

Методы компенсации нелинейных эффектов в многомодовых линиях связи на основе динамических нейронных сетей

О.С.Сидельников, А.А.Редюк, С.Сиглетос

Рассмотрены схемы цифровой обработки сигналов, основанные на нейронных сетях. Продемонстрировано, что в случае использования схемы обработки сигналов на основе динамических нейронных сетей качество передачи оптических сигналов повышается по сравнению с качеством передачи, обеспечиваемым другими методами компенсации нелинейных искажений.

Ключевые слова: оптическое волокно, нелинейные эффекты, нейронные сети, математическое моделирование.

1. Введение

Нелинейные эффекты являются одним из главных факторов, ограничивающих пропускную способность современных волоконно-оптических линий связи, поэтому исследования в области методов компенсации нелинейности в системах передачи данных являются несомненно актуальными. Большинство современных схем нелинейной обработки сигналов либо моделируют обратное распространение оптических сигналов в волоконной линии с помощью метода расщепления по физическим процессам [1], либо основаны на использовании функционального ряда Вольтерра [2]. Однако данные методы требуют больших вычислительных затрат и могут применяться только в статических системах передачи данных, поскольку для них необходимо заранее знать параметры линий связи. Методы машинного обучения представляют собой мощные и эффективные инструменты для разработки схем обработки сигналов, способных компенсировать нелинейные эффекты передачи. Такие методы могут применяться в динамически изменяющихся линиях связи и после обучения требуют небольшого объема вычислительных ресурсов. Несмотря на то что в беспроводных системах связи методы обработки сигналов на основе машинного обучения широко изучались, их применение в оптических каналах не было исследовано надлежащим образом [3].

В настоящей работе изучаются схемы компенсации нелинейных искажений в многомодовых линиях связи магистральной дальности, основанные на многослойных нейронных сетях. Предложенная схема, использующая динамические нейронные сети, сравнивается с линейной схемой компенсации и с методом обратного распространения сигнала.

О.С.Сидельников, А.А.Редюк. 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; alexey.redyuk@gmail.com
S.Sygletos. Aston University, England, Birmingham, B4 7ET;
e-mail: s.sygletos@aston.ac.uk

Поступила в редакцию 16 октября 2017 г.

2. Математическое моделирование

Рассматриваемая система передачи данных схематически изображена на рис.1. Линия связи состоит из передатчика, нескольких пролётов (по 100 км каждый) многомодового волокна с градиентным профилем показателя преломления с «траншеей» в оболочке [4,5], эрбиевых оптических усилителей и приемника. Для математического моделирования исследовались длины распространения сигнала от 1500 до 2700 км, т.е. число пролетов изменялось от 15 до 27.

На передатчике формируются сигналы с 16-уровневой квадратурной модуляцией (16-QAM-сигналы) с символьной скоростью $R_s = 32$ ГБод для каждой моды. Для придания формы импульсам используется фильтр с характеристикой типа «приподнятый косинус» с коэффициентом сглаживания 0.01. Для компенсации потерь в каждом пролете использовались усилители EDFA с показателем шума $NF = 4.5$ дБ.

Нелинейное распространение оптических сигналов в многомодовых волокнах описывается с помощью урав-

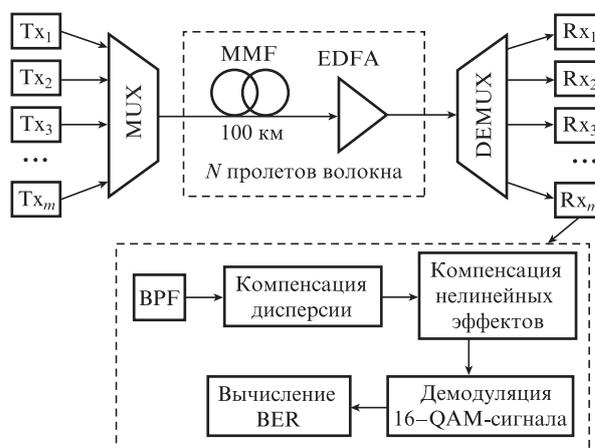


Рис.1. Схема исследуемой линии связи:

Tx_i и Rx_i – передатчик и приемник сигналов для i -й моды; MMF – отрезок многомодового волокна; MUX – модовый мультиплексор; EDFA – эрбиевый усилитель; DEMUX – модовый демультиплексор; BPF – полосовой фильтр.

нения Манакова для случая слабой связи мод [6], которое решается численно с помощью метода расщепления по физическим процессам. Для моделирования распространения использовались следующие параметры: оптические потери в волокне $\alpha = 0.2$ дБ/км, нелинейный параметр волокна $\gamma = 1.4$ Вт⁻¹·км⁻¹, количество отсчетов на каждый символ $q = 16$.

После передачи по каналу оптические сигналы поступали в приемник, в котором после демультимплексирования мод выполнялась идеальная компенсация групповой задержки и хроматической дисперсии. Для компенсации нелинейных искажений использовались линейная схема компенсации и схемы, основанные на методе обратного распространения сигнала и нейронных сетях. Рассмотренные методы сравниваются между собой по коэффициенту битовых ошибок (BER).

3. Схема компенсации нелинейных эффектов на основе динамических нейронных сетей

Архитектура предложенной нейронной сети представлена на рис.2. На вход в нейронную сеть поступают комплекснозначные символы, полученные в приемнике после понижения частоты дискретизации с 16 до 1 отсчета на символьный интервал. Для учета эффекта памяти канала в схеме нейронной сети используются блоки задержки (блоки Z^{-1}), что делает предлагаемую нейронную сеть динамической, т.е. для предсказания отправленного символа X_n используется не только соответствующий ему принятый символ Y_n , но и несколько предыдущих: $Y_{n-1}, Y_{n-2}, \dots, Y_{n-N_{del}}$, где N_{del} – число используемых блоков задержки. Далее поступающие символы разделяются на действительные (R) и мнимые (I) части и образуют, таким образом, вектор признаков для нейронной сети.

Число нейронов на входном слое исследуемой динамической нейронной сети равно $2(N_{del} + 1)$. Сеть также состоит из двух скрытых слоев по 16 нейронов каждый и выходного слоя с двумя нейронами, соответствующими действительной (R) и мнимой (I) частям выходного символа. Для обучения применялся алгоритм обратного распространения сигнала Ридмиллера [7]. Обученная нейронная сеть распознавала принятый символ и предсказывала символ, отправленный с передатчика. Для вычисления коэффициента битовых ошибок выполнялось 20 запусков по 2¹⁸ символов в каждом, из которых 2¹² символов использовались для обучения, а остальные – для вычисления BER.

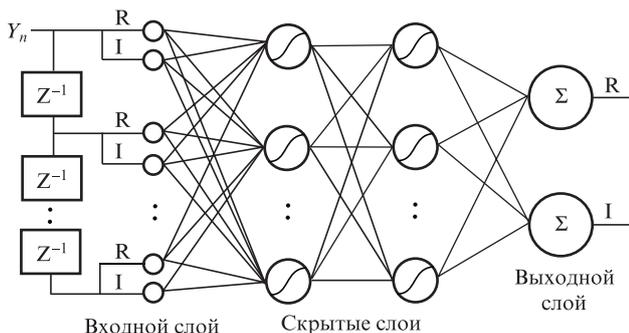


Рис.2. Архитектура динамической нейронной сети.

4. Результаты применения схемы компенсации нелинейных эффектов на основе динамических нейронных сетей

Для определения количества соседних символов, необходимых для учета эффекта памяти канала, исследовалась зависимость оптимальной длины задержки, т.е. количества используемых в сети блоков задержки, от длины распространения сигнала (рис.3). Как и предполагалось, длина задержки увеличивается с ростом числа используемых волоконных пролетов, поскольку в данном случае увеличивается также и память канала, причем данная зависимость имеет явно линейный характер.

Для исследования эффективности предложенной схемы она сравнивалась с линейной схемой компенсации нелинейных искажений, восстанавливающей только фазу принятого сигнала, и с методом обратного распространения сигнала, в котором уравнение распространения решается в обратную сторону при использовании двух шагов по пространственной переменной на каждый пролет (DBP-2S).

На рис.4 представлена зависимость коэффициента BER от начальной мощности сигнала для различных схем ком-

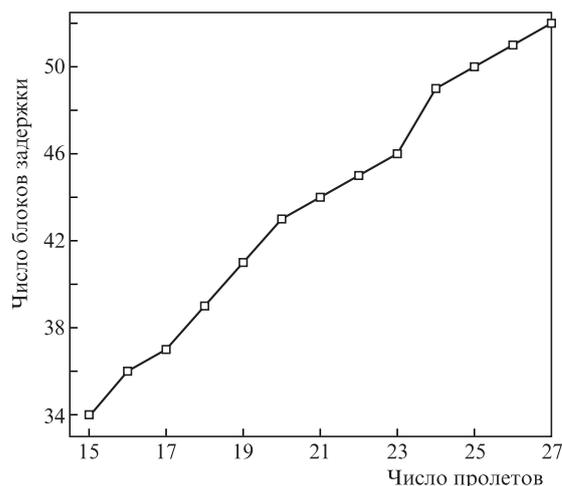


Рис.3. Зависимость оптимальной длины задержки от числа используемых волоконных пролетов.

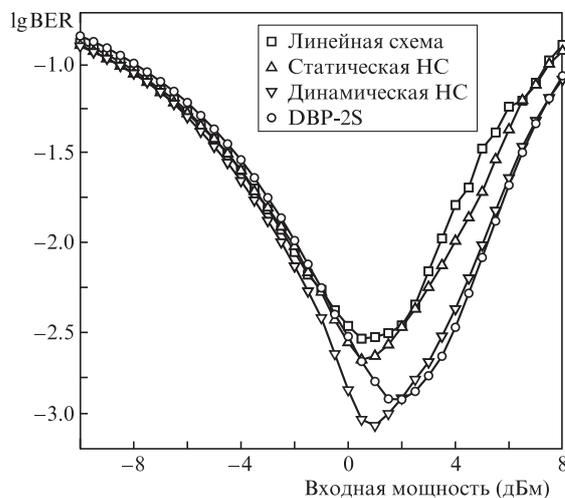


Рис.4. Зависимость коэффициента битовых ошибок от мощности начального сигнала для различных схем компенсации нелинейных искажений; НС – нейронная сеть.

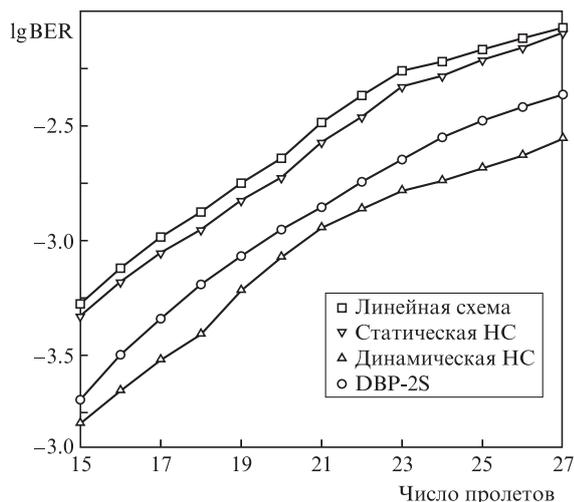


Рис.5. Зависимость коэффициента битовых ошибок от длины распространения для различных методов компенсации нелинейных искажений.

пенсации нелинейных искажений при передаче данных на 2000 км. Как и ожидалось, система с линейной схемой компенсации показывает худшие результаты. Использование статической нейронной сети (т.е. без блоков задержки) лишь немного улучшает качество передачи данных по сравнению с линейной схемой, т.к. в данном случае не учитываются эффекты памяти канала. Как видно из рис.4, схема, основанная на динамической нейронной сети, дает лучшие результаты по сравнению с остальными методами компенсации нелинейных искажений, в том числе и с наиболее эффективным на сегодняшний день методом DBP-2S.

На основе полученных кривых для различного числа используемых пролетов находилась оптимальная мощ-

ность, соответствующая минимальному BER. Затем, используя полученные мощности, строилась зависимость BER от длины распространения для различных методов компенсации нелинейных искажений (рис.5). В этом случае схема, основанная на динамической нейронной сети, также превосходит по результатам остальные методы компенсации нелинейных эффектов. Причем она позволяет увеличить длину распространения на 200 км при сохранении того же уровня ошибок по сравнению с длиной распространения при использовании метода DBP-2S.

Итак, предложена схема обработки оптических сигналов и компенсации нелинейных искажений в приемнике системы связи, основанная на динамических нейронных сетях. Для данной схемы определена зависимость длины задержки от количества пролетов системы связи. Проведено сравнение качества передачи данных при использовании различных методов компенсации нелинейности и показано превосходство предложенной схемы над линейной схемой компенсации и методом обратного распространения сигнала при использовании двух шагов в каждом пролете.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-72-30006).

1. Ip E. *J. Lightwave Technol.*, **28**, 6 (2010).
2. Peddanarappagari K. et al. *J. Lightwave Technol.*, **15**, 12 (1997).
3. Jarajeh M. et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **27**, 4 (2015).
4. Ferreira F. et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **25**, 5 (2013).
5. Сидельников О.С., Сиглетос С., Ферейра Ф., Федорук М.П. *Квантовая электроника*, **46** (1), 76 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (1), 76 (2016)].
6. Mumtaz S. et al. *J. Lightwave Technol.*, **31**, 3 (2013).
7. Riedmiller M., Braun H. *IEEE Int. Conf. Neural Networks (San Francisco, Cal., 1993, pp 586–591)*.