

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

Штырина Ольга Владимировна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛИТОННЫХ
ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2006

Работа выполнена в Институте вычислительных технологий
Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Михаил Петрович Федорук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Александр Михайлович Блохин

кандидат физико-математических наук,
доцент Елена Геннадьевна Шапиро

Ведущая организация: Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск.

Защита состоится 8 сентября 2006 года в 15⁰⁰ часов на заседании дис-
сертационного совета Д 003.046.01 при Институте вычислительных тех-
нологий СО РАН по адресу:

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, конференц-
зал ИВТ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном
зале вычислительной математики и информатики научного отделения
СО ГПНТБ (проспект академика М.А.Лаврентьева, 6).

Автореферат разослан « ____ » августа 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Л. Б. Чубаров

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Беспрецедентное увеличение пропускной способности волоконно-оптических линий связи обусловлено увеличением спроса на телекоммуникационные услуги. Действительно за последние 25 лет суммарная скорость передачи информации возрасла на пять порядков и достигла величины ~ 1 Тбит/с. Однако, даже такие скорости передачи информации не смогут удовлетворить все возрастающие потребности пользователей Интернета, поскольку их число непрерывно растет. Так, если в 1998 году в мире было около 25 млн. человек пользователей Интернета, то в конце 2005 г. число пользователей составило уже 970 млн. человек. Поэтому весьма актуальной является задача дальнейшего увеличения пропускной способности оптических линий связи, которое возможно либо путем расширения спектрального диапазона передачи данных, либо путем увеличения спектральной эффективности передачи данных, которая определяется как отношение скорости передачи информации в одном частотном канале к расстоянию между соседними частотными каналами.

Ключевую роль в модернизации существующих линий связи и в создании будущего поколения высокоскоростных магистральных линий оптической связи играют методы математического моделирования, поскольку экспериментальные методы исследования этих систем зачастую оказываются невозможными, а возможности аналитических методов весьма ограничены.

Актуальность настоящей диссертационной работы определяется тем, что в ней методами математического моделирования решен ряд задач, способствующих разработке сверхскоростных магистральных линий передачи информации.

Целью работы является создание, тестирование и обоснование эффективных численных алгоритмов и реализующих их программ для изучения эволюции оптических импульсов большой амплитуды в оптоволоконных линиях связи сверхбольшой протяженности и способов управления параметрами сигналов при их распространении по волоконным линиям связи с целью существенного увеличения дальности передачи информации и пропускной способности этих линий.

Научная новизна. Разработан оригинальный эффективный численный алгоритм решения обобщенного интегрального уравнения Шредингера, основанный на рекуррентном методе вычисления интегрально-

го оператора. Впервые определены основные характеристики процесса формирования оптического сигнала с ультра-широким плоским спектром в результате распространения и модуляции непрерывной волны накачки в волоконном световоде в режиме аномальной хроматической дисперсии.

Разработан новый эффективный численный алгоритм для построения солитонных решений в рамках усредненного обобщенного уравнения Шредингера. Найдены новые солитонные решения для важных в практическом отношении дисперсионных конфигураций волоконных линий связи.

Предложена конфигурация оптического $2R$ регенератора сигналов на основе полупроводникового насыщающегося поглотителя. Определены параметры конкретных конфигураций многоканальных оптоволоконных линий связи с дисперсионным управлением и периодически встроенными в них оптическими регенераторами, и установлено, что оптические сигналы в подобных линиях связи способны передаваться на расстояния порядка 8-10 тысяч километров с пропускной способностью 40 Гбит/сек в одном частотном канале и спектральной эффективностью 0.2 бит/Гц/с.

Практическая ценность работы. Разработанные эффективные численные алгоритмы и реализующие их комплексы программ могут быть применены для решения задач выбора оптимальной конфигурации волоконно-оптических линий связи. Результаты исследований могут быть использованы для модернизации существующих линий оптической связи и при создании сверхбыстрых солитонных линий связи.

Основные положения выносимые на защиту:

- новый эффективный численный алгоритм решения обобщенного интегрального уравнения Шредингера с использованием рекуррентного метода вычисления интегрального оператора;
- оригинальный экономичный численный алгоритм для решения нелинейного усредненного уравнения Шредингера в спектральной области, основанный на теореме о свертке и методе стабилизирующей поправки;
- новые солитонные решения нелинейного усредненного уравнения Шредингера в спектральной области для практически важных конфигураций волоконно-оптических линий связи с дисперсионным управлением (распределенной дисперсией);
- методология эффективного уширения непрерывной волны накачки в широкополосных Рамановских усилителях на основе эффекта модуля-

ционной неустойчивости;

• определенные, на основе вычислительных экспериментов, оптимальные параметры высокоскоростных волоконно-оптических линий связи со спектральным уплотнением каналов и оптических регенераторов сигналов, обеспечивающие максимальные дистанции распространения информационных сигналов.

Апробация работы. Участие в научных конференциях и симпозиумах — устные доклады:

1. CLEO Europe-2005, 2005, Munich, Germany.

2. International Conference on Computational Mathematics, 2004, Novosibirsk, Russia;

3. Nonlinear Guided Waves and Their Applications, 2004, Toronto, Canada;

4. МНСК "Интеллектуальный потенциал Сибири", 2003 г., Новосибирск, Россия;

5. International Conference on Computational Mathematics, 2002, Novosibirsk, Russia;

6. МНСК "Студент и научно-технический прогресс", 2001-2003 гг., Новосибирск, Россия;

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении грантов РФФИ (гранты № 99-02-16688, № 03-02-16496 и № 06-01-00210), междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 31, грантов Министерства образования и науки РФ (проекты № 1.80.01 и № 1.13.06) и инновационного гранта INTAS-03-56-203.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-12]. При выполнении работ [1-8], опубликованных совместно с научным руководителем и другими соавторами, О.В. Штырина принимала участие в постановке задачи, разработке численных алгоритмов, обсуждении полученных результатов, подготовке и представлении статей и докладов на конференциях. Ею выполнена программная реализация разработанных численных алгоритмов, проведены расчеты тестовых задач и значительный цикл вычислительных экспериментов. Кроме того, Штыриной О.В. в [7,8] проведена серия расчетов, а также сравнение и анализ полученных результатов с экспериментальными данными.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Содержание работы

Во **Введении** формулируются основные цели и задачи диссертационной работы и приведено краткое ее содержание по главам.

Глава 1 состоит из 4 параграфов, в которых формулируется постановка задачи, обсуждаются математические модели и алгоритмы их численной реализации излагаются результаты численного моделирования по исследованию процесса уширения непрерывной волны накачки в волоконных световодах вследствие развития модуляционной неустойчивости CW-волны. На основе этих результатов формулируются основные правила, необходимые для эффективного уширения непрерывной волны накачки в широкополосных Рамановских усилителях на основе эффекта модуляционной неустойчивости.

В **первом параграфе** выполнены краткий обзор литературы и постановка задачи по изучению процесса уширения непрерывной волны накачки в волоконных световодах в режимах аномальной хроматической дисперсии.

Во **втором параграфе** дается краткий вывод основных физико-математических моделей, которые используются в диссертации для моделирования процесса уширения: обобщенного интегрального нелинейного уравнения Шредингера и обобщенного нелинейного уравнения Шредингера.

Обобщенное интегральное нелинейное уравнение Шредингера для комплексной огибающей A амплитуды электромагнитного поля имеет вид:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{\alpha}{2} A - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \sigma \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left[A \int_0^{\infty} R(t') |A(t-t')|^2 dt' \right] = 0, \quad (1)$$

здесь z — расстояние вдоль линии, t — время, $|A|^2$ — мощность, β_2 — параметр дисперсии групповой скорости, β_3 — дисперсия третьего порядка, σ — коэффициент керровской нелинейности, α — эффективный коэффициент, учитывающий затухание и усиление сигнала. Величины β_2 , β_3 , σ и α представлены как функции от z , чтобы учесть изменения этих параметров при переходе от одного типа световода к друго-

му. Коэффициент нелинейности σ определяется формулой $\sigma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}}$, где n_2 — нелинейный показатель преломления, λ_0 — несущая длина волны, $\omega_0 = \frac{c_l}{\lambda_0}$ — радиальная частота несущего сигнала, c_l — скорость света, A_{eff} — эффективная площадь собственной моды световода, $R(t) = (1 - f_R)\delta(t) + f_R h_R(t)$ является функцией запаздывающего отклика среды. Здесь $\delta(t)$ — дельта-функция, и f_R — парциальный вклад рамановского отклика. Для функции рамановского отклика h_R использовалось приближение демпфированного осциллятора [1]:

$$h_R(t) = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{\tau_1 \tau_2^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \sin\left(\frac{t}{\tau_1}\right), \quad (2)$$

где $\tau_1=12.2$ фс, $\tau_2=32$ фс.

Для сигналов с длительностями $T_{FWHM} \gg 10$ фс, уравнение (1) может быть существенно упрощено. В этом случае подынтегральную функцию $|A(z, t - t')|^2$ можно разложить в ряд Тейлора:

$$|A(z, t - t')|^2 \approx |A(z, t)|^2 - t' \frac{\partial}{\partial t} |A(z, t)|^2.$$

Определим первый момент нелинейной функции отклика как

$$T_R \equiv \int_{-\infty}^{\infty} t R(t) dt = f_R \int_{-\infty}^{\infty} t h_R(t) dt = f_R \frac{d(\mathfrak{I}\tilde{h}_R)}{d(\Delta\omega)} \Big|_{\Delta\omega=0},$$

и заметим, что $\int_0^{\infty} R(t) dt = 1$, тогда уравнение (1) сводится к обобщенному нелинейному уравнению Шредингера:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{\alpha}{2} A - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \sigma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right] = 0, \quad (3)$$

В **третьем параграфе** рассмотрены алгоритмы численной реализации уравнений (1) и (3). Алгоритмы численной реализации уравнения (3) хорошо известны. В диссертационной работе для численного решения

уравнения (3) использовалась симметричная форма метода расщепления по физическим процессам, которая имеет второй порядок точности по шагу h эволюционной переменной z [1].

При решении уравнения (1) основная трудность состоит в построении эффективного численного алгоритма вычисления интегрального оператора

$$N(A, t) = \int_0^{\infty} R(t') |A(t - t')|^2 dt' .$$

Таким образом, используя аналитическое выражение (2) для функции h_R мы приходим к вычислению интеграла

$$\tilde{N}(A, t) = \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{t'}{\tau_2}\right) \sin\left(\frac{t'}{\tau_1}\right) |A(t - t')|^2 dt' . \quad (4)$$

Сделаем замену переменных $s = t - t'$, тогда интеграл (4) переписется в следующем виде

$$\tilde{N}(A, t) = \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t-s)}{\tau_2}\right) \sin\left(\frac{(t-s)}{\tau_1}\right) |A(s)|^2 ds .$$

Далее легко показать, что

$$\tilde{N}(A, t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \left[\sin\left(\frac{t}{\tau_1}\right) \tilde{N}_1(A, t) - \cos\left(\frac{t}{\tau_1}\right) \tilde{N}_2(A, t) \right] ,$$

Вычисление интегралов $\tilde{N}_i(A, t)$ проводится по следующей схеме

$$\tilde{N}_i(A, t_{j+1}) = \tilde{N}_i(A, t_j) + \int_{t_j}^{t_{j+1}} \tilde{n}_i(A, t_{j+1}, s) ds ,$$

где $t_j = jh$, $j \in [-\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2}]$, $t_j \in [-a, a]$.

Легко видеть, что для вычисления интегрального оператора (4) потребуется $O(N)$ операций, где N — число точек на интервале интегрирования.

В четвертом параграфе на основе вычислительного алгоритма, предложенного в третьем параграфе, выполнено численное моделирование процесса уширения непрерывной волны накачки за счет развития модуляционной неустойчивости. Для существенного расширения спектрального диапазона передачи данных и увеличения числа информационных каналов необходимо создать волоконный рамановский усилитель с равномерной полосой усиления порядка нескольких сотен нанометров [2]. Для эффективного уширения и выравнивания полосы усиления непрерывной волны накачки (CW-волны) предлагается использовать эффект модуляционной неустойчивости. В этом параграфе представлено детальное исследование процесса нелинейного уширения рамановской волны накачки, инициированного развитием модуляционной неустойчивости. Выполнена серия расчетов по оптимизации параметров уширения в волоконном Tmewave (TW) световоде. На рисунке 1 показана зависимость периода колебаний от входной мощности накачки. Сплошная кривая — результаты численных расчетов, пунктирная — соответствует теоретическому закону убывания периода колебаний $T \propto P_{in}^{-1/2}$. Рисунок 2 иллюстрирует полученную численно зависимость ширины спектра от хроматической дисперсии на выходе из TW-световода длиной 25 км и входной мощностью накачки $P_{in} = 0.9$ Вт, а на рисунке 3 показан характерный вид спектра уширенной накачки для величины хроматической дисперсии $D = 0.03$ пс/нм/км. Изолинии спектральной ширины в плоскости (длина световода, дисперсия) представлены на рисунке 4 для выходной мощности накачки $P_{out} = 0.25$ Вт.

Глава 2 также состоит из 4 параграфов.

В первом параграфе дается краткий обзор литературы и описываются основные свойства, так называемых, дисперсионно-управляемых солитонов (ДУ-солитонов) в волоконно-оптических линиях связи с периодически меняющейся дисперсией.

Солитоны с дисперсионным управлением являются новым типом оптических носителей информации. Численное моделирование и данные лабораторных экспериментов позволили выявить ряд особых свойств ДУ-солитонов, существенно отличающих их от фундаментального солитона нелинейного уравнения Шредингера с постоянными коэффициентами (см., например, [3]).

Во втором параграфе формулируется математическая модель для построения ДУ-солитонных решений в рамках усредненного нелинейного уравнения Шредингера в спектральной области. Рассмотрим нели-

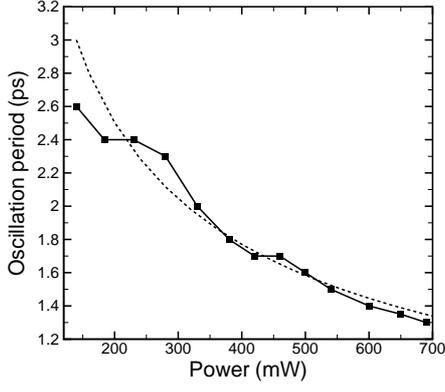


Рисунок 1

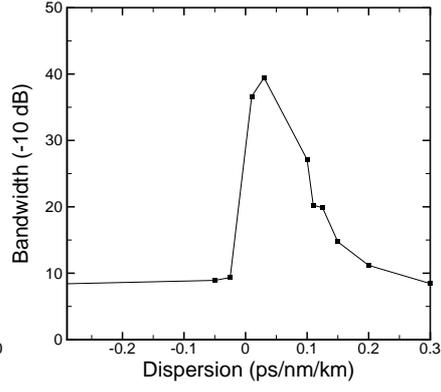


Рисунок 2

нейное уравнение Шредингера с периодическими коэффициентами

$$iA_z + d(z)A_{tt} + \epsilon c(z)|A|^2A = 0, \quad (5)$$

здесь

$$\begin{aligned} \epsilon c(z) &= \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}} \exp\left[2 \int_0^z G(z') dz'\right], \\ d(z) &= \frac{\lambda_0^2 D(z)}{4\pi c_l}, \\ D(z) &= -\frac{2\pi c_l}{\lambda_0^2} \beta_2(z), \end{aligned}$$

где $g(z)$ — эффективный коэффициент, описывающий затухание и усиление оптических сигналов. В предположении, что нелинейная длина L_{NL} много больше дисперсионной длины L_D , уравнение (5) можно усреднить и получить следующее уравнение [4]:

$$i\Psi_z - \langle d \rangle \omega^2 \Psi + G(\Psi, \omega) = 0, \quad (6)$$

где $\Psi(\omega_k)$ есть Фурье-образ усредненной переменной, $\langle d \rangle = \int_0^1 d(z) dz$ — средняя дисперсия, $G(\Psi, \omega)$ есть нелинейный интегральный оператор:

$$G(\Psi, \omega) = \epsilon \int T_{\omega_1 \omega_2 \omega_3} \Psi^*(\omega_1) \Psi(\omega_2) \Psi(\omega_3) \times \delta(\omega + \omega_1 - \omega_2 - \omega_3) d\omega_1 d\omega_2 d\omega_3,$$

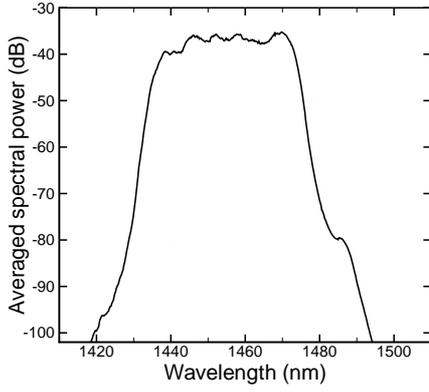


Рисунок 3

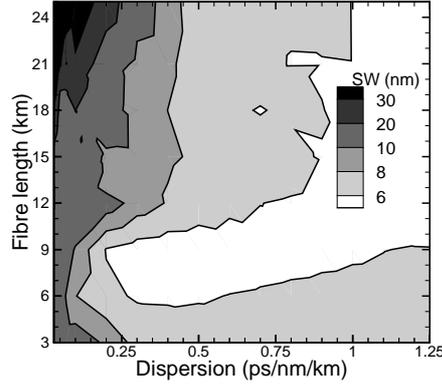


Рисунок 4

с матричным элементом $T_{\omega 123}$, который является функцией величины $\Delta\Omega = \omega^2 + \omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2$:

$$T_{\omega 123} = T(\Delta\Omega) = \int_0^1 c(z) e^{iR(z)\Delta\Omega} dz.$$

Функция $R(z)$ определяется из обыкновенного дифференциального уравнения $R_z = d(z) - \langle d \rangle$. Уравнение (6) имеет стандартную форму типичную для моделей, описывающих четырехволновое взаимодействие с квадратичным законом дисперсии. Поэтому специфические свойства модели определяются зависимостью матричного элемента T от $\Delta\Omega$ [5].

Будем искать солитонное решение уравнения (6) в следующей форме:

$$\Psi(\omega, z) = \psi(\omega) \exp(i\lambda^2 z).$$

Тогда уравнение, описывающее форму ДУ-солитона $\psi(\omega)$ принимает вид:

$$(\lambda^2 + \langle d \rangle \omega^2) \psi = G(\psi, \omega). \quad (7)$$

В **третьем параграфе** предложен численный алгоритм реализации уравнения (7), основанный на теореме о свертке и методе стабилизирующей поправки Петвиашвили. Идея метода состоит в аппроксимации матричного элемента $T(\Delta\Omega)$ соответствующим набором функ-

ций. Такая аппроксимация позволяет применить алгоритм быстрого вычисления свертки и уменьшить число операций до величины порядка $M N \log_2(N)$, где M зависит от конкретной аппроксимации $T(\Delta\Omega)$.

Если матричный элемент T — быстро осциллирующая функция, тогда возможно применить тригонометрическую аппроксимацию T , которая позволяет использовать алгоритм быстрого вычисления свертки:

$$T(\Delta\Omega) = \sum_{n=0}^M T_n \exp(iR_n \Delta\Omega),$$

где R_n — некоторые коэффициенты.

Способ получения тригонометрического разложения заключается в нахождении коэффициентов ряда Фурье функции $T(\Delta\Omega)$ на интервале интегрирования. Матричный элемент $T(\Delta\Omega)$ имеет очевидную симметрию, поэтому интегральный оператор представляется в симметричной форме. Интегрируя по ω_1 , и, вводя новые симметричные переменные $\omega_2 = \bar{\omega}_1 + \omega$ и $\omega_3 = \bar{\omega}_2 + \omega$, получим интеграл:

$$\int T_n e^{iR_n \Delta\Omega} \psi^*(\omega + \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2) \psi(\omega + \bar{\omega}_1) \psi(\omega + \bar{\omega}_2) d\bar{\omega}_1 d\bar{\omega}_2,$$

где $\Delta\Omega = \omega^2 + (\omega + \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2)^2 - (\omega + \bar{\omega}_1)^2 - (\omega + \bar{\omega}_2)^2$. Факторизуя матричный элемент, получим следующую симметричную форму, которая удобна для быстрых вычислений:

$$T_n e^{iR_n \omega^2} \int \left[e^{-iR_n(\omega + \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2)^2} \psi(\omega + \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2) \right]^* \cdot \\ \cdot \left[e^{-iR_n(\omega + \bar{\omega}_1)^2} \psi(\omega + \bar{\omega}_1) \right] \left[e^{-iR_n(\omega + \bar{\omega}_2)^2} \psi(\omega + \bar{\omega}_2) \right] d\bar{\omega}_1 d\bar{\omega}_2.$$

Для вычисления этого интеграла можно использовать быстрый алгоритм для свертки и корреляции.

В четвертом параграфе построены конкретные примеры солитонных решений уравнения (7) для случаев мало-масштабного и крупномасштабного дисперсионных управлений. Здесь мы используем выражения "крупномасштабные" или "маломасштабные", если длина дисперсионной компенсации соответственно больше или меньше расстояния между оптическими усилителями.

Мы ограничимся здесь только одним характерным примером построения солитонных решений для случая маломасштабного дисперсионно-

го управления. Распределение мощности ДУ-солитона (сплошная линия) и фундаментального солитона с равной амплитудой (прерывистая линия) представлены на рисунке 5 при различных J . Здесь $J = \frac{Z_a}{L}$, где Z_a — расстояние между усилителями, L — длина компенсации дисперсии. Заметим, что при больших J , форма ДУ-солитона близка к форме фундаментального солитона. Этот результат полностью согласуется с теорией, развитой в [6].

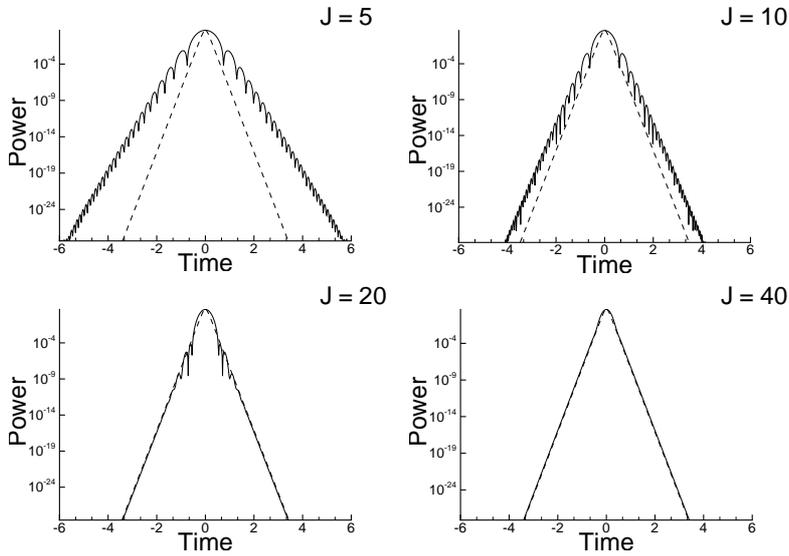


Рисунок 5

Глава 3 состоит из 4 параграфов.

В **первом параграфе** описаны основные способы оптической регенерации сигналов и сформулирована задача оптимизации волоконно-оптических линий связи в терминах коэффициента ошибки (Bit-Error Rate). Известно, что наиболее экономичным способом увеличения спектральной эффективности передачи данных в многоканальных линиях оптической связи является увеличение скорости передачи данных одного частотного канала. В работе [7] отмечается, что увеличение скорости передачи информации в четыре раза обеспечивает снижение стоимости единицы передаваемой информации примерно в 2.5 раза.

К числу наиболее перспективных способов дальнейшего увеличения пропускной способности одного частотного канала до скоростей передачи 40 Гбит/с и более относится технология оптической регенерации сигналов.

Во **втором параграфе** приведена принципиальная схема $2R$ оптического регенератора и сформулирована математическая модель полупроводникового насыщающегося поглотителя, который является основным элементом данного устройства. Принцип работы насыщающегося поглотителя (SA) заключается в поглощении мощности входящего в него оптического сигнала, если она окажется ниже некоторой пороговой мощности P_{sat} . При мощностях, больших P_{sat} , коэффициент пропускания SA быстро возрастает и асимптотически приближается к единице. В таких условиях маломощное излучение усиленного спонтанного шума и фоновое дисперсионное излучение подавляются SA. Использование SA в сочетании с узкополосным оптическим фильтром и сильно нелинейным волоконным световодом (HNF) позволяет подавить шумы в единичных битах. Функция потерь $\alpha(t)$ в насыщающемся поглотителе (SA), зависящая от времени и мощности входного сигнала, описывается следующим уравнением:

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = -\frac{\alpha(t) - \alpha_0}{\tau} - \frac{\alpha(t) P(z^*, t)}{\tau P_{sat}},$$

где $P(z^*, t) = |A(z^*, t)|^2$ — распределение мощности входного сигнала, $\alpha_0 = -3$ дБ — постоянные потери, $z^* \equiv const$ — фиксированное расстояние, P_{sat} является пороговой мощностью насыщения, и τ соответствует времени спада импульса.

Тогда передаточная функция $T(t) = 1 - \alpha(t, P(z^*, t))$, и действие SA на сигнал описывается следующим образом:

$$P_{out}(z^*, t) = [1 - \alpha(t, P_{in}(z^*, t))] P_{in}(z^*, t) = T(t) P_{in}(z^*, t).$$

Здесь P_{in} и P_{out} соответственно входная и выходная мощности оптического сигнала.

В **третьем параграфе** дается описание комплекса программ, который используется для исследования эволюции оптических импульсов в волоконных световодах и решения задач оптимизации многоканальных волоконно-оптических линий связи с распределенной дисперсией.

Четвертый параграф посвящен автосолитонным режимам распространения одиночных оптических импульсов в симметричной волоконно-оптической линии связи. Здесь же рассмотрены примеры оптимизации двух практических многоканальных оптических линий связи с симметричными конфигурациями со скоростью передачи данных $B = 40$ Гбит/с в одном частотном канале. Распространение оптических сигналов вдоль волоконных световодов определяется уравнением (3).

Результаты численного моделирования показали, что любой входной импульс (в пределах некоторой области значений параметров) эволюционирует в устойчивое асимптотическое решение (оптический автосолитон). На рисунке 6 показан фазовый портрет сигнала в плоскости (параметр фазовой модуляции, ширина сигнала). Рисунок 7 представляет эволюцию входного гауссовского импульса на выходе из оптического регенератора.

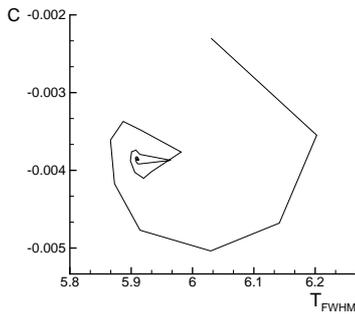


Рисунок 6

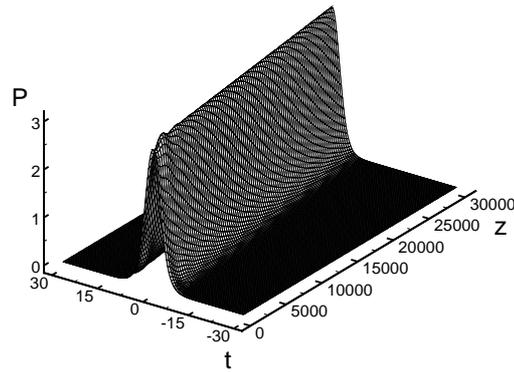


Рисунок 7

Для оценки коэффициента ошибки обычно используется непрямым статистический метод оценки — концепция Q -фактора оптической линии связи [8]. В случае бинарного ООК-формата "включено-выключено" в предположении, что статистика нулевых и единичных битов подчиняется нормальному закону распределения, величина Q -фактора системы равна

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0},$$

где μ_i и σ_i при $(i = 0, 1)$ — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение для нулевых и единичных битов соответственно.

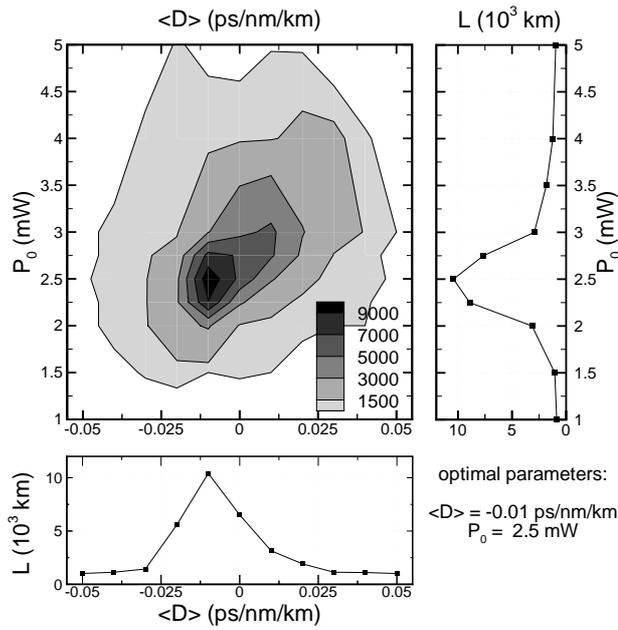


Рисунок 8

Тогда

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

здесь erfc — модифицированная функция ошибок. Отметим, что коэффициенту ошибки $BER \leq 10^{-9}$ соответствует значение $Q \geq 6$. Мы использовали в роли критерия качества передачи сигнала величину Q-фактора, и дистанцию передачи данных определяли как расстояние, для которого величина $Q \geq 6$. Для вычисления дистанции передачи данных в расчетах, представленных ниже, использовались псевдослучайные последовательности с длинами в $2^{10} - 1 \div 2^{14} - 1$ бита, и дистанция передачи данных вычислялась как расстояние, при котором $Q \geq 6$. Далее дистанция передачи данных выбиралась как наименьшее расстояние по всем частотным каналам.

На рисунке 8 представлен характерный пример результатов много-

численных численных расчетов. В расчетах рассматривалось 4 частотных канала с расстоянием $\delta\nu = 200$ ГГц между соседними каналами.

На этом рисунке показан результат оптимизации линии PSCF + RDF + PSCF + EDFA в плоскости параметров (средняя дисперсия линии, входная пиковая мощность). Параметры соответствующих волоконных световодов приведены в тексте диссертации. Видно, что соответствующим выбором параметров оптического регенератора, входной пиковой мощности импульсов и средней дисперсии линии можно достичь дистанции передачи данных свыше 10000 км. Данная система без оптических регенераторов демонстрирует дистанцию распространения около 2000 км.

Оптимизационные расчеты были выполнены также для линии TL + RTL + TL + EDFA. Здесь при оптимальных параметрах системы удалось достичь дистанции распространения более 8000 км.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации, которые в целом совпадают с основными положениями, выносимыми на защиту.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Штырина О.В., Турицын С. К., Федорук М.П. *Исследование волоконно-оптических линий связи с оптической регенерацией сигналов* // Квантовая электроника.–2005.–Т.35.–№ 2.–С.169-174.
2. Федорук М.П., Штырина О.В. *Математическое моделирование и оптимизация волоконно-оптических линий связи с дисперсионным управлением и оптической регенерацией сигналов* // Вычислительные технологии.–2004.–Т.9.–С.150-158.
3. Fedoruk M.P., Shtyrina O.V., Turitsyn S.K. *Autosolitons in dispersion-managed systems with in-line saturable absorbers* // Optics Letters.–2004.–V.29.–№21.–P.2464-2466.
4. Shtyrina O.V., Fedoruk M.P. *Numerical simulation and optimization of fibre links with optical regenerators* // Труды Международной конференции по вычислительной математике. – Новосибирск (МКМВ-2004).–2004.–Ч.2.–С.932-935.
5. O.V.Shtyrina, S.B.Medvedev and M.P.Fedoruk *Dispersion-managed soliton for path-averaged model of optical fiber communication line*

// Proceedings of the International Conference on Computational Mathematics.–2002.–Part 2.–P.697-703.

6. Medvedev S.B., Shtyrina O.V., Musher S.L., Fedoruk M.P. *Path-averaged optical solitons in double-periodic dispersion-managed systems* // Physical Review E.–2002.–V.66.–P.066607-1-0.66607-6.
7. Ellingham T.J., Fedoruk M.P., Shtyrina O.V., Ania-Castanon J.D., Turitsyn S.K. *Design of a fiber scheme for nonlinear Raman pump broadening through modulation instability* // Conference Digest for CLEO Europe.–2005, Munich, Germany.–P.CJ-1-WED.
8. Ellingham T.J., Ania-Castanon J.D., Shtyrina O.V., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *CW Raman pump broadening using modulational instability* // Nonlinear Guided Waves and Their Applications.–2004.–None.–MC42.
9. Штырина О.В. Солитоны с управляемой дисперсией для усредненной модели в оптоволоконных линиях связи. // Материалы Международной научной студенческой конференции "Интеллектуальный потенциал Сибири". Новосибирск.–2003.–С.13.
10. Штырина О.В. Математическое моделирование генерации суперконтинуума в волоконных световодах // Материалы XLI Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс", секция "Математика". Новосибирск.–2003.–С.128.
11. Штырина О.В. Солитоны с управляемой дисперсией для усредненной модели в оптоволоконных линиях связи. // Материалы XL Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс", секция "Математика". Новосибирск.–2002.
12. Штырина О.В. Численное моделирование оптоволоконных линий связи в средах с периодически меняющейся дисперсией // Материалы XXXIX Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс", секция "Математика". Новосибирск.–2001.–С.106.

Литература

- [1] Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2001.
- [2] Дианов Е.М. От тера-эры к пета-эре // Вестник РАН – 2000 – Т.70 – №11.– С.1010-1015.
- [3] TURITSYN S.K., SHAPIRO E.G., MEDVEDEV S.B., FEDORUK M.P., MEZENTSEV V.K. Physics and mathematics of dispersion-managed optical solitons // Comptes Rendus. Physique.–2003.–V.4.–P.145-161.
- [4] GABITOV I., TURITSYN S.K. Averaged pulse dynamics in a cascaded transmission system with passive dispersion compensation // Opt. Lett.– 1996.–V. 21.–P.327-329.
- [5] MEDVEDEV S.B., TURITSYN S.K. Hamiltonian averaging and integrability in nonlinear systems with periodically varying dispersion // JETP Lett.–1999.–V.69.– P. 499-506.
- [6] TURITSYN S.K., TURITSYNA E.G., MEDVEDEV S.B., FEDORUK M.P. Averaged model and integrable limits in nonlinear double-periodic Hamiltonian systems // Phys. Rev. E.–2000.–V. 61.– P.3127-3132.
- [7] Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи // Lightwave Russian Edition.–2005.– №4.–С.21-30.
- [8] Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. Second edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

Штырина Ольга Владимировна

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛИТОННЫХ
ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 08.2006 г.
Формат бумаги $60 \times 84 \frac{1}{16}$
Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в ЗАО РИЦ «Прайс-курьер»,
630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврен-
тьева, 6. тел. 330-72-02.