

# Оптимизация высокоскоростной оптической линии связи с неидеальным квазипрямоугольным фильтром

О.В.Белай, Д.А.Шапиро, Е.Г.Шапиро

*Численно исследована задача о передаче данных по высокоскоростной многоканальной оптической линии связи, где разделение каналов осуществляется квазипрямоугольными брэгговскими фильтрами. Показано, что оптимизация средней дисперсии линии, ширины и формы передаточной функции фильтров позволяет увеличить дальность передачи данных до 1550 км.*

**Ключевые слова:** оптическая линия связи, оптическая фильтрация, брэгговский фильтр.

## 1. Введение

Управление дисперсией и спектральное уплотнение данных значительно повышают скорость передачи информации по оптическим линиям связи [1]. Главными препятствиями к дальнейшему увеличению производительности линии являются взаимодействие сигналов в соседних каналах и межбитовое взаимодействие в одном канале. При заданной ширине полосы пропускания для уменьшения взаимодействия между каналами требуется уменьшать ширину канала. Однако это приводит к увеличению длительности импульсов. Тогда при заданной частоте следования импульсы начинают перекрываться и межбитовое взаимодействие усиливается.

Соотношение между шириной каналов и величиной битового интервала можно определить, рассмотрев задачу о генерации последовательности импульсов при помощи идеального прямоугольного фильтра. Пропустим короткий гауссов импульс через узкий прямоугольный фильтр. Если ширина спектра импульса много больше ширины пропускания фильтра  $B$ , на выходе получим импульс с прямоугольным спектром, имеющий sinc-образную форму  $\text{sinc}(\pi Bt) = [\sin(\pi Bt)]/(\pi Bt)$ . Ширина фильтра  $B$  должна быть выбрана такой, чтобы соседние каналы не перекрывались, а полоса частот была занята полностью. Оптимальной частотой следования импульсов является та, при которой максимум спектра каждого следующего импульса попадает в первый нуль предыдущего [2]. Экспериментальная реализация фильтра данного типа в виде брэгговского отражателя рассмотрена в работе [3].

В длинных линиях связи проявляются дополнительные факторы, искажающие сигнал: керровская нелинейность, шумы усилителей, хроматическая дисперсия волокна, неидеальность фильтра. Дисперсия групповой скорости компенсируется периодически расположенными отрезками волокна с противоположными знаками дисперсии. Среднее значение дисперсии

$$\langle D \rangle = \frac{D_1 L_1 + D_2 L_2}{L_1 + L_2},$$

О.В.Белай, Д.А.Шапиро, Е.Г.Шапиро. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: shapiro@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 17 мая 2006 г.

где  $L_j$  и  $D_j$  – длина отрезка волокна и его дисперсия; индексы 1 и 2 относятся к стандартному одномодовому и компенсирующему волокнам соответственно. При отсутствии нелинейного взаимодействия средняя дисперсия не влияет на качество принимаемого сигнала при условии, что она скомпенсирована в конце линии связи. Однако из-за нелинейности оптимальной становится неполная компенсация дисперсии. Оптимальная средняя дисперсия определяется параметрами линии и сигнала, она заранее неизвестна и остается одним из параметров оптимизации. Другим регулирующим параметром служит ширина фильтра.

Цель настоящей работы – оптимизация оптической системы для увеличения расстояния, на которое битовые последовательности распространяются с приемлемым уровнем ошибок.

## 2. Спектрально-плоский формат

Для моделирования оптического канала передачи информации битовая последовательность, составленная из коротких гауссовых импульсов, предварительно была пропущена через оптический фильтр в виде брэгговской решетки. Не всякая спектральная характеристика фильтра может быть реализована, поэтому требуется, задав предварительно желаемую характеристику, решить обратную задачу рассеяния и найти профиль брэгговской решетки со спектром отражения, близким к заданному. Затем надо решить прямую задачу рассеяния и определить «реальную» спектральную характеристику фильтра. В общем случае для конечной решетки «реальная» характеристика будет отличаться от желаемой, причем не только амплитудой коэффициента отражения, но и групповой задержкой.

Профиль решетки синтезирован по заданному комплексному коэффициенту отражения с помощью известного метода дискретного послойного восстановления [4]. Коэффициент отражения в центре  $|R|_{\max}$  был принят равным  $1 - 5 \times 10^{-5}$ . Амплитуда коэффициента отражения была задана в виде квазипрямоугольной функции с требуемыми шириной и крутизной фронтов:

$$|R(\xi)| = \frac{\cosh(2\pi \times 1.8) - 1}{\cosh(2\pi \times 1.8) + \cosh(2\pi \times 12.4\xi)}, \quad (1)$$

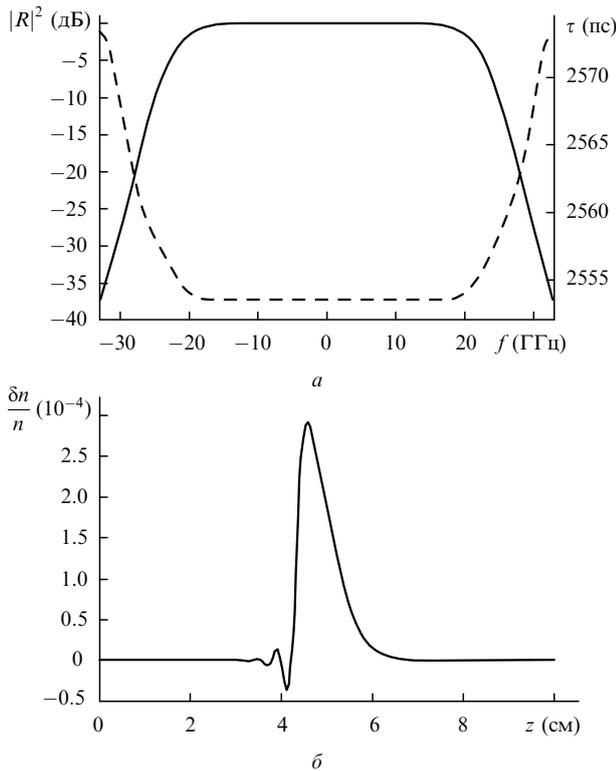


Рис.1. Спектр отражения брэгговской решетки  $|R|^2$  (сплошная кривая) и групповая задержка  $\tau$  (штриховая кривая) (а), а также профиль решетки  $\delta n/n$ , реконструированный по спектру отражения методом по-слойного восстановления (б);  $z$  – координата вдоль решетки,  $\delta n(z)$  – огибающая осциллирующей добавки к среднему показателю преломления  $n$ .

где  $\xi = (\omega - \omega_0)/\omega_0$  – безразмерная расстройка частоты относительно центра полосы отражения  $\omega_0$ . Фаза коэффициента отражения выбиралась из условия отсутствия групповой задержки, поскольку зависящая от частоты групповая задержка приводит к искажению сигнала. Семейство квазипрямоугольных функций было взято из работы [5], где аналитически найден профиль брэгговской решетки, спектр отражения которой выражается через гиперболические функции по формуле (1).

«Реальная» передаточная функция фильтра приведена на рис. 1, а вместе с групповой задержкой, а предложенный профиль брэгговской решетки показан на рис. 1, б. Из рис. 1, а видно, что неоднородность групповой задержки при уменьшении коэффициента отражения по сравнению с максимальным в десять раз составляет около 5 пс. Поэтому задержка внутри полосы отражения значительно меньше расстояния между импульсами и ширины (длительности) отдельного импульса.

После прохождения через такой фильтр узкий гауссов импульс приобретает sinc-образную форму. Ширина оптического фильтра  $B$  выбрана такой, что нули функции находятся в серединах битовых интервалов, которые составляют 25 пс. В результате этого взаимодействие между соседними битами уменьшается. На приемном конце линии проводится разделение каналов при помощи таких же фильтров, как и в начале линии. Импульсы проходят через фильтр повторно, что приводит к дополнительному изменению их формы. На рис. 2 показаны профили импульсов после однократного и двукратного прохождения через оптический фильтр. Первый нуль функции после второго фильтра практически совпадает с первым

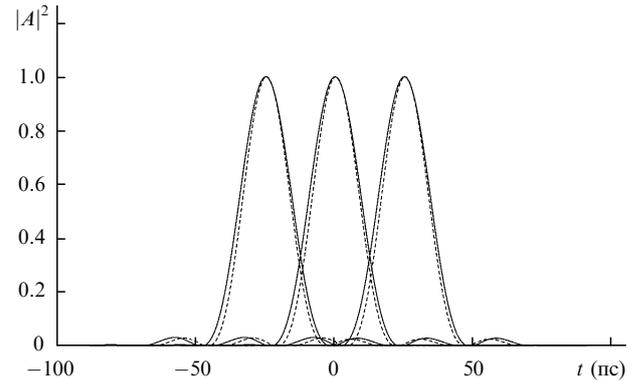


Рис.2. Форма оптического импульса  $|A|^2$ , нормированная на максимальную мощность, после однократного (штриховая кривая) и двукратного (сплошная кривая) прохождения через оптический фильтр.

нулем функции  $\text{sinc}(\pi Bt)$ . Далекие хвосты функции, разумеется, убывают значительно быстрее, чем у  $\text{sinc}(\pi Bt)$ , поскольку спектральный профиль коэффициента отражения фильтра выбран в виде гладкой функции (1).

### 3. Обобщенное нелинейное уравнение Шредингера

Распространение оптических импульсов по волоконной линии связи с распределенной дисперсией описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера [1]

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \sigma(z) |A|^2 A = i \left[ -\gamma(z) + \sum_{k=1}^N r_k \delta(z - z_k) \right] A. \tag{2}$$

Здесь  $z$  – расстояние вдоль линии связи;  $t$  – время;  $A$  – амплитуда световой волны;  $\beta_2 = -\lambda_0^2 D / (2\pi c)$  – дисперсия групповой скорости;  $\lambda_0$  и  $c$  – длина волны и скорость света;  $\sigma$  – коэффициент керровской нелинейности;  $z_k$  – координаты точечных усилителей с коэффициентами усиления  $r_k$ ;  $N$  – число усилителей;  $\gamma(z)$  – коэффициент затухания сигнала. Параметры  $\sigma$  и  $\beta_2$  записаны как функции координаты, чтобы учесть их изменение при переходе от одного типа волокна к другому. Коэффициент нелинейности вычислялся по формуле  $\sigma = 2\pi n_2 / (\lambda_0 a_{\text{eff}})$ , где  $n_2$  – нелинейный показатель преломления,  $a_{\text{eff}}$  – эффективная площадь поперечного сечения собственной моды световода.

Рассматривалась оптическая система, состоящая из участков, включающих в себя отрезки стандартного одномодового волокна ( $L_1 = 40$  км) и волокна, компенсирующего дисперсию ( $L_2 = 6.8$  км), а также волоконно-оптический эрбиевый усилитель с коэффициентом шума 4.5 дБ. Параметры волокон обоих типов, используемые в численном расчете, приведены ниже.

	Стандартное одномодовое волокно	Компенсирующее волокно
Затухание (для $\lambda_0 = 1550$ нм) (дБ/км) .....	0.2	0.65
Эффективная площадь $a_{\text{eff}}$ (мкм <sup>2</sup> ) .....	80	19
Дисперсия $D$ (пс·нм <sup>-1</sup> ·км <sup>-1</sup> ) .....	17	-100
Дисперсионный наклон (пс·нм <sup>-2</sup> ·км <sup>-1</sup> ) .....	0.07	-0.41
Нелинейный показатель преломления $n_2$ (м <sup>2</sup> /Вт) .....	$2.7 \times 10^{-20}$	$2.7 \times 10^{-20}$

Исследовалась передача данных в восьми частотных каналах в диапазоне длин волн 1548.78 – 1551.78 нм (расстояние между соседними каналами составляло 50 ГГц). Смещение и разделение каналов проводилось с помощью фильтров шириной 45 ГГц, сдвинутых относительно центров каналов на 4 ГГц. Сдвиг оптического фильтра относительно центра канала является управляющим параметром, по которому также проводилась оптимизация. Для формирования sinc-образной последовательности короткие импульсы (1.7 пс) с пиковой мощностью 85 мВт были пропущены через оптический фильтр. Второй выходной оптический фильтр располагался перед приемником для разделения каналов. После приемника устанавливался электрический фильтр Баттерворта третьего порядка с шириной полосы пропускания 50 ГГц.

### 4. Результаты моделирования

На рис.3 приведены зависимости от  $z$  ширины одиночного импульса в точках, где распределение интенсивности  $|A|^2$  имеет минимальную ширину (в так называемых бесчирповых точках), для различных значений средней дисперсии  $\langle D \rangle$ . Видно, что при распространении импульсов вследствие большой средней отрицательной дисперсии уменьшается ширина оптических импульсов в бесчирповых точках. Таким образом, контролируя среднюю дисперсию, можно уменьшить перекрытие импульсов и подавить нелинейное взаимодействие соседних импульсов (битов). При этом обеспечивается лучшее распространение сигнала. Аналогичный результат был получен в работе [6] для импульсов гауссовой формы.

Оценкой качества коммуникационной системы является коэффициент ошибки BER, который определяется отношением числа ошибочных битов к общему числу переданных битов. В нашем случае  $BER = 10^{-9}$ . Непосредственное определение такой величины потребовало бы проведения расчетов или измерений с очень большим числом импульсов. Вместо этого предполагалось, что плотности вероятностей появления нулей и единиц  $p_i$  ( $i = 0, 1$ ) распределены по нормальному закону:

$$p_i(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (3)$$

где  $\mu_i$  и  $\sigma_i$  – средние значения и стандартные отклонения соответственно. Отсюда находится  $Q$ -фактор:  $Q = (\mu_1 -$

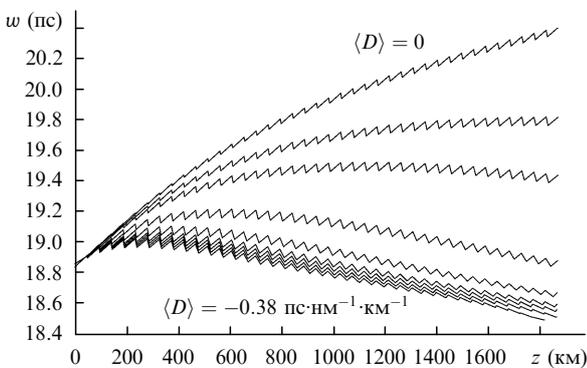


Рис.3. Ширина  $w$  одиночного оптического импульса в бесчирповых точках в зависимости от длины распространения  $z$  для средней дисперсии линии связи (для кривых сверху вниз)  $\langle D \rangle = 0, -0.03, -0.06, -0.145, -0.23, -0.29, -0.32, -0.35, -0.38 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ . Увеличение абсолютной величины средней дисперсии  $\langle D \rangle$  приводит к стабилизации ширины импульса.

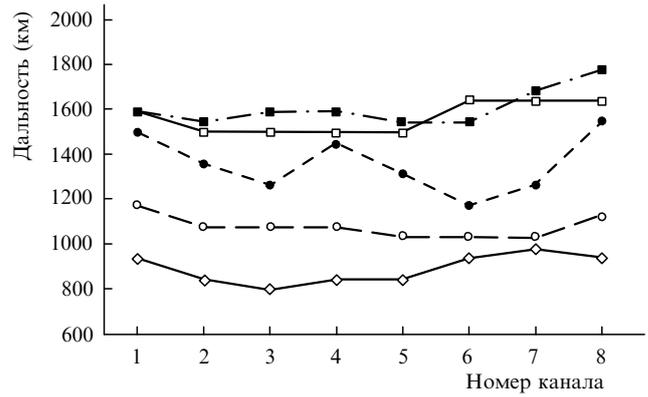


Рис.4. Расстояния, на которые распространяется оптическая информация с приемлемой вероятностью ошибки  $BER = 10^{-9}$ , при средней дисперсии линии связи  $\langle D \rangle = 0$  ( $\diamond$ ),  $-0.145$  ( $\circ$ ),  $-0.23$  ( $\bullet$ ),  $-0.32$  ( $\square$ ) и  $-0.38 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$  ( $\blacksquare$ ). Лучшими являются последние два значения  $\langle D \rangle$ .

$\mu_0)/(\sigma_1 - \sigma_0)$ . В линиях связи приемлемыми значениями  $Q$ -фактора считаются  $Q \geq 6$ . Вероятность ошибки рассчитывается по формуле

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{\sqrt{2\pi}Q}, \quad Q \gg 1. \quad (4)$$

Для вычисления  $Q$ -фактора в расчетах использовались 25 псевдослучайных последовательностей по 128 битов в каждой. Величина  $Q$ -фактора находилась как медианное среднее из 25 значений, вычисленных по каждой из последовательностей [7]. На рис.4 приведены расстояния, на которые можно передавать сигналы без специальной процедуры корректировки ошибок для различных значений средней дисперсии  $\langle D \rangle$ . Поскольку влияние нелинейности меньше при распространении импульсов по линиям связи с большой отрицательной дисперсией, то такой режим обеспечивает лучшее распространение по сравнению со случаем нулевой или небольшой средней дисперсии.

В работе [2] для моделирования разделения сигнала на каналы использовался идеальный супергауссов фильтр с коэффициентом отражения  $R(\omega) \propto \exp[-(\omega - \omega_0)^6 / (2\Delta^6)]$ , где  $\omega_0$  и  $\Delta$  – центральная частота и полуширина спектра соответственно. Считалось, что фильтрация не приводит к дополнительной групповой задержке импульсов. Была получена дальность распространения 1200 км при скорости передачи данных 40 Гбит/с в каждом канале. В настоящей работе рассматривался фильтр, более близкий к используемому в эксперименте. Его групповая задержка варьировалась от центра полосы отражения до уровня  $-10$  дБ примерно на 5 пс. Казалось бы, искаженный неоднородной групповой задержкой импульс должен пройти меньшее расстояние. Однако в процессе оптимизации нелинейное взаимодействие было скомпенсировано довольно большой по абсолютной величине средней отрицательной дисперсией, что позволило увеличить дальность до 1550 км.

### 5. Заключение

По отдельности улучшение параметров линии с помощью фильтра с плоской вершиной и большой по абсолютной величине средней дисперсией линии исследовано в работах [2] и [6] соответственно. Применение брэгговской решетки в качестве фильтра обсуждалось в ра-

боте [3]. Объединение этих методов было использовано в настоящей работе наряду с новой формой высокоотражающего брэгговского фильтра (см. формулу (1)).

Проведенные расчеты показали, что, используя неидеальные фильтры, обладающие неоднородной по частоте групповой задержкой и, следовательно, искажающие форму импульсов, можно добиться большой дальности (1550 км) передачи данных по оптоволоконной линии связи при скорости передачи 40 Гбит/с в одном канале. Для этого необходимо подобрать крутизну фронтов и ширину фильтров, обеспечивающие наименьшее перекрытие импульсов, а также спектральных каналов, и среднюю дисперсию линии, компенсирующую влияние нелинейного взаимодействия импульсов.

Настоящая работа частично поддержана Междисциплинарным интеграционным грантом № 31 СО РАН и

грантом № НШ-7214.2006.2 программы государственной поддержки научных исследований, проводимых ведущими научными школами РФ.

1. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems* (New York, Wiley, 2002).
2. Лысакова М.В., Федорук М.П., Турицын С.К., Шапиро Е.Г. *Квантовая электроника*, **34** (9), 857 (2004).
3. Tyritsyna E.G., Ania-Gastanon J.D., Turitsyn S.K., Kennedy L., *Electron. Lett.*, **39** (4), 351 (2003).
4. Skaar J., Wang L., Erdogan T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **37** (20), 165 (2001).
5. Shapiro D.A. *Opt. Commun.*, **215** (4-6), 295 (2003).
6. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Shapiro A.D., Ania-Castanon J.D., Turitsyn S.K. *Opt. Commun.*, **250** (1-3), 202 (2005).
7. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *Electron. Lett.*, **37** (19), 1179 (2001).