

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
А В Т О М Е Т Р И Я

2004, том 40, № 6

УДК 517.972.5

С. К. Турицын, М. П. Федорук, А. Д. Шапиро, Е. Г. Шапиро  
(Новосибирск)

**О НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ  
В ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ  
НА ОСНОВЕ СТАНДАРТНОГО ОДНОМОДОВОГО  
ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА\***

Проведено математическое моделирование передачи информации со скоростью 40 Гбит/с по волоконно-оптической линии, сконструированной на основе стандартного одномодового волоконного световода и дисперсионно-компенсирующего волокна. Показано, что нелинейные режимы с большой абсолютной величиной средней дисперсии обеспечивают более эффективную передачу информации по сравнению с линейными режимами, в которых средняя дисперсия линии близка к нулю.

**Введение.** Принцип управления дисперсией является определяющим при разработке магистральных сверхбыстрых волоконно-оптических линий связи (со скоростью передачи 40 Гбит/с и более в одном частотном канале). В дисперсионно-управляемых системах используются волоконные световоды с противоположной по знаку хроматической дисперсией, что позволяет контролировать дисперсионное уширение импульса. Если средняя дисперсия линии на одном периоде  $\langle D \rangle = 0$ , то в линейном случае в отсутствие затухания и шума форма сигнала будет полностью восстанавливаться в конце линии [1]. Уменьшение суммарной хроматической дисперсии позволяет подавить флуктуации положений отдельных битов, так называемый эффект Гордона – Хаусса [2]. Поэтому часто при проектировании волоконно-оптических линий связи фиксируют нулевую среднюю дисперсию.

В данной работе, однако, показано, что возможны ситуации, когда достаточно высокая абсолютная величина средней хроматической дисперсии линии обеспечивает лучшее качество передачи сигналов по сравнению с линейными режимами, в которых абсолютная величина средней дисперсии близка к нулю. Найденные режимы являются существенно нелинейными, хотя знак средней дисперсии не соответствует классическим солитонным случаям распространения сигнала.

**Постановка задачи.** Распространение оптических импульсов по волоконной линии связи с распределенной дисперсией описывается обобщен-

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-02-16496а), Интеграционного проекта СО РАН (проект № 2) и гранта Министерства науки и образования РФ (грант № ЗН-080-01).

ным нелинейным уравнением Шредингера для комплексной огибающей  $A$  электромагнитного поля [1]:

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

Здесь  $z$  – расстояние вдоль линии,  $t$  – время,  $|A|^2$  – мощность,  $\beta_2$  – коэффициент дисперсии групповой скорости,  $\sigma$  – коэффициент керровской нелинейности,  $G$  – эффективный коэффициент усиления амплитуды сигнала. Величины  $\gamma$ ,  $\sigma$  и  $\beta_2$  представлены функциями от  $z$ , чтобы учесть изменения этих параметров при переходе от одного типа световода к другому. Коэффициент нелинейности  $\sigma$  определяется формулой  $\sigma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{\text{eff}}}$ , где  $n_2$  – нелинейный по-

казатель преломления,  $\lambda_0$  – несущая длина волны,  $A_{\text{eff}}$  – эффективная площадь собственной моды световода. Точки расположения усилителей обозначены  $z_k$ ,  $\gamma$  – коэффициент затухания амплитуды сигнала,  $r_k$  – коэффициент усиления.

В работе [3] показано, что для гауссовского входного сигнала  $A(z, t) = \frac{N}{\sqrt{2\sqrt{2}T_0}} \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right)$  хорошим приближением решения уравнения (1) при слабой нелинейности является функция

$$A(z, t) = \frac{N}{\sqrt{2\sqrt{2}T(z)}} \exp\left(-\frac{t^2}{2T^2(z)} + i\frac{M(z)}{T(z)} t^2 + i\lambda(z)\right).$$

Величины  $T(z)$  и  $M(z)$  являются решением следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dz} &= 4D(z)M; \\ \frac{dM}{dz} &= \frac{D(z)}{T^3} - \frac{c(z)N^2}{T^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $c(z) = \sigma \exp\left(2 \int_0^z G(z') dz'\right)$ . Величины  $\beta_2(z)$  и  $D(z)$  связаны равенством

$$\beta_2 = -\frac{\lambda_0^2 D}{2\pi c_l} \quad (c_l \text{ – скорость света}); \quad \lambda(z) \text{ – линейный набег фазы. Ширина опти-}$$

ческого импульса меняется при распространении и достигает локального минимума в так называемых бесцирповых точках, где  $M(z) = 0$ .

Получение численных решений системы уравнений (2) требует гораздо меньших вычислительных затрат по сравнению с прямым моделированием исходного уравнения (1). Далее определенные оптимальные параметры линии связи на основе системы уравнений (2) можно уточнить, решая напрямую уравнение (1).

Параметры волоконных световодов	SMF	DCF
Затухание при 1550 нм (дБ/км)	0,2	0,65
Эффективная площадь (мкм <sup>2</sup> )	80	19
Дисперсия (пс/нм/км)	17	-100
Дисперсионный наклон (пс/нм <sup>2</sup> /км)	0,07	-0,41
Нелинейный показатель преломления (м <sup>2</sup> /Вт)	$2,7 \cdot 10^{-20}$	$2,7 \cdot 10^{-20}$

**Результаты численного моделирования.** Рассмотрена оптическая система, состоящая из 17 участков, вида

$$\text{SMF}(85 \text{ км}) + \text{EDFA} + \text{DCF}(15 \text{ км}) + \text{EDFA}.$$

Здесь EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) – волоконно-оптический эрбиевый усилитель, SMF – стандартное одномодовое волокно, DCF – дисперсионно-компенсирующее волокно. На каждом участке использовались два усилителя с коэффициентами усиления, позволяющими полностью компенсировать затухание сигнала в соответствующих волокнах. Суммарные потери одной секции составляли 26,8 дБ. Остаточная дисперсия линии компенсировалась дополнительным куском стандартного одномодового волокна. В таблице представлены параметры волоконных световодов.

На рис. 1 и рис. 2 приведены зависимости ширины оптического импульса от расстояния  $z$  в бесчирповых точках для гауссовского входного сигнала с начальной шириной 12,5 пс, полученные из численного решения уравнения (1) (кривые 1) и системы (2) (кривые 2) при значениях средней дисперсии  $\langle D \rangle = 0$  и  $\langle D \rangle = -0,65$  пс/нм/км соответственно.

Отметим, что имеется качественное согласие между решением уравнения Шредингера (1) и решением модельных уравнений (2). Для режимов с нулевой средней дисперсией наблюдается уширение оптического импульса. В режимах с достаточно большой величиной отрицательной средней дисперсии ( $\langle D \rangle \approx -0,7$  пс/нм/км) наблюдается стабилизация начальной ширины сигнала.

Оценкой качества коммуникационной системы является величина коэффициента ошибки (Bit-Error Rate (BER)), которая определяет количество ошибочных битов к общему числу переданных битов [4]. В данной работе

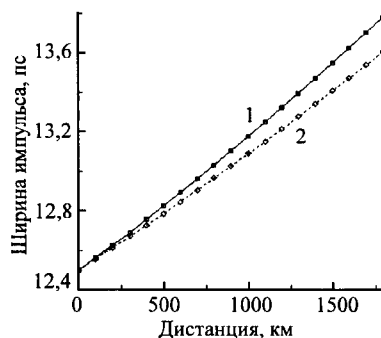


Рис. 1

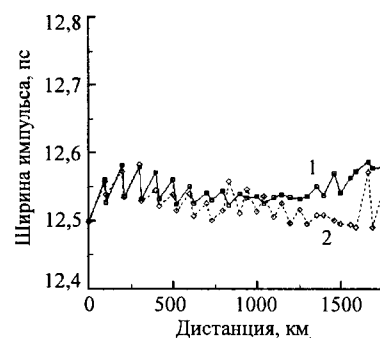


Рис. 2

критерием качества передачи сигнала является стандартная величина  $Q$ -фактор, которая связана с BER следующим образом:

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

Предположим, что плотности вероятностей нулей и единиц  $p_i$  ( $i=0,1$ ) распределены по нормальному закону

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

где  $\mu_i$  – средние значения,  $\sigma_i$  – дисперсии. Тогда  $Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$  [4].

В линиях, где используются теоретико-информационные методы коррекции ошибок [5], приемлемыми значениями  $Q$ -фактора считаются  $Q \geq 4$  и более.

Мощность оптического сигнала имеет некое оптимальное значение, поскольку при малой мощности шумы усиленной спонтанной эмиссии эрбиевых усилителей увеличивают коэффициент ошибки в передаче данных. Использование более мощных импульсов увеличивает отношение сигнал/шум, но при этом усиливается роль нелинейных эффектов, которые тоже ведут к ухудшению качества сигнала. Поэтому имеется такое значение пиковой мощности входных импульсов с фиксированной шириной, которое обеспечивает наилучший баланс между эффектами шума и нелинейности с точки зрения максимизации величины  $Q$ -фактора. Режимы с относительно большой отрицательной дисперсией ( $\langle D \rangle \approx -0,6 \dots -0,8$  пс/нм/км) допускают квазиустойчивый нелинейный режим распространения без значительного «расплывания» оптических импульсов, что уменьшает роль взаимодействия соседних битов. Это позволяет при выбранной ширине импульса использовать более мощные входные сигналы, что, в свою очередь, улучшает отношение сигнал/шум без существенного ухудшения качества сигнала из-за нелинейности.

Было выполнено численное моделирование распространения оптических импульсов в восьми каналах на длинах волн 1550,1–1555,8 нм с разделением 0,8 нм между соседними каналами и со скоростью передачи 40 Гбит/с в

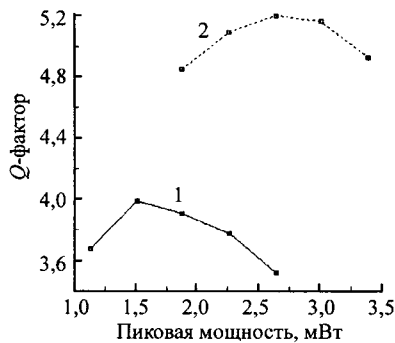


Рис. 3

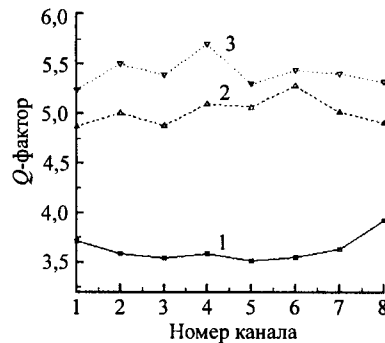


Рис. 4

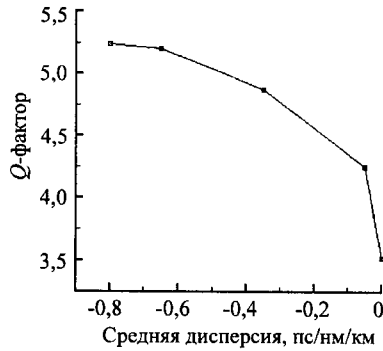


Рис. 5

одном частотном канале. Для вычисления величины  $Q$ -фактора в конце линии в расчетах использовались 25 псевдослучайных последовательностей по 128 бит в каждой. Величина  $Q$ -фактора находилась как медианное среднее из 25 значений, вычисленных по каждой из последовательностей [6]. На рис. 3 приведена зависимость  $Q$ -фактора в худшем из каналов от пиковой мощности входного импульса при средних дисперсиях  $\langle D \rangle = 0$  (кривая 1) и  $\langle D \rangle = -0,65$  пс/нм/км (кривая 2). Оптимальное значение пиковой мощности входного сигнала при  $\langle D \rangle = -0,65$  пс/нм/км больше, чем

при нулевой дисперсии, однако уменьшение отрицательной роли нелинейных эффектов в этом случае приводит к уменьшению коэффициента ошибки (увеличению  $Q$ -фактора). На рис. 4 показаны значения  $Q$ -фактора в восьми каналах в конце линии при  $z = 1700$  км для следующих значений средней дисперсии системы:  $\langle D \rangle = 0$  (кривая 1),  $\langle D \rangle = -0,35$  (кривая 2),  $\langle D \rangle = -0,8$  пс/нм/км (кривая 3).

Наконец, на рис. 5 представлены графики зависимости  $Q$ -фактора в худшем канале от средней дисперсии  $\langle D \rangle$  при фиксированной пиковой мощности входных импульсов, равной 2,64 мВт.

**Заключение.** В данной работе показано, что нелинейные режимы передачи информации по линии связи с отрицательной средней дисперсией порядка  $\langle D \rangle \approx -0,7$  пс/нм/км, состоящей из кусков стандартного одномодового волокна и дисперсионно-компенсирующего волокна, демонстрируют лучшее качество передачи информации по сравнению с линиями, в которых абсолютная величина средней дисперсии близка к нулю (линейные режимы распространения). Достигнутая в нелинейных режимах передачи информации величина  $Q \geq 4$  позволяет применять для таких линий теоретико-информационные методы коррекции ошибок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agrawal G. P. Nonlinear Fiber Optics. San Diego: Academic Press, 2001.
2. Gordon J. P., Haus H. A. Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission // Opt. Lett. 1986. 11. P. 665.
3. Gabitov I., Turitsyn S. K. Breathing solitons in optical fiber links // JETP Lett. 1996. 63. P. 861.
4. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication systems. N. Y.: John Willey & Sons, INC., 1997.
5. Grover W. D. Forward error correction in dispersion-limited lightwave systems // Journ. Lightwave Technol. 1988. 6. P. 643.
6. Shapiro E. G., Fedoruk M. P., Turitsyn S. K. Numerical estimate of BER in optical systems with strong patterning effects // Electron. Lett. 2001. 37, N. 19.

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
Институт вычислительных технологий СО РАН,  
Новосибирский государственный университет,  
E-mail: mife@ict.nsc.ru

Поступила в редакцию  
6 апреля 2004 г.