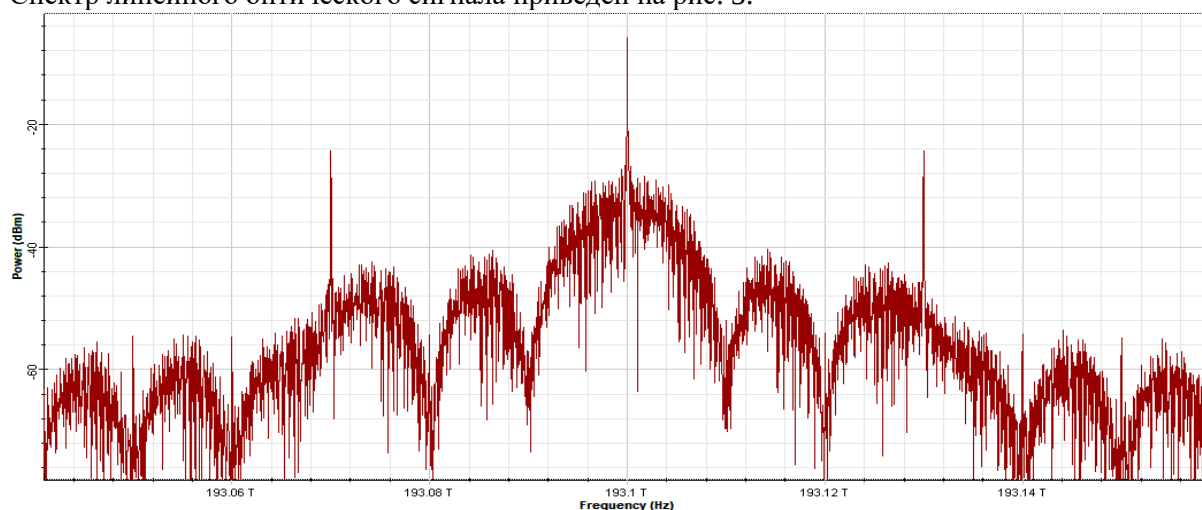


Рис. 3. Спектр линейного оптического сигнала

Модулированное оптическое излучение передается в одномодовом оптическом волокне с затуханием 0,2 дБ/км. На стороне приема применяется распределенный усилитель Мандельштама-Бриллюэна, состоящий из оптического ответвителя и лазера накачки с частотой 193,141 ТГц, излучение которого вводится в оптическое волокно навстречу передаваемому сигналу. Усилительной средой является оптическая линия связи. Частота лазера накачки (193,141 ТГц) на величину смещения Бриллюэна (11 ГГц) превышает частоту компоненты оптического спектра, соответствующей пилот-сигналу (193,13 ТГц), в результате чего производится её избирательное усиление. Таким образом, частота лазера накачки превышает верхнюю граничную частоту спектра оптического сигнала и не попадает в полосу, занимаемую информационным сигналом, что снимает ограничение на ширину спектра информационного сигнала, характерное для усиления оптической несущей [4].

Результаты моделирования

С целью выбора мощности лазера накачки, были произведены исследования зависимости мощности спектральной компоненты, соответствующей пилот-сигналу и результирующего коэффициента ошибок (BER) от мощности лазера накачки. Зависимость уровня спектральной компоненты, соответствующей пилот-сигналу, усиленной распределенным усилителем, от мощности лазера накачки представлена на рис. 4. Зависимость коэффициента ошибок (BER) от мощности лазера накачки приведена на рис. 5.

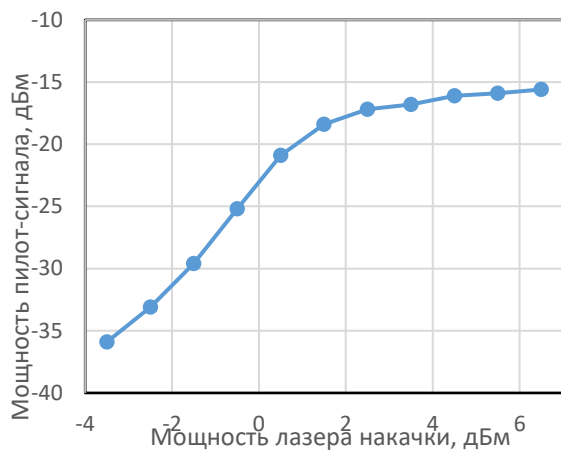


Рис. 4. Зависимость мощности пилот-сигнала от мощности лазера накачки

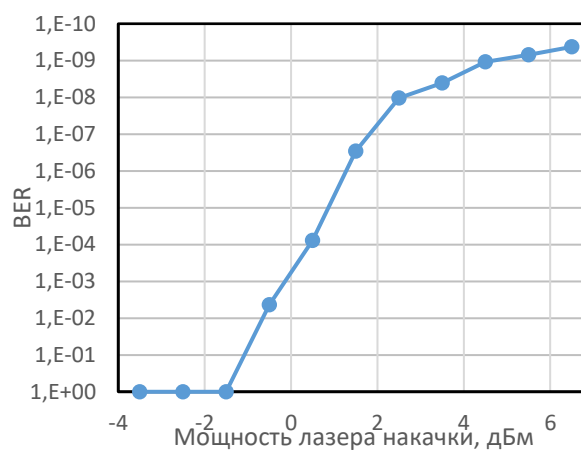


Рис. 5. Зависимость BER от мощности лазера накачки

Из анализа графиков (рис. 4, 5) можно сделать вывод, что мощность пилот-сигнала растет нелинейно с ростом мощности лазера накачки, а коэффициент ошибок, соответственно, уменьшается. Усиление, близкое к максимальному (около 30 дБ) достигается при мощностях лазера накачки более 2 дБм и при дальнейшем росте мощности увеличивается незначительно. Коэффициент битовых ошибок при этом достигает своих минимальных значений.

Уровень пилот-сигнала на приемной стороне без усиления (при выключенном лазере накачки) составлял $-46,8$ дБм и увеличился до $-15,6$ дБм при мощности лазера накачки 6,5 дБм, таким образом коэффициент усиления усилителя составил 31,2 дБ.

Спектр оптического сигнала на входе фотодетектора с усиленной компонентой, соответствующей пилот-сигналу приведен на рис. 6.

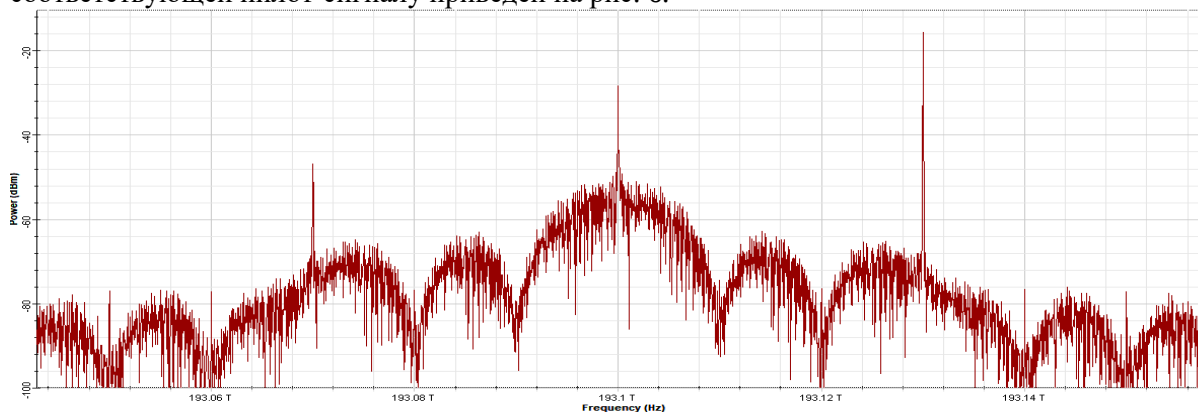


Рис. 6. Спектр оптического сигнала на входе фотодетектора

Оптическое излучение с усиленной спектральной компонентой детектируется p-i-n-фотодетектором. В результате биений в квадратичном детекторе с усиленным пилот-сигналом, информационные составляющие спектра переносятся в окрестность промежуточной частоты, равной частоте пилот-сигнала (30 ГГц) и также подвергаются усилению. Спектр электрического сигнала на выходе фотодетектора представлен на рис. 7.

Далее электрический сигнал проходит через полосовой фильтр с центральной частотой 30 ГГц и полосой 20 ГГц для выделения информационного сигнала на промежуточной частоте. Демодуляция с промежуточной частоты выполняется синхронным демодулятором, после которого устанавливается фильтр нижних частот для уменьшения влияния высокочастотных шумовых составляющих.

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 производилась при помощи анализатора битовых ошибок канала, позволяющего вычислять коэффициент битовых ошибок (BER).

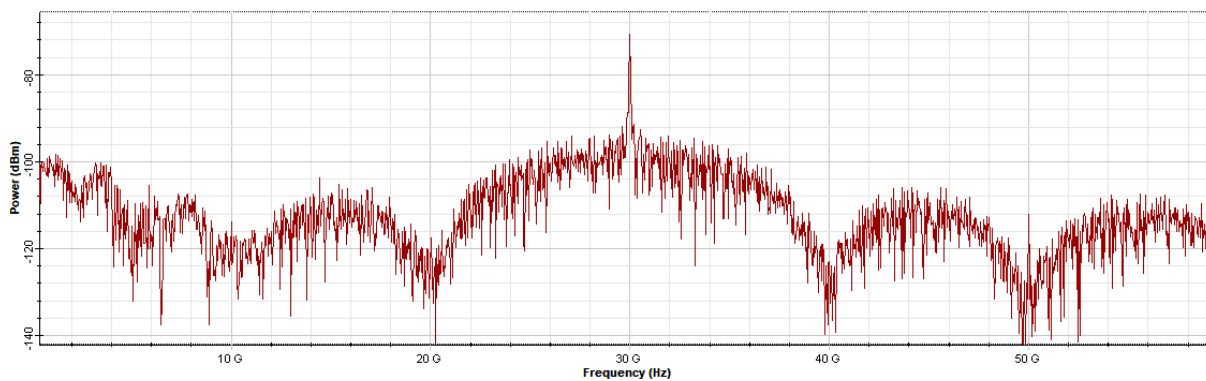


Рис. 7. Спектр электрического сигнала на выходе фотодетектора

Длина линии связи соответствует максимально возможному затуханию, когда коэффициент битовых ошибок не превышал 10^{-9} . В результате измерений при коэффициенте битовых ошибок $9,11 \cdot 10^{-10}$ оптическая мощность на входе приемного модуля без усиления составила $-26,25$ дБм. Эта величина является чувствительностью приемника, которая демонстрирует выигрыш по чувствительности исследуемого приемного модуля по сравнению с приемником прямого фотодетектирования на ~ 3 дБм, как и было теоретически показано в [2].

Заключение

В результате моделирования волоконно-оптической системы передачи, реализующей метод передачи оптических сигналов, основанный на введении в спектр сигнала дополнительной однотональной компоненты – пилот-сигнала и его усилении на приеме. Определено, что усиление распределенного усилителя Мандельштама-Бриллюэна, близкое к максимальному (около 30 дБ), достигается при мощностях лазера накачки более 2 дБм и при дальнейшем росте мощности увеличивается незначительно. Получена чувствительность исследуемого приемного оптического модуля, равная $-26,3$ дБм при скорости передачи 10 Гбит/с и коэффициенте битовых ошибок не хуже 10^{-9} , что соответствует теоретическим расчетам [2].

APPLICATION OF PILOT-SIGNAL TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS

Y.V. ROSHCHUPKIN

Abstract. A simulation of the fiber-optic communication system implementing a method of optical communications based on the insertion in the signal spectrum of additional single-tone components – a pilot-signal and its narrow-band amplification at the receiver was carried out. The structure of the optical receiver module was substantiated and evaluated. The optimal parameters of the distributed fiber amplifier and post-detection processing circuits were determined.

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

Список литературы

1. Yeniy A., Delavaux J.-M., Toulouse J. // J. Lightwave Technol. 2002. Vol. 20. № 8. P. 1425–1432.
2. Урядов В.Н., Рошчупкин Я.В., Зеленин А.С. и др. // Электросвязь. 2018. № 9. С. 61–66.
3. Khadir A. A., Dhahir B. F., Fu X. // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2014. Vol. 3, Iss. 6, P. 42 – 53.
4. Урядов В.Н., Рошчупкин Я.В., Бунас В.Ю. и др. // Докл. БГУИР. 2015. № 8 (94). С. 11–16.