

УДК 517.972.5

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПЛИТУДНО- И ФАЗОВО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ*

Е. Г. Шапиро^{1,3}, М. П. Федорук^{2,3}, О. В. Штырина^{2,3}

¹ Учреждение Российской академии наук
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: e.shapiro@iae.nsk.su

² Учреждение Российской академии наук
Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6

³ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный университет»,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Представлены результаты сравнительного анализа высокоскоростных линий оптической связи на основе амплитудно- и фазово-модулированных форматов передачи данных.

Ключевые слова: дисперсия, нелинейность, волоконные линии связи, коэффициент ошибки, численное моделирование, фазовые и амплитудные форматы модуляции.

Введение. В настоящее время основным режимом работы оптоволоконных линий связи является амплитудное коммутирование, при котором разряд «1» передаётся в виде светового импульса, а разряд «0» — в виде его отсутствия в выделенном битовом интервале. По мере увеличения скорости передачи информации в канале возрастает негативное влияние нелинейных и дисперсионных эффектов, а также шумов усиленной спонтанной эмиссии. Поэтому весьма актуальной является задача исследования новых форматов модуляции оптического сигнала, например фазово-модулированных, и поиск оптимальных конфигураций оптических линий связи на основе этих форматов методами математического моделирования.

В обычном двоичном формате «включено—выключено» (ООК — On/Off Keying) импульс кодирует логическую единицу, а его отсутствие — логический ноль. В простейшем фазово-модулированном формате DPSK (Differential Phase-Shift Keying) данные кодируются по разности оптических фаз между соседними битами: логический ноль кодируется сдвигом фазы оптического импульса в битовом интервале на величину π относительно предыдущего бита, а логическая единица соответствует одинаковым фазам в двух соседних битах. За счёт равномерного распределения мощности во всех битовых интервалах и случайного сдвига фаз между соседними битами данный формат оказывается более устойчивым к негативному влиянию таких нелинейных эффектов, как кроссфазовая модуляция и четырёхволновое смешение.

*Работа выполнена при поддержке СО РАН (Интеграционный проект № 42) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» (ГК № 02.740.11.5129).

Постановка задачи. Для повышения качества волоконно-оптических линий связи нами была использована концепция Q -фактора, которая является справедливой в предположении о нормальных распределениях вероятностей нулевых и единичных битов на приёмном устройстве [1].

Для амплитудно-модулированного формата ООК можно показать, что

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}, \quad Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0},$$

где BER (Bit Error Rate) — коэффициент ошибки; величина Q -фактора определяется как частное от деления разности токов единичных и нулевых битов на сумму их среднеквадратичных отклонений.

Величина $Q \sim 6$ соответствует $\text{BER} = 10^{-9}$. Дальность связи принимается как расстояние, на котором величина $Q \geq 6$.

Для DPSK-форматов необходимо модифицировать вычисление величины Q -фактора (см., например, [2]). Предполагая статистику шумов гауссовой, найдём величину Q -фактора по разности оптических фаз сигнала на приёмнике:

$$Q_{\Delta\Phi} = \frac{\pi}{\sigma_{\Delta\Phi,0} + \sigma_{\Delta\Phi,1}},$$

где $\sigma_{\Delta\Phi,0}$, $\sigma_{\Delta\Phi,1}$ — среднеквадратичные отклонения разности фаз от 0 и π соответственно. Отметим, что в этом случае величина Q связана с коэффициентом ошибки соотношением

$$\text{BER} = \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

и $\text{BER} = 10^{-9}$ соответствует величина $Q \sim 6$.

Введём Q_A — альтернативный «амплитудный Q -фактор», который вычислим следующим образом:

$$Q_A = \frac{\langle |A_n| \rangle}{\sigma_{|A_n|}},$$

где A_n — амплитуда оптического поля до интерферометра задержки; n — номер битового интервала. Тогда в случае DPSK-форматов за величину Q -фактора, с помощью которого находятся коэффициент ошибки и дальность связи, берётся наименьший из $Q_{\Delta\Phi}$ и Q_A .

Распространение оптических импульсов по волоконной линии связи описывается обобщённым нелинейным уравнением Шрёдингера для комплексной огибающей A электромагнитного поля [1]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3(z)}{2} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \sigma(z) |A|^2 A = iG(z)A. \quad (1)$$

Здесь i — мнимая единица; z — продольная координата вдоль направления распространения сигнала; t — временная переменная; $|A|^2$ — мощность; β_2 — параметр дисперсии групповой скорости; β_3 — коэффициент дисперсии третьего порядка; σ — коэффициент нелинейности. Величины G , σ , β_2 и β_3 представлены как функции от z для учёта изменения этих параметров при переходе от одного типа световода к другому. Коэффициент нелинейности σ определяется формулой $\sigma = (2\pi n_2)/(\lambda_0 A S_{\text{eff}})$, где n_2 — нелинейный показатель преломления, λ_0 — несущая длина волны, A_{eff} — эффективная площадь собственной моды

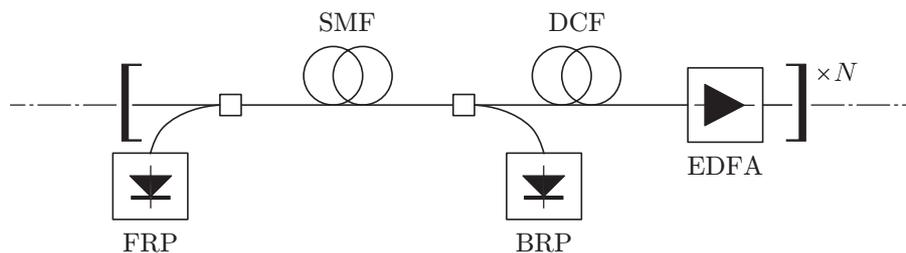


Рис. 1. Схема оптической линии связи

световода. Коэффициент $G(z)$ в правой части уравнения (1) включает затухание и усиление оптических сигналов. Его конкретный вид зависит от типа оптических усилителей сигналов. Методика математического моделирования волоконно-оптических линий связи на основе различных форматов передачи данных подробно описана в работах [3, 4].

Результаты численного моделирования. Пример волоконно-оптической линии связи со скоростью передачи 40 Гбит/с в одном частотном канале и комбинированной схемой усиления оптических сигналов представлен на рис. 1. Введены следующие обозначения: SMF (Single Mode-Fibre) — стандартное одномодовое волокно, DCF (Dispersion Compensation Fibre) — дисперсионно-компенсирующее волокно, EDFA (Erbium-Doped Fibre Amplifier) — волоконный эрбиевый усилитель, FRP (Forward Raman Pumping), BRP (Backward Raman Pumping) — волоконные рамановские усилители с прямой и обратной накачкой соответственно. Длина одной секции оптической линии связи, показанной на рисунке, составляла 100 км. Параметры волоконных световодов даны в таблице.

Результаты оптимизации параметров этой линии для форматов $\pi/2$ AP-RZ (Alternate Phase Return to Zero) ООК и $\pi/2$ AP-RZ DPSK приведены на рис. 2. В формате $\pi/2$ AP-RZ ООК используется амплитудная модуляция, однако фазы битов последовательно чередуются, принимая значения 0 или $\pi/2$. В фазово-модулированном формате $\pi/2$ AP-RZ DPSK логическая единица кодируется, если фаза оптического импульса сдвинута на величину $\pi/2$ относительно предыдущего бита, и логический ноль кодируется, когда фаза сдвинута на величину $-\pi/2$ относительно предыдущего бита. Как видно из рисунка, максимальная дальность распространения сигнала в случае амплитудно-модулированного формата требует гораздо большей нормальной средней хроматической дисперсии. Дальность связи для фазово-модулированного формата оказывается в 3 раза больше, чем для амплитудно-модулированного. Эти результаты соответствуют длительности несущих гауссовых импульсов $T_{FWHM} = 12,5$ пс на уровне половинной пиковой мощности.

Тип волокна	Характеристика волокна	Значение
SMF	затухание при 1550 нм	0,2 дБ/км
	эффективная площадь	80 мкм ²
	дисперсия	17 пс/нм/км
	дисперсионный наклон	0,07 пс/нм ² /км
	нелинейный показатель преломления	$2,7 \cdot 10^{-20}$ м ² /Вт
DCF	затухание при 1550 нм	0,65 дБ/км
	эффективная площадь	19 мкм ²
	дисперсия	-100 пс/нм/км
	дисперсионный наклон	-0,41 пс/нм ² /км
	нелинейный показатель преломления	$2,7 \cdot 10^{-20}$ м ² /Вт

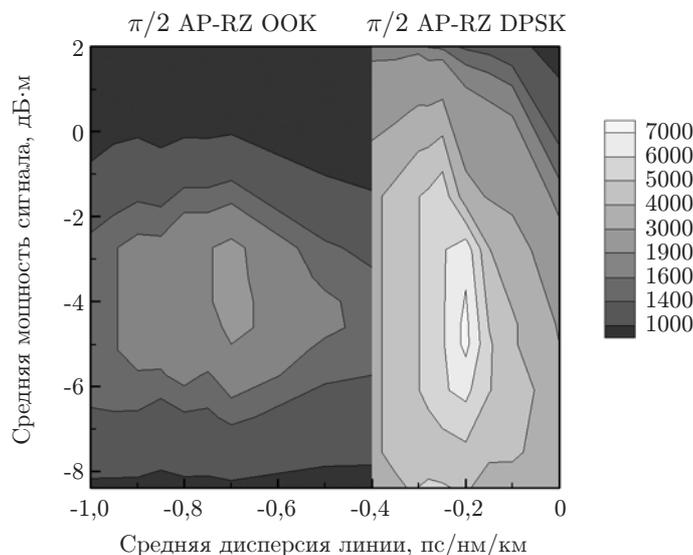


Рис. 2. Численные результаты дальности связи в плоскости параметров моделирования

На рис. 3 показаны функции плотности распределения вероятности нулевых и единичных битов для форматов $\pi/2$ AP-RZ OOK и AP-RZ DPSK оптической линии связи, рассмотренной в работах [5, 6], одна секция которой имеет следующую конфигурацию:

$$\text{SMF}(85 \text{ км}) + \text{EDFA} + \text{DCF}(14,85 \text{ км}) + \text{EDFA}.$$

Эрбиевые усилители имеют коэффициент шума 4,5 дБ и коэффициент усиления 13,4 дБ для полной компенсации затухания оптического сигнала на длине периодической секции. Линия связи содержит 31 участок и дополнительный сегмент стандартного одномодового волокна, компенсирующий накопленную дисперсию. Длина дополнительного участка подбиралась так, чтобы Q -фактор в конце линии связи был максимальным.

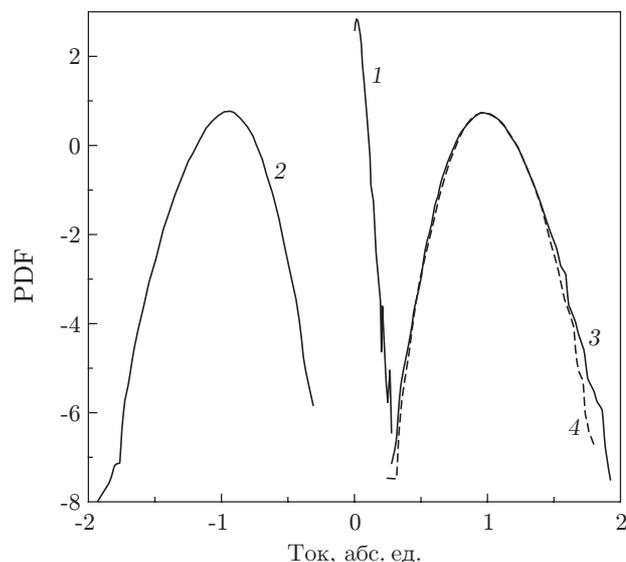


Рис. 3. Графики плотности вероятности нулевых (кривые 1 и 2) и единичных (кривые 3 и 4) битов для OOK- и DPSK-форматов соответственно

В качестве единичных битов использовались гауссовы импульсы с длительностью 7,5 пс. Рассматривалась передача информации в одном частотном канале со скоростью 40 Гбит/с. Выборки нулей и единиц нормированы на среднее значение тока, соответствующее единичным битам на приёмнике, для обоих форматов. Объём выборки нулевых битов формата AP-RZ ООК равен 108662, единичных битов — 108426. Выборка нулей формата DPSK состоит из 108524 значений, единиц — из 108464 значений.

Данные прямого численного моделирования и статистический анализ показывают, что качество связи в случае формата AP-RZ DPSK оказывается существенно выше, чем для формата $\pi/2$ AP-RZ ООК. Эти выводы наглядно подтверждает рис. 3, из которого видно, что хвосты функций плотности распределения вероятности для нулевых и единичных битов гораздо меньше перекрываются в первом случае.

Заключение. В данной работе методами математического моделирования выполнено исследование параметров линии оптической связи на основе стандартного одномодового и дисперсионно-компенсирующего волокна и форматов с амплитудной и фазовой модуляцией оптических сигналов. Результаты численного моделирования показывают значительное преимущество фазовых форматов модуляции перед амплитудными: дальность связи для фазовых форматов может быть существенно увеличена (как правило, в 2–3 раза).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agrawal G. P. Fiber-optic communication systems. N.-Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1997. 555 p.
2. Wei X., Liu X., Xu C. Numerical simulation of the SPM penalty in a 10-Gb/s RZ-DPSK system // IEEE Photon. Tech. Lett. 2003. **15**, N 11. P. 1636–1638.
3. Штырина О. В., Якасов А. В., Латкин А. И. и др. Исследование высокоскоростных волоконно-оптических линий связи, использующих кодирование информации по разности оптических фаз // Квантовая электрон. 2007. **37**, № 6. С. 584–589.
4. Штырина О. В., Федорук М. П., Турицын С. К. Исследование новых модуляционных форматов передачи данных для высокоскоростных волоконно-оптических линий связи с дисперсионным управлением // Квантовая электрон. 2007. **37**, № 9. С. 885–890.
5. Шапиро Е. Г. Статистика ошибок в высокоскоростной оптоволоконной линии связи с фазовым сдвигом нечетных битов // Квантовая электрон. 2009. **39**, № 11. С. 1082–1085.
6. Шапиро Е. Г., Федорук М. П. Статистика ошибок в высокоскоростной оптической линии связи с понижением эффекта керровской нелинейности // Автометрия. 2009. **45**, № 2. С. 115–119.

Поступила в редакцию 3 февраля 2011 г.