

Сравнительный анализ алгоритмов компенсации нелинейных искажений в волоконно-оптических линиях передачи

В.А.Бурдин, А.В.Бурдин, И.В.Григоров

Представлены результаты численного моделирования и сравнительного анализа двух алгоритмов цифровой обработки сигнала, предназначенных для демодуляции сигналов в волоконно-оптических линиях передачи (ВОЛП), работающих в нелинейном режиме, – алгоритма с использованием нелинейных фильтров Шредингера и алгоритма приёма в целом с поэлементным принятием решения. Установлено, что второй алгоритм более помехоустойчив, по сравнению с первым (выигрыш составляет около 0.5 дБ), в одноканальных ВОЛП, а для его работы не требуется знания параметров линии передачи; при этом второй алгоритм может быть построен и для систем со спектральным уплотнением.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия передачи, нелинейные искажения, математическое моделирование, нелинейный фильтр Шредингера, алгоритм приёма в целом с поэлементным принятием решения.

1. Введение

При передаче дискретных сообщений по магистральным волоконно-оптическим линиям передачи (ВОЛП) со спектральным уплотнением (WDM) с ростом числа спектральных каналов растет мощность передаваемого сигнала, что вызывает рост нелинейных искажений, а это, в свою очередь, увеличивает вероятность ошибки [1]. В отличие от случая использования линейного канала связи, этот рост не может быть скомпенсирован увеличением мощности передаваемого сигнала, т.к. последнее приведет к росту уровня нелинейных искажений.

В линиях связи без компенсации дисперсии наблюдается еще более сложный эффект: происходит перекрытие передаваемых сигналов, а эффект нелинейного взаимодействия уменьшается. В таких системах совместное действие керровской нелинейности и хроматической дисперсии проявляется как дополнительный гауссов шум [2, 3]. В ряде работ приведены результаты экспериментов, подтверждающие адекватность модели нелинейного гауссова шума [4–8].

В настоящее время существуют различные подходы к проблеме подавления нелинейных искажений: избыточное кодирование, использование специальных форматов модуляции, малочувствительных к такого рода искажениям [9–11], и т.д.

В данной статье рассматриваются только два достаточно простых в реализации алгоритма обработки сигнала, которые можно использовать для демодуляции сигнала в ВОЛП при наличии нелинейных искажений.

В.А.Бурдин, А.В.Бурдин, И.В.Григоров. Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Россия, 443010 Самара, ул. Льва Толстого, 23; e-mail: igor_grigorov@mail.ru

Поступила в редакцию 16 октября 2017 г.

2. Нелинейные фильтры Шредингера в задаче компенсации нелинейных и дисперсионных искажений в ВОЛП

В работе [12] рассмотрен относительно новый метод совместной компенсации нелинейных эффектов и искажений, обусловленных хроматической дисперсией. Для этого предложено использовать так называемые нелинейные фильтры Шредингера (НФС). Их синтез базируется на известном методе расщепления по физическим факторам [13], а механизм совместной компенсации различных видов искажений основан на фазовом характере нелинейности в оптических волокнах и других компонентах ВОЛП.

Нелинейный фильтр Шредингера является «электрическим эквивалентом» нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) [13] и может применяться для решения различных задач обработки сигналов и изображений. Для совместной компенсации нелинейных и дисперсионных искажений на выходе приёмного оптического модуля ВОЛП необходимо использовать цифровой многозвенный восстанавливающий НФС (ВНФС), состоящий из последовательно расположенных линейных и нелинейных звеньев со следующими характеристиками:

$$G^*(i\omega) = \exp(id\Delta\eta\omega^2) \quad (1)$$

– передаточная функция линейного звена;

$$H^*(\Psi) = \exp(-i\gamma\Delta\eta|\Psi|^2)\exp(\alpha\Delta\eta) \quad (2)$$

– коэффициент преобразования мгновенных значений комплексной огибающей $\Psi(\eta, t)$ нелинейного звена, где η – нормированная пространственная координата; $d, \Delta\eta, \alpha, \gamma$ – параметры звеньев. Цепочка звеньев с такими характеристиками также является «эквивалентом» НУШ с сопряженными характеристиками.

3. Алгоритм приёма в целом с поэлементным принятием решения в ВОЛП

В работе [14] показано, что для демодуляции сигналов в ВОЛП можно применять алгоритм демодуляции, который использовался ранее в радиоканалах с рассеянием (дисперсией) и пренебрежимо малыми нелинейными искажениями, – алгоритм приёма в целом с поэлементным принятием решения (ПЦППР) [15]. Он, в свою очередь, является основой системы с испытательным импульсом и предсказанием. В такой системе непрерывный цифровой поток двоичных сигналов разбивается на информационные пакеты, между которыми периодически формируется пауза, а в центре её располагается испытательный импульс, обычно соответствующий единичному символу. Это необходимо для периодического зондирования канала с целью оценки его импульсной реакции. Для демодуляции информационных пакетов последовательно используются обратная связь по решению (ОСР) и непосредственно переборный алгоритм ПЦППР, реализующий правило обобщенного максимального правдоподобия [15].

Правило вынесения решения о принимаемом символе b_i можно записать так:

$$\hat{b}_i = \underset{j}{\operatorname{argmin}} \int_{T_i}^{T_i+MT} [z(t) - \hat{y}_j(t) - \hat{s}_M(t)]^2 dt, \quad (3)$$

$$i, j = 1, \dots, 2^M,$$

где $z(t)$ – сумма полезного сигнала и шума; $\hat{y}_j(t)$ – оценка j -й реализации полезного сигнала на фоне помех на интервале $[T_i, T_i + MT]$; T – тактовый интервал; T_i – текущий тактовый интервал; $\hat{s}_M(t)$ – сигнал, характеризующий действие межсимвольной интерференции от сигналов, предшествующих b_i , и формируемый с использованием ОСР; M – память канала [15]. Для линейных видов модуляции сигнал $\hat{s}_M(t)$ можно представить в виде

$$\hat{s}_M(t) = \sum_{k=i-M}^{i-1} \hat{b}_k \hat{g}(t - T_k), \quad (4)$$

где $\hat{g}(t)$ – реакция канала на испытательный импульс.

Описанную систему можно применять в каналах не только с дисперсией, но и с относительно быстрыми замираниями. При этом интервал следования испытательных импульсов выбирается тем меньшим, чем меньше интервал корреляции замираний.

В работе [14] было показано, что описанный алгоритм ПЦППР можно использовать в ВОЛП, работающих в существенно нелинейном режиме, несмотря на то что принцип суперпозиции в них не соблюдается.

4. Результаты моделирования и сравнительного анализа описанных алгоритмов

Статистическое моделирование рассмотренных алгоритмов демодуляции сигналов в ВОЛП требует больших вычислительных затрат. Поэтому для сравнения этих алгоритмов по помехоустойчивости использовался численный расчёт средней вероятности ошибочного приёма мето-

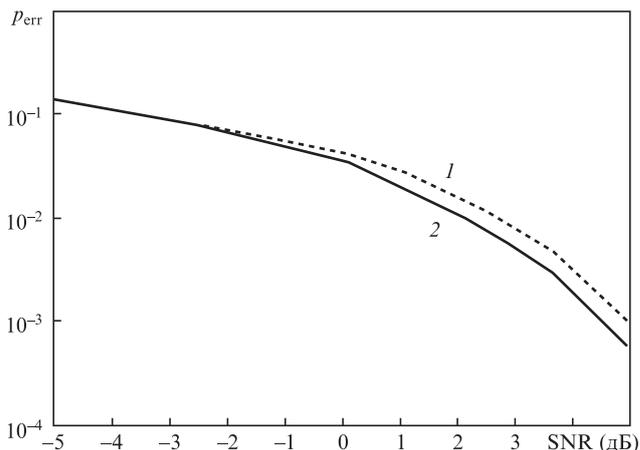


Рис. 1. Зависимости вероятности p_{err} ошибочного приёма сигналов при использовании алгоритмов с ВНФШ (1) и ПЦППР (2) от отношения сигнал/шум SNR.

дом, описанным в [14], для памяти $M = 3$ и относительно малых отношений сигнал/шум. Указанные зависимости для алгоритмов с ВНФШ и ПЦППР приведены на рис. 1.

5. Заключение

Из полученных результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Алгоритм с ВНФШ проигрывает по помехоустойчивости алгоритму ПЦППР; при этом проигрыш относительно невелик – не более 1 дБ.

2. К достоинствам алгоритма с ВНФШ можно отнести возможность использования НФШ как в одноканальных системах, так и в WDM-системах [16]. Его недостатками являются большая вычислительная сложность, особенно для длинных линий, и необходимость практически точного знания параметров всей линии передачи. Первый недостаток может быть частично преодолен, если для реализации НФШ применять метод обратной задачи рассеяния [17], называемый также нелинейным преобразованием Фурье [18–22]. Однако и в этом случае параметры всех участков ВОЛП необходимо знать достаточно точно.

3. Достоинство алгоритма ПЦППР состоит в том, что для его работы не требуется знания никаких параметров линии, а его вычислительная сложность слабо зависит от длины ВОЛП. Кроме того, алгоритм сохраняет работоспособность, если канал связи является составным, т. е. содержит как радиоучастки, так и проводные и волоконно-оптические участки. Недостаток такого способа демодуляции заключается в том, что его в чистом виде можно применять только в одноканальных системах, где используется лишь одна оптическая несущая. В системах со спектральным уплотнением необходима модификация этого способа, что требует дополнительного исследования.

1. Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н. *Первая мила*, **4**, 50 (2014).
2. Poggiolini P., Carena A., Curri V., Bosco G., Forghieri F. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **23**, 742 (2011).
3. Beygi L., Irukulapati N.V., Agrell E., Johansson P., Karlsson M., Wymeersch H., Serena P., Bononi A. *Opt. Express*, **21** (22), 26376 (2013).

4. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Плаксин С.О., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **43**, 550 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 550 (2013)].
5. Гуркин Н.В., Коньшев В.А., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **45** (1), 69 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (1), 69 (2015)].
6. Юшко О.В., Наний О.Е., Редюк А.А., Трещиков В.Н., Федорук М.П. *Квантовая электроника*, **45** (1), 75 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (1), 75 (2015)].
7. Konyshov V.A., Leonov A.V., Naniy O.E., Novikov A.G., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. *Opt. Commun.*, **349**, 19 (2015).
8. Коньшев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **46**, 1121 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 1121 (2016)].
9. Листвин В., Трещиков В. *DWDM-системы* (М.: Техносфера, 2015).
10. Skidin A.S., Sidelnikov O.S., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *Opt. Express*, **24** (26), 30296 (2016).
11. Коньшев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Скворцов П.В., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **47** (8), 767 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (8), 767 (2017)].
12. Бурдин В.А., Григоров И.В. *T-Comm – телекоммуникации и транспорт*, **5**, 18 (2013).
13. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996).
14. Каргашевский В.Г., Андреев В.А., Бурдин В.А., Григоров И.В. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, **18** (3), 70 (2015).
15. Кловский Д.Д. *Теория электрической связи* (М.: Радиотехника, 2009).
16. Бурдин В.А., Григоров И.В. *Вест. Поволжского государственного технического ун-та. Сер. «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы»*, **2** (18), 16 (2013).
17. Захаров В.Е., Шабат А.Б. *ЖЭТФ*, **61**, 118 (1971) [*Sov. Phys. JETP*, **34** (1), 62 (1972)].
18. Prilepsky J.E., Derevyanko S.A., Blow K.J., Gabitov I.R., Turitsyn S.K. *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 013901 (2014).
19. Kamalian M., Prilepsky J.E., Le S.T., Turitsyn S.K. *Opt. Express*, **24** (16), 18353 (2016).
20. Turitsyn S.K., Prilepsky J.E., Le S.T., Wahls S., Frumin L.L., Kamalian M., Derevyanko S.A. *Optica*, **4** (3), 307 (2017).
21. Frumin L.L., Gelash A.A., Turitsyn S.K. *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 223901 (2017).
22. Григоров И.В. *Электросвязь*, **1**, 51 (2010).