

Исследования нелинейных воздействий при передаче QAM-сигнала в волоконно-оптических линиях связи с использованием различных несущих импульсов

О.С.Сидельников, А.С.Скидин, М.П.Федорук

Исследована передача сигнала с квадратурно-амплитудной модуляцией по волоконно-оптической линии связи для различных несущих импульсов, формирующих сигнал. Показано, что при использовании импульсов типа «приподнятый косинус» и «корень из приподнятого косинуса» можно дополнительно снизить на порядок частоту битовых ошибок за счет применения специального модуляционного формата.

Ключевые слова: оптическое волокно, нелинейные эффекты, WDM-сигнал, несущие импульсы.

1. Введение

При рассмотрении современных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) достаточно важным является вопрос о способах формирования передаваемого сигнала, поскольку от того, как будет сформирован сигнал, во многом зависит величина и характер искажений, с которыми он будет передан. Сама по себе зависимость искажений сигнала от его характера обусловлена нелинейными воздействиями на сигнал [1], которые связаны с особенностями физической природы волоконных световодов. Из основных характеристик формирования сигнала следует выделить количество частотных составляющих сигнала (WDM-каналов) и их распределение по частотному диапазону, формы несущих импульсов, а также используемые форматы модуляции для передачи данных. Отдельно стоит отметить возможность варьировать содержание передаваемых данных, поскольку оно, строго говоря, также оказывает влияние на качество передачи информации [2]. Таким образом, используя данные характеристики, можно на стороне передатчика найти способ формирования сигнала для максимизации использования полосы пропускания линии, а на стороне приемника оптимизировать прием с учетом конкретных характеристик линии, чтобы при максимально возможной скорости передачи информации сохранить приемлемое качество приема, обеспечивающее (с использованием алгоритмов коррекции ошибок) уровень частоты (коэффициента) битовых ошибок BER $\approx 10^{-9} - 10^{-12}$.

В настоящей работе рассматривается влияние формы несущего импульса на статистику ошибок [2–4], а также исследуется потенциал снижения искажений при использовании адаптивной модуляции сигнала [2, 5, 6], которая может быть применена в режиме реального времени для подстройки на оптимум передачи данных. При передаче

оптических сигналов по волоконно-оптическим линиям связи использован квадратурно-амплитудный формат модуляции 16-QAM. В ходе работы выполнен анализ битовых и символьных ошибок в высоконелинейном режиме. Основным методом исследования является математическое моделирование.

2. Математическое моделирование

Используемая в работе система передачи данных схематически изображена на рис.1. Она состоит из 10 пролетов по 100 км каждый. На передатчике Tx формируются 16-QAM-сигналы с частотой следования символов R_s (варьируемой от 10 до 100 Гбод) и различной формой импульсов. Шум, вызванный EDFA-услителем, добавляется к оптическому сигналу после каждого усилителя в конце пролета. В приемнике Rx оптический сигнал вначале проходит через полосовой фильтр (BPF) с полосой пропускания BW_{BPF} для очистки от шумов. После этого в приемнике осуществляется идеальная компенсация хроматической дисперсии и нелинейного фазового сдвига.

При математическом моделировании распространения сигнала по оптическому волокну использовалось нелинейное уравнение Шредингера (НУШ), которое описывает эволюцию медленно меняющейся огибающей оптического сигнала $A(z, t)$:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\sigma|A|^2A,$$

где α – оптические потери в волокне ($\alpha = 0.2$ дБ/км); β_2 – хроматическая дисперсия ($\beta_2 = -25$ пс²/км); σ – нелинейный параметр волокна ($\sigma = 1.4$ Вт⁻¹ · км⁻¹). Данное уравнение решалось численно с помощью симметричного метода Фурье-расщепления по физическим процессам. Для моделирования использовались следующие параметры:



Рис.1. Схема исследуемой линии связи

О.С.Сидельников, А.С.Скидин, М.П.Федорук. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6; e-mail: o.s.sidelnikov@gmail.com, ask@skidin.org

Поступила в редакцию 16 октября 2017 г.

количество отсчетов на период $q = 16$, число символов $N_s = 2^{18}$, длина волны $\lambda = 1550$ нм, коэффициент шума усилителя $NF = 4.5$. Для получения статистически достоверных результатов было передано 100 символьных последовательностей длиной 2^{18} символов. Таким образом, общее число 16-QAM-символов составило 2.62×10^7 .

Для проведения анализа в работе использовались импульсы типа «приподнятый косинус» (raised cosine, далее – RC-импульс), «корень из приподнятого косинуса» (root raised cosine, далее – RRC-импульс), гиперболический секанс (Sech-импульс), а также гауссов (G) и прямоугольный (Rect) импульсы. Для получения достоверных результатов параметр длительности импульса подбирался таким образом, чтобы сигналы всех использованных форм имели одинаковую полуширину спектра. При проведении численных экспериментов для различных форм импульсов важную роль играет ширина полосы пропускания BW_{BPF} полосового фильтра, необходимого для оптимального детектирования полученного сигнала; эта величина определялась как отношение BW_{BPF}/R_s , и для каждого вида импульса проводилась отдельно оптимизация ширины полосы пропускания, при которой после прохождения сигнала по линии наблюдалась минимальная величина битовых ошибок BER.

3. Исследование искажений сигнала для различных форм импульсов

На рис.2 изображена зависимость BER от начальной мощности сигнала для импульсов различной формы. Как следует из рисунка, сигнал в виде RRC-импульса обладает минимальным значением BER по сравнению с импульсами других форм. Здесь стоит отметить, что в целом качество передачи связано с шириной спектра, занимаемого импульсом: так, прямоугольный импульс обеспечивает наихудшее качество передачи данных среди всех рассмотренных импульсов, занимая при этом широкий спектр. Что касается RC- и RRC-импульсов, то при их рассмотрении коэффициент сглаживания полагался равным 0.2, поскольку предварительные результаты показали, что при варьировании коэффициента сглаживания зависимость BER от начальной мощности сигнала претерпевает лишь незначительные изменения, и поэтому в нашем случае данной зависимостью можно пренебречь.

Помимо простого влияния формы импульса на частоту ошибок BER, исследовалось также распределение данных ошибок по различным дискретным состояниям формата модуляции 16-QAM [6]. Все состояния разделены по мощности сигнала. Сигнальное созвездие формата 16-QAM имеет прямоугольную форму, и все его дискретные состояния находятся на трех концентрических окружностях, которым соответствуют мощности p (состояния наименьшей мощности, внутренняя окружность, IC), $5p$ (состояния средней мощности, средняя окружность, MC) и $9p$ (состояния, которым соответствует максимальная мощность, внешняя окружность, OC).

Полученные распределения частот ошибок по окружностям с разными мощностями для различных видов импульсов отличаются незначительно. На рис.3 показана зависимость частоты символьных ошибок (SER) от скорости передачи символов для RC-импульса. Как видно из рисунка, символы с внешней окружности, имеющие большую мощность, вследствие нелинейных воздействий подвергаются большему искажению по сравнению с симво-

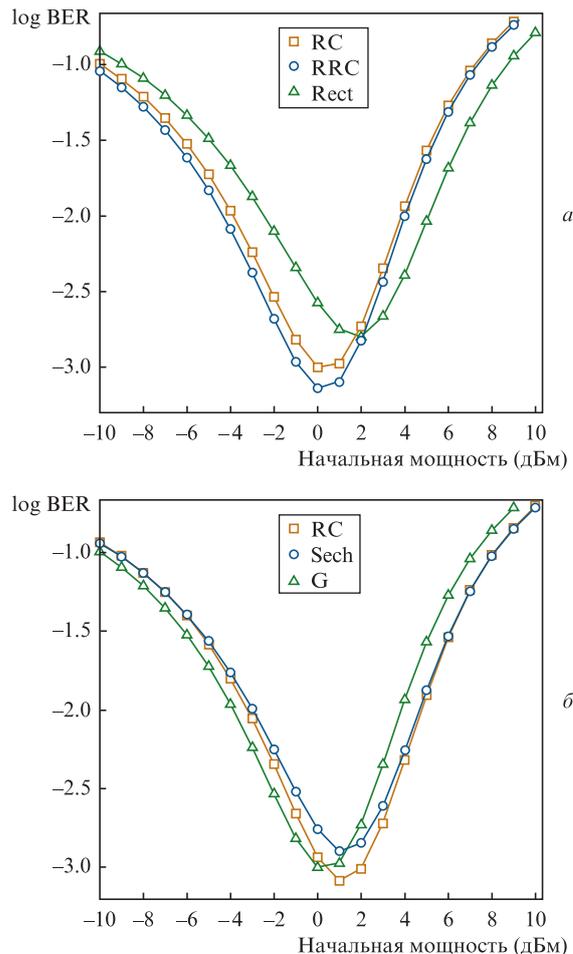


Рис.2. Сравнение частоты символьных ошибок для сигналов, сформированных с использованием импульсов различной формы.

лами меньшей мощности. При этом распределение зависит от символьной скорости, поскольку с ее ростом уменьшается длительность импульса и, соответственно, дисперсионная длина, т.е. при больших R_s дисперсия сильнее действует на сигнал, расширяя его и уменьшая интенсивность в некоторых точках, а значит, нелинейность

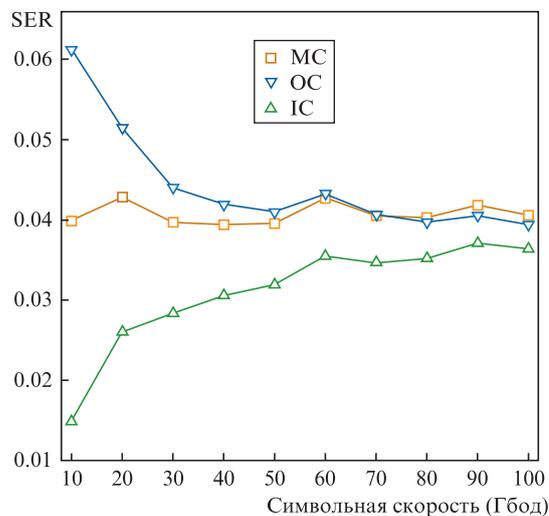


Рис.3. Зависимость распределения частоты символьных ошибок по мощности от частоты следования символов для несущих RC-импульсов.

будет меньше искажать такой сигнал. Этим, в свою очередь, обусловлено равномерное распределение ошибок в символах разной мощности в случае большой символьной скорости.

4. Применение адаптивной модуляции для оптимизации оптического сигнала

Полученное неравномерное распределение частоты символьных ошибок по мощностям позволяет предположить, что применение специальных методов формирования сигнала [2, 5, 6] может существенно улучшить качество передачи информации для различных несущих импульсов. С целью оптимизации качества передачи был применен метод адаптивного формирования сигнала; при этом, как и ранее, исследовались основные типы несущих импульсов.

Способ адаптивной модуляции предусматривает сокращение количества допустимых состояний из общего пространства дискретных состояний формата 16-QAM. Полученный таким образом формат в среднем имеет меньшее число состояний на символ (менее 16), т. е. номинальная скорость передачи данных канала будет меньше. Однако, как показано ниже, за счет такого ограничения можно достичь существенных показателей снижения частоты ошибок при отсутствии каких-либо физических из-

менений в линии. Мера вводимых ограничений оценивается параметром R , который определяется как величина уменьшения номинальной скорости передачи данных относительно скорости передачи формата 16-QAM без использования специальной модуляции. Эту величину также можно назвать избыточностью (по аналогии с избыточностью кода коррекции ошибок), т. к. с точки зрения дискретных данных R соответствует доле избыточной информации в сообщении.

На рис.4,а для импульсов различной формы показаны зависимости снижения приведенного количества символьных ошибок от избыточности, вносимой методом адаптивного формирования сигнала; здесь $\gamma = \text{SER}/\text{SER}_0$, где SER и SER_0 – частоты символьных ошибок для кодированного сигнала и сигнала без кодирования соответственно.

Видно, что даже небольшая избыточность ($\sim 10\%$) позволяет снизить количество ошибок в 10 раз ($\gamma = 0.1$), что для многих приложений может иметь решающее значение. При этом наилучшие показатели снижения количества ошибок достигаются для тех форм импульсов, которые изначально показывали лучшие характеристики (см. рис.2). Отдельно стоит отметить, что импульсы на основе гиперболического секанса, теоретически имеющие возможность распространяться по волокну без искажений при определенных условиях, на практике дают существен-

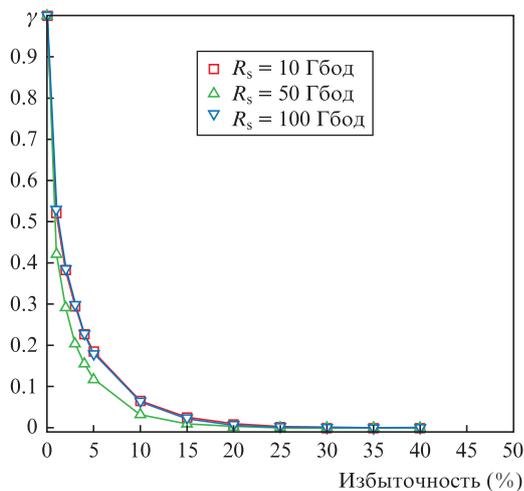
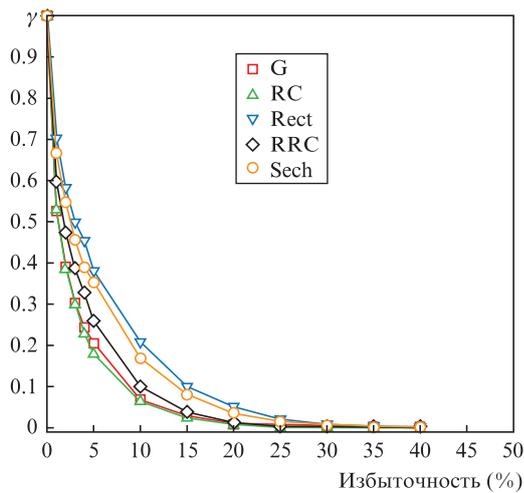


Рис.4. Зависимости γ от избыточности: для разных форм импульсов при $R_s = 100$ Гбод (а) и при различных частотах следования RC-импульса (б).

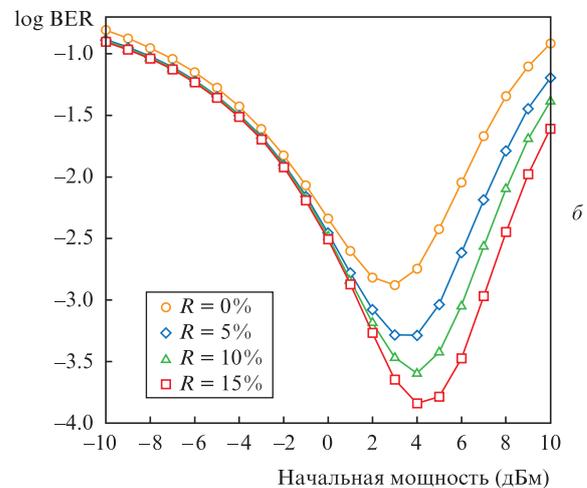
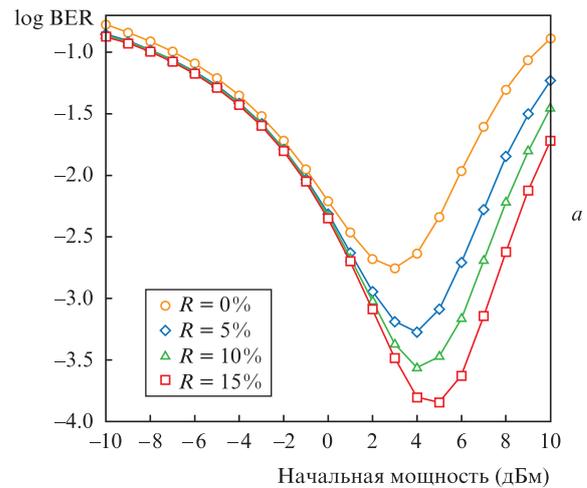


Рис.5. Зависимости частоты битовых ошибок от начальной мощности сигнала при различных значениях избыточности R адаптивного модулятора для RC-импульсов (а) и для RRC-импульсов (б).

но худший результат по сравнению с импульсами на основе «приподнятого косинуса», что можно объяснить практической сложностью реализации идеальных условий распространения Sech-импульсов. Наихудшие показатели наблюдаются для прямоугольного импульса, что обусловлено широкой спектральной областью, занимаемой данным типом импульсов.

Для оценки того, насколько эффективно снижается количество ошибок (в терминах мощности сигнала), были рассчитаны зависимости частоты битовых ошибок от мощности входного сигнала для различных вариантов применения адаптивной модуляции (показаны на рис.5 для RC- и RRC-импульсов). Видно, что наибольшее снижение частоты ошибок показывают сигналы в форме «приподнятого косинуса»: –1.1 дБ при изменении избыточности адаптивного кода от 0% до 15%; похожие результаты получены и для гауссовых импульсов. Учитывая, что избыточность нелинейно зависит от адаптивной модуляции, имеется возможность в реальных случаях обеспечить подстройку избыточности в соответствии с потребностями конкретной линии.

5. Заключение

Итак, исследованы различные несущие импульсы для работы с квадратурно-амплитудным сигналом в высокоскоростных линиях оптоволоконной связи. Показана эффективность применения в таких линиях импульсов типа

«приподнятый косинус» и «корень из приподнятого косинуса». Проведены исследования совместного влияния формы импульсов и адаптивной модуляции на качество передачи данных. Получено, что при использовании адаптивной модуляции возможна гибкая подстройка параметров модулятора с целью минимизации частоты ошибок. В принципе, возможно снижение частоты ошибок в 10 раз и более при избыточности 10%–15%.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ (проект № 1.6366.2017/БЧ). Работа А.С.Скидина (анализ результатов и применение адаптивного формирования сигнала) выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-71-10118).

1. Richardson D.J. *Science*, **330** (6002), 327 (2010).
2. Skidin A., Sidelnikov O.S., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *Opt. Express*, **24** (26), 30296 (2016).
3. Dorrer C., Bittle W.A., Cuffney R., Spilatro M., Hill E.M., Kosc T.Z., Kelly J.H., Zuegel J.D. *J. Lightwave Technol.*, **35** (2), 173 (2017).
4. Schmogrow R., Ben-Ezra S., Schindler P.C., Nebendahl B., Koos C., Freude W., Leuthold J. *J. Lightwave Technol.*, **31** (15), 2570 (2013).
5. Редюк А.А., Скидин А.С., Шафаренко А.В., Федорук М.П. *Квантовая электроника*, **42** (7), 645 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (7), 645 (2012)].
6. Скидин А.С., Сидельников О.С., Федорук М.П. *Квантовая электроника*, **46** (12), 1113 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (12), 1113 (2016)].