

Применение комбинированных методов обработки оптического сигнала для компенсации нелинейных воздействий в волоконно-оптических линиях связи

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

Рассмотрено применение комплексных методов обработки квадратурно-амплитудного сигнала, основанных на сочетании статических нейронных сетей и специальных методов модуляции. Найдены условия, позволяющие построить наиболее эффективную комбинацию методов обработки сигнала при передаче сигналов со значительной мощностью (в нелинейном режиме). С помощью аналитических методов показано, как статистические свойства сигнала влияют на эффективность комбинированных методов его обработки.

Ключевые слова: оптическое волокно, нелинейные эффекты, нейронные сети, модуляция.

1. Введение

Одна из наиболее актуальных на сегодняшний день задач, направленных на увеличение пропускной способности современных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), – задача компенсации нелинейных воздействий [1, 2] на сигнал, проявляющихся в виде различных, достаточно хорошо описанных в литературе эффектов [3]; данные эффекты воздействуют на сигнал в рамках как одного частотного канала со спектральным уплотнением (WDM-канала), так и нескольких каналов (межканальное взаимодействие). Наличие нелинейных эффектов накладывает ряд ограничений на суммарную мощность сигнала и на мощность отдельных его компонентов, например отдельных WDM-каналов. Поскольку степень воздействия нелинейностей на сигнал растёт с ростом его мощности, в последние годы было предложено несколько методов ограничения мощности сигнала с одновременным сохранением как можно большей пропускной способности [2, 4]. В частности, это достигается при использовании форматов модуляции с вероятностными ограничениями на появление заданных символов, которым соответствуют точки на сигнальном созвездии с максимальной мощностью [4]. Однако недостатком указанных методов является то, что их применение само по себе требует снижения номинальной пропускной способности, которое происходит из-за запрета (полного или частичного) на появление определённых символов в передаваемых данных. В настоящее время также активно используются связанные с машинным обучением и нейронными сетями подходы [5], направленные на улучшение детектирования без снижения номинальной пропускной способности. Такие подходы – разумная альтернатива методам обратного распространения оптического сигнала; несмотря на то что ме-

тоды обратного распространения теоретически могут компенсировать искажения практически полностью, их применение в режиме реального времени наталкивается сейчас на ряд трудностей, обусловленных вычислительной сложностью задачи обратного распространения. В этих условиях методы машинного обучения демонстрируют достаточно перспективные результаты [6] при небольшой сложности их реализации.

В настоящей работе мы рассматриваем сочетание двух методов, применяемых для обработки оптического сигнала в ВОЛС: модуляции с ограничениями и нейронных сетей. В качестве исходного сигнала используется 16-QAM-сигнал с квадратурно-амплитудной модуляцией, поскольку такой формат модуляции является в некотором смысле оптимальным с точки зрения роста номинальной пропускной способности и дальности передачи с сохранением приемлемого качества приёма [1,2]. Нами показано, что совместное применение нейронных сетей и модуляции с ограничениями усиливает возможности каждого из методов; данному обстоятельству даётся объяснение с аналитической точки зрения.

2. Комплексная обработка оптического сигнала

Для построения сложных схем обработки сигнала с целью уменьшения влияния на сигнал керровской нелинейности необходимо принимать во внимание значения мощности передаваемого сигнала. Рассмотрим сигнал, сформированный с использованием формата модуляции 16-QAM: как было показано в [4], частота ошибок (BER – bit-error rate) для такого сигнала в большой степени определяется распределением символов по мощностям. Максимум BER наблюдается при равномерном распределении, при этом снижение вероятности появления символов, задаваемых на сигнальном созвездии максимальной мощностью, ведёт к существенному снижению BER (в два-пять раз). Подобные подходы к модуляции с ограничениями на символы (PCS-модуляция (probabilistic constellation shaping [7]) – вероятностное формирование сигнального созвездия) позволяют увеличить среднюю мощность передачи сигнала без потери качества передачи.

А.С.Скидин, О.С.Сидельников, 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

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г.

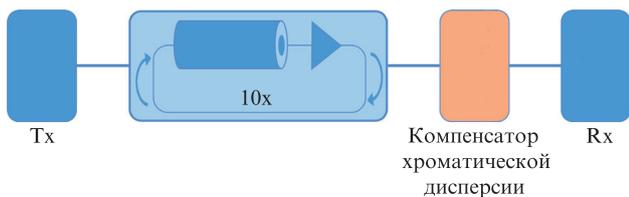


Рис.1. Схема линии связи.

Для проверки эффективности схем обработки сигнала использовалось численное моделирование. Проверка осуществлялась с помощью схемы передачи сигнала, показанной на рис.1. В ней передатчик создаёт 16-QAM-сигнал и обрабатывает его при необходимости PCS-модулятором с переменной избыточностью (т.е. с переменной степенью неравномерности распределения символов в потоке данных). Линия состоит из 10 пролётов, каждый пролёт включает в себя отрезок волокна длиной 100 км, а также усилитель с уровнем шума 4.5 дБ. Шум, вызванный волоконным эрбиевым усилителем, добавляется к оптическому сигналу после каждого усилителя в конце пролёта. В приёмнике Rx оптический сигнал сначала проходит через полосовой фильтр (BPF) с полосой пропускания BW_{BPF} для очистки от шумов. На приёмнике компенсируются хроматическая дисперсия и фазовый сдвиг, а также может использоваться нейронная сеть для лучшей компенсации канальных искажений (для сравнения эффективности передачи данных она применялась не во всех случаях). При математическом моделировании распространения сигнала по оптическому волокну использовалось нелинейное уравнение Шрёдингера [3], которое описывает эволюцию медленно меняющейся огибающей оптического сигнала $A(z, t)$:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + i\gamma|A|^2A. \quad (1)$$

Данное уравнение решалось численно с помощью симметричного метода Фурье-расщепления по физическим процессам со следующими параметрами: коэффициент ослабления $\alpha = 0.2$ дБ/км, нелинейность волокна $\gamma = 1.4$ Вт⁻¹·км⁻¹, хроматическая дисперсия $\beta_2 = -25$ пс²/км, длина волны $\lambda = 1550$ нм, число отсчётов на период $q = 16$.

На рис.2 представлено сигнальное созвездие формата 16-QAM, разделённое на кольца по мощности различных символов; возле оси ординат приведены относительные числа ошибок для разных колец, полученные в ходе численных экспериментов. Видно, что вероятность ошибок при передаче символов с внешнего кольца в четыре раза превышает вероятность передачи с внутреннего кольца.

Для оптимизации обработки сигнала рассмотрим двухступенчатую схему, основанную на совместном применении PCS-модуляции и статической нейронной сети, схема которой показана на рис.3. Данная нейронная сеть состоит из входного слоя, двух скрытых слоёв и выходного слоя. На вход нейронной сети подаются действительная и мнимая компоненты принятого символа, образуя тем самым вектор признаков нейронной сети. В каждом скрытом слое расположено по 16 нейронов; на выходном слое нейронная сеть возвращает преобразованные действительную и мнимую части символа. В качестве функции активации на скрытых слоях использовалась сигмоида, в то время как на выходном слое – линейная передаточная функция. Обучение нейронной сети выполнялось

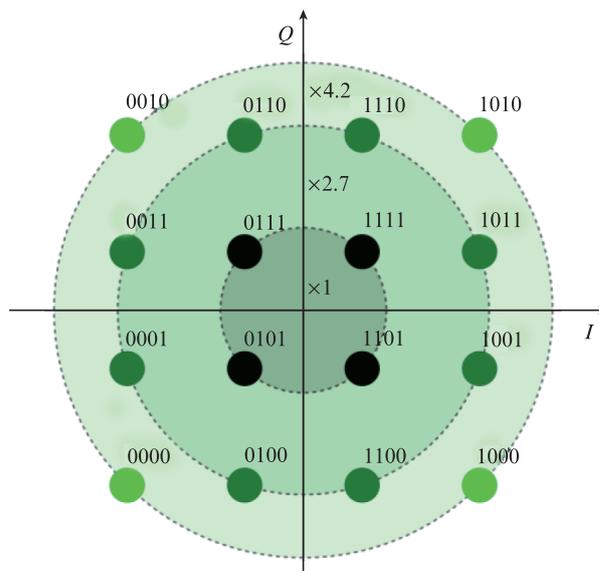


Рис.2. Сигнальное созвездие формата модуляции и относительные частоты ошибок по кольцам созвездия.

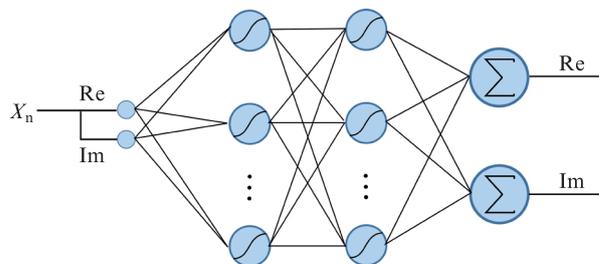


Рис.3. Структура нейронной сети, используемой для обработки сигнала с PCS-модуляцией.

с помощью алгоритма обратного распространения Ридмиллера (Riedmiller's resilient-back propagation).

В комбинированной схеме обработки сигнала PCS-модуляция реализуется за две фазы: сначала определяется статистика ошибок по символам с помощью передачи стандартного сигнала без ограничений на символы при модуляции, затем найденная статистика ошибок используется для построения оптимального набора вероятностей (процесс оптимизации описан в [4]). Для полноценного применения PCS-модуляции достаточно найти оптимальные вероятности распределения символов по мощности с учётом характеристик конкретной линии связи и характеристик сигнала.

Стоит отметить, что наличие в оптическом канале существенных нелинейных воздействий с теоретико-информационной точки зрения делает этот канал каналом с памятью, т.е. качество передачи конкретного символа зависит в общем случае от того, какие у него «соседи» (как во временной, так и в частотной области при рассмотрении WDM-систем с большим числом частотных компонентов). Это, в свою очередь, означает, что статическая нейронная сеть сама по себе не может по определению компенсировать полностью влияние нелинейных воздействий. Однако при использовании PCS-модуляции совместно с нейронной сетью длина «памяти» канала, как будет показано ниже, уменьшается, и по этой причине наблюдается усиление эффекта совместного применения двух данных независимых методов обработки сигнала.

3. Оптимизация комбинированной схемы обработки сигнала

Комбинированная схема имеет один независимый параметр – избыточность R , вносимую в сигнал PCS-модуляцией. Данная избыточность может варьироваться в широких пределах, однако на практике её оптимальные значения не превышают 10%–15%, поскольку дальнейшее увеличение R уже не ведёт к большому повышению эффективности обработки сигнала. Избыточность связана с тем, что для стандартного формата 16-QAM не все возможные символы используются в равной мере. На рис.4 показаны результаты численного моделирования шести различных схем: без применения и с применением нейронной сети. Для каждой схемы приведена зависимость полученной частоты ошибок (в логарифмическом масштабе) от входной мощности. Видно, что наличие в схеме обработки нейронной сети не оказывает заметного влияния на качество передачи данных в том случае, если PCS-модуляция отсутствует (её избыточность $R = 0$). Это является отражением того факта, что в нелинейном режиме оптический канал обладает памятью, поэтому статическая сеть с таким режимом не справляется. При росте избыточности PCS-модуляции появляется дополнительный эффект, обусловленный нейронной сетью (при $R = 5\%$ общий выигрыш по BER равен 0.4 дБ, из него 0.1 дБ даёт нейронная сеть; при $R = 15\%$ общий выигрыш равен 1.1 дБ, из него 0.3 дБ вносит нейронная сеть), т.к. PCS-модуляция сама по себе отчасти компенсирует память канала, делая искажения более предсказуемыми. Поскольку наличие нейронной сети в схеме обработки сигнала никак не сказывается на реальной пропускной способности (нейронная сеть избыточность в сигнал не добавляет), то дополнительный эффект достигается без потерь пропускной способности.

Стоит также отметить, что при использовании рассмотренной схемы оптимальная мощность при передаче оптического сигнала выше, что очень важно, поскольку позволяет увеличить мощность в каждом из каналов по отдельности (сделав возможным передачу сигнала в линиях с большей длиной пролёта) или число каналов, увеличив тем самым среднюю мощность при сохранении качества передачи данных.

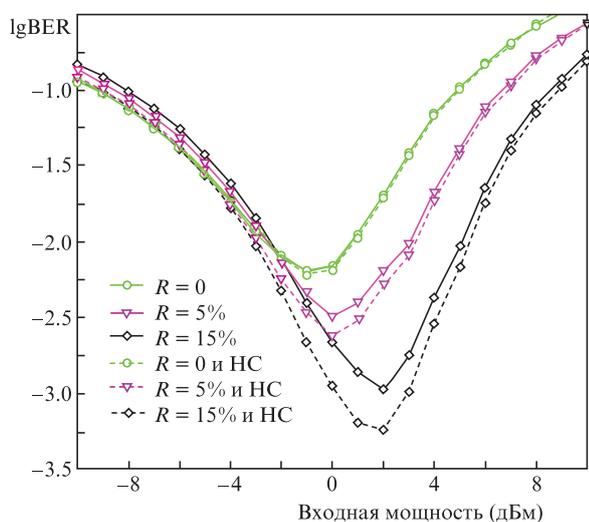


Рис.4. Зависимости BER от входной мощности сигнала для различных конфигураций обработки сигнала (НС – нейронная сеть).

4. Теоретический анализ полученных результатов

Совместное применение нейронных сетей и специальной модуляции сигнала даёт больший эффект, чем при раздельном применении данных подходов. Этот результат можно объяснить как с точки зрения работы нейронных сетей, так и с аналитической точки зрения. В первом случае улучшение работы статической сети в канале с памятью возможно тогда, когда память канала «уменьшается», т.е. уменьшается потребность в подстройке нейронной сети для достижения оптимального результата. При этом, когда передаваемый сигнал сформирован с использованием PCS-модуляции, статистика его характеристик отличается от статистики стандартного формата 16-QAM (рис.5). На рис.5,а показана плотность распределения мощностей различных точек передаваемого сигнала в зависимости от избыточности PCS-модуляции, а на рис.5,б – плотность распределения производной от мощности сигнала.

С математической точки зрения разные статистические свойства сигналов приводят к различному характеру искажений, которые сигнал испытывает при распространении. Для описания данных искажений преобразуем уравнение Шрёдингера (1) в систему уравнений для амплитуды $a(z, t)$ и фазы $\rho(z, t)$ сигнала [8]:

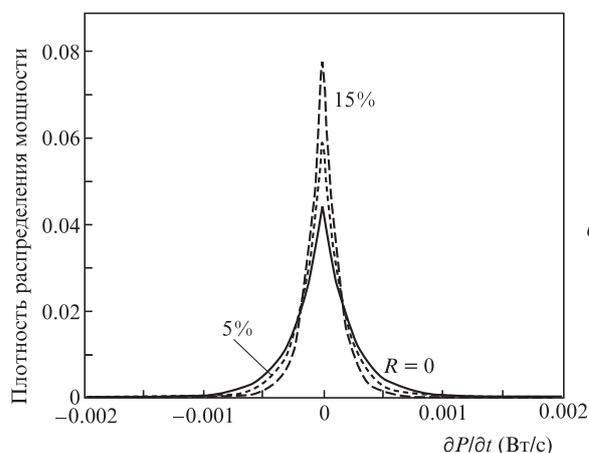
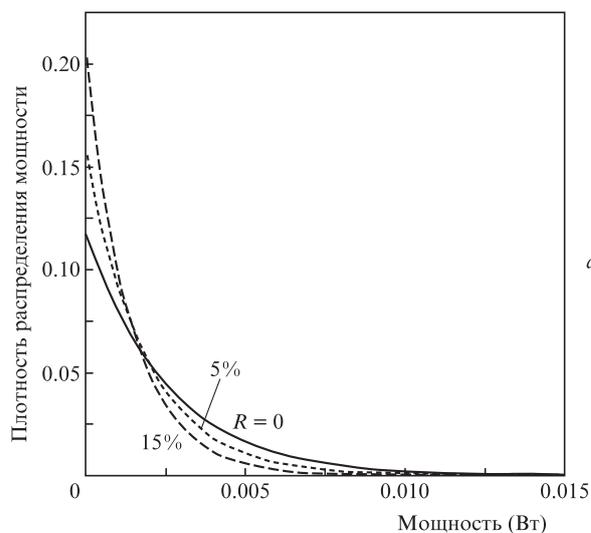


Рис.5. Плотности распределений мощности сигнала (а) и ее производной (б) при различных значениях избыточности PCS-модуляции.

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial z} &= -\frac{\alpha}{2}a + \frac{\beta_2}{2}\left(2\frac{\partial a}{\partial t}\frac{\partial \rho}{\partial t} + a\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}\right), \\ a\frac{\partial \rho}{\partial z} &= -\frac{\beta_2}{2}\left[\frac{\partial^2 a}{\partial t^2} + a\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)^2\right] + \gamma a^3. \end{aligned} \tag{2}$$

Проводя замену $P(z, t) = a^2(z, t)$, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial z} &= -\alpha P + \frac{\beta_2}{2}\left(2\frac{\partial P}{\partial t}\frac{\partial \rho}{\partial t} + 2P\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}\right), \\ \frac{\partial \rho}{\partial z} &= -\frac{\beta_2}{2}\left[-\frac{1}{4P^2\sqrt{P}}\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)^2 + \frac{1}{2\sqrt{P}}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)^2\right] + \gamma P. \end{aligned} \tag{3}$$

Из рис.5 видно, что при увеличении избыточности PCS-модуляции уменьшается дисперсия мгновенных значений мощности по сравнению с таковой для стандартной 16-QAM-модуляции. Это, в свою очередь, ограничивает диапазон, в котором находятся значения суммы

$$2\frac{\partial P}{\partial t}\frac{\partial \rho}{\partial t} + 2P\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2},$$

а также диапазон изменений значения выражения

$$-\frac{1}{4P^2\sqrt{P}}\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)^2 + \frac{1}{2\sqrt{P}}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}.$$

Таким образом уменьшаются величины слагаемых, входящих в систему (3) при дисперсионном коэффициенте β_2 , т.е. влияние дисперсионных эффектов снижается, уменьшая одновременно размер памяти канала. Такое же поведение членов уравнений имеет место в том случае, когда начальная мощность сигнала небольшая, с той только разницей, что при небольшой мощности наблюдается ограниченный диапазон колебаний величин слагаемых в уравнении для мощности, а при большой мощности в случае PCS-модуляции – в уравнении для фазы за счёт наличия мощностей в знаменателе при небольшой дисперсии производной от мощности. Следовательно, мгновенные значения производных от амплитуды и фазы по пространственной переменной $(\partial/\partial z)$ будут иметь также меньшую дисперсию.

Таким образом, схема обработки позволяет частично нивелировать главный фактор, ограничивающий переда-

чу оптического сигнала большой мощности, т.к. именно непрерывное взаимодействие между дисперсионными и нелинейными эффектами, которое в системе (3) описывается произведениями фазовых и амплитудных членов, является основной проблемой при передаче сигнала большой мощности. Как показано выше, влияние данных произведений в уравнениях (3) при использовании предложенной схемы обработки сигнала снижается.

5. Заключение

Нами рассмотрено применение комплексных методов обработки квадратурно-амплитудного сигнала, основанных на сочетании статических нейронных сетей и специальных методов модуляции. Продемонстрировано и аналитически обосновано, что сочетание двух подходов к обработке сигнала позволяет достичь лучшего результата, чем использование данных подходов по отдельности. Как показывают результаты исследований, при применении предложенного подхода не только в три-четыре раза уменьшается частота битовых ошибок при избыточности $R \leq 10\%$, но и увеличивается оптимальное значение мощности, обеспечивающее минимум частоты ошибок на приёмнике; это, в свою очередь, даёт возможность более полно использовать полосу пропускания линии.

Работа М.П.Федорука и О.С.Сидельникова выполнена при поддержке гранта 14.Y26.31.0017 Министерства образования и науки РФ, а работа А.С.Скидина (анализ результатов и применение адаптивного формирования сигнала) – при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-71-10118).

1. Alvarado A., Fehenberger T., Chen B., Willems F.M.J. *J. Lightwave Technol.*, **36** (2), 424 (2018).
2. Richardson D.J. *Science*, **330** (6002), 327 (2010).
3. Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics* (Cambridge: Academic Press, 2012).
4. Skidin A.S., Sidelnikov O.S., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *Opt. Express*, **24**, 30296 (2016).
5. Сидельников О.С., Редюк А.А., Сиглетос С. *Квантовая электроника*, **47**, 1147 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 1147 (2017)].
6. Wang D., Zhang M., Fu M., Cai Z., Li Z., Han H., Cui Y., Luo B. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **28** (19), 2102 (2016).
7. Cho J., Chandrasekhar S., Chen X., Raybon G., Winzer P.J. *Eur. Conf. on Opt. Commun. (ECOC)* (Gothenburg, Sweden, 2017).
8. Du M., Chan K., Chui C.K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 177 (1995).