

Исследование волоконно-оптических линий связи с оптической регенерацией сигналов

О.В.Штырина, С.К.Турицын, М.П.Федорук

Выполнено математическое моделирование многоканальных волоконно-оптических линий связи со встроенными в них оптическими 2R-регенераторами, сконструированными на основе насыщающегося поглотителя. Представлены результаты оптимизации конкретных конфигураций симметричных линий, и показано, что дальность передачи в системах с периодической оптической регенерацией сигналов значительно превышает дальность передачи в аналогичных системах без оптических регенераторов.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, дисперсионное управление, насыщающийся поглотитель, оптическая регенерация, количество ошибочных битов.

1. Введение

Современные масштабы развития волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) поразительны. Мировое производство волоконных световодов на рубеже XX и XXI вв. достигло 60 млн. км в год, т. е. каждую минуту в системах связи прокладывалось более 100 км световодов [1]. Все материки связаны между собой подводными волоконно-оптическими кабелями связи, общая длина которых достаточна, чтобы обмотать земной шар шесть раз. Разработка широкополосных оптических усилителей привела к созданию в конце 90-х гг. XX в. экспериментальных ВОЛС со спектральным уплотнением 100 и более каналов, что позволило достичь суммарной скорости передачи информации более 1 Тбит/с.

В настоящее время обсуждаются два пути дальнейшего резкого увеличения информационной емкости волоконно-оптических систем связи: расширение спектральной области и увеличение общего числа частотных каналов, а также увеличение скорости передачи информации индивидуального канала.

К числу наиболее перспективных способов увеличения пропускной способности одного частотного канала до скоростей передачи 40 Гбит/с и более относятся методы дисперсионного управления (dispersion management) и оптической регенерации сигналов.

В системах с дисперсионным управлением используются периодически чередующиеся световоды с противоположной по знаку хроматической дисперсией, что позволяет контролировать дисперсионное уширение импульса, повысить коэффициент отношения мощностей сигнала и шума и уменьшить влияние нелинейных эффектов на деградацию оптических импульсов (см., напр., [2]).

О.В.Штырина, М.П.Федорук. Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 6; e-mail: mife@ict.nsc.ru, shtyrinaov@ngs.ru
С.К.Турицын. Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1; e-mail: turits.s.k@aston.ac.uk

Поступила в редакцию 15 сентября 2004 г.

Различают несколько типов оптической регенерации сигналов [3], при которых имеют место:

- восстановление амплитуды сигнала (1R-регенерация);
- восстановление амплитуды и формы сигнала (2R-регенерация);
- восстановление амплитуды, формы и временного положения сигнала (3R-регенерация).

В работе выполнено математическое моделирование дисперсионно управляемых многоканальных ВОЛС со встроенными оптическими 2R-регенераторами и скоростью передачи 40 Гбит/с в одном частотном канале. В качестве основного элемента таких устройств регенерации применяется насыщающийся поглотитель [4–7].

2. Принципиальная схема и математическая модель оптического регенератора

Принцип работы насыщающегося поглотителя SA заключается в поглощении мощности входящего в него оптического сигнала, если она окажется ниже некоторой пороговой мощности насыщения P_{sat} . При мощностях, больших P_{sat} , коэффициент пропускания насыщающегося поглотителя быстро возрастает и асимптотически приближается к единице. В таких условиях маломощное излучение усиленного спонтанного шума и фоновое дисперсионное излучение подавляются. Использование насыщающегося поглотителя в сочетании с узкополосным оптическим фильтром F и сильно нелинейным волоконным световодом HNF позволяет подавить шумы в единичных битах. Усиление нелинейности в данном световоде фактически достигается за счет уменьшения эффективной площади моды.

Конкретная конфигурация оптического регенератора OR была выбрана после предварительного моделирования нескольких потенциально возможных схем. В настоящей работе рассмотрен оптический регенератор, элементы которого расположены, как показано на рис. 1.

Входной сигнал, запускаемый в оптический регенератор, сначала усиливается волоконно-оптическим эрбиевым усилителем EDFA_{OR}. Затем импульс насыщается в



Рис.1. Схема оптического регенератора.

поглотителе SA. Функция потерь $\alpha(t)$ в насыщающемся поглотителе, зависящая от времени и мощности входного сигнала, описывается уравнением:

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = -\frac{\alpha(t) - \alpha_0}{\tau} - \frac{\alpha(t)P(z^*, t)}{\tau P_{sat}}, \quad (1)$$

где $P(z^*, t) = |A(z^*, t)|^2$ – распределение мощности сигнала; α_0 – постоянные потери; $z^* \equiv \text{const}$ – фиксированное расстояние; τ – характерное время отклика насыщающегося поглотителя. В типичных расчетах $\alpha_0 = 0.53$, $P_{sat} = 7$ дБм, $\tau = 5$ пс.

Заметим, что вместо дифференциального уравнения (1) можно использовать интегральное уравнение, соответствующее обобщенной модели потерь в насыщающемся поглотителе:

$$\alpha(t) = \alpha_0 \exp \left[- \int_0^t \frac{ds}{\tau} \left(1 + \frac{P(z^*, s)}{P_{sat}} \right) \right] \times \left\{ 1 + \int_0^1 \frac{d\xi}{\tau} \exp \left[\int_0^\xi \frac{dx}{\tau} \left(1 + \frac{P(z^*, x)}{P_{sat}} \right) \right] \right\}. \quad (2)$$

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

$$P_{out}(z^*, t) = [1 - \alpha(t, P_{in}(z^*, t))] P_{in}(z^*, t) = T(t) P_{in}(z^*, t). \quad (3)$$

Здесь $P_{in}(z^*, t)$, $P_{out}(z^*, t)$ – мощности сигнала на входе и выходе из насыщающегося поглотителя соответственно.

Затем сигнал распространяется по сильно нелинейному световоду HNF с аномальной дисперсией групповых скоростей. Уменьшение эффективной площади взаимодействия в HNF приводит к усилению нелинейных эффектов: в частности фазовая самомодуляция в среде с аномальной дисперсией приводит к формированию солитоноподобного импульса. Это обеспечивает эффективную обратную связь при воздействии на сигнал оптическим фильтром F, который обеспечивает потери тем большие, чем выше энергия входного импульса. В результате происходит самоподстройка и саморегуляция энергии сигнала. Ширина полосы пропускания оптического фильтра F, который имеет гауссову форму, составляет 100–120 ГГц. Характерная длина HNF равна 3–6 км. На выходе из оптического регенератора OR средняя мощность сигнала восстанавливается до своего первоначального значения с помощью линейного устройства, называемого аттенуатором (Att).

3. Образование автосолитонных режимов

Сначала были изучены автосолитонные режимы распространения одиночных оптических импульсов. Задача построения автосолитонных режимов заключалась в нахождении устойчивых решений, которые определялись

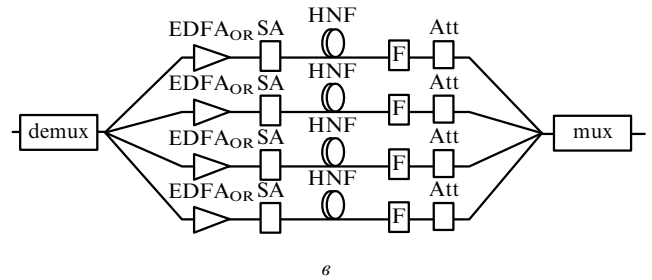
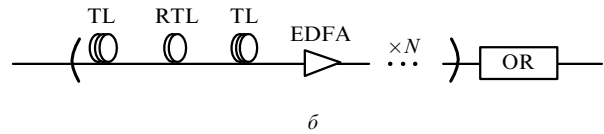
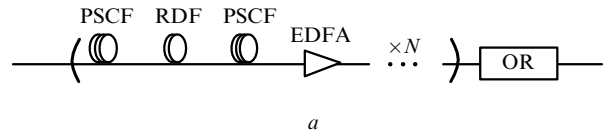


Рис.2. Схемы периодических секций различных линий передачи (а,б) и оптического регенератора в случае системы с четырьмя индивидуальными передающими каналами (в); mux – мультиплексор, demux – демультиплексор.

фиксированными точками в пространстве «энергия – ширина импульса – параметр фазовой модуляции (чирп)». Параметр фазовой модуляции (чирп) импульса задается выражением $C = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$, где φ – фаза импульса. Поскольку существование таких режимов определялось параметрами системы, они были названы автосолитонами.

Принципиальные схемы волоконно-оптических линий передачи показаны на рис.2. Периодическая секция таких линий состоит из двух одинаковых отрезков передающего (трансмиссионного) волокна (PSCF – на рис.2,а и TL – на рис.2,б) с положительной дисперсией и находящегося между ними отрезка дисперсионно-компенсирующего волокна (RDF и RTL соответственно) с отрицательной дисперсией. Длина периодической секции каждой из линий составляла 60 км, а расстояние между оптическими регенераторами было 300 км. Типы волоконных световодов и их параметры, используемые в расчетах, приведены в табл.1. Здесь PSCF – волокно с сердцевинной из стекла повышенной чистоты, RDF – волокно с обратной (отрицательной) дисперсией, TL – волокно Teralight и RTL – волокно Reverse Teralight.

Распространение оптических импульсов вдоль линии передачи описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера [8]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + i\gamma A - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \sigma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right] = 0. \quad (4)$$

Здесь z – расстояние вдоль линии; t – время; $|A|^2$ – мощность; β_2 – параметр дисперсии групповой скорости; β_3 – дисперсионный член третьего порядка; γ – коэффициент затухания; σ – коэффициент керровской нелинейности; T_R – время рамановского отклика. Величины β_2 , β_3 , γ и σ представлены функциями от z , что позволяет учесть изменения этих параметров при переходе от одного типа световода к другому. Коэффициент нелиней-

Табл.1. Типы волоконных световодов и их параметры.

Параметры	Тип световода				
	PSCF	RDF	TL	RTL	HNF
Затухание на длине волны 1550 нм (дБ/км)	0.18	0.3	0.21	0.28	0.5
Эффективная площадь моды (мкм ²)	110	20	60	28	6.5
Дисперсия (пс·нм ⁻¹ ·км ⁻¹)	20	-42	8	-16	2
Дисперсионный наклон (пс·нм ⁻² ·км ⁻¹)	0.06	-0.13	0.08	-0.16	0.03
Нелинейный показатель преломления (м ² /Вт)	2.7×10^{-20}	2.7×10^{-20}	2.7×10^{-20}	2.7×10^{-20}	2.7×10^{-20}

ности $\sigma = 2\pi n_2 / (\lambda_0 A_{\text{eff}})$, где n_2 – нелинейный показатель преломления; λ_0 – несущая длина волны; $\omega_0 / 2\pi = \nu_0 = c / \lambda_0$ – частота несущего сигнала; c – скорость света; A_{eff} – эффективная площадь собственной моды световода.

Для численного решения уравнения (4) использовался метод расщепления по физическим процессам. Запишем это уравнение в операторной форме:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\tilde{D} + \tilde{N})A, \quad (5)$$

где

$$\tilde{D} = -\gamma - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \quad (6)$$

– оператор линейной части, учитывающий дисперсионные эффекты и затухание,

$$\tilde{N} = i\sigma \left[|A|^2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial t} (|A|^2 A) - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right] \quad (7)$$

– нелинейный оператор.

Решение НУШ формально можно записать в виде

$$A(z+h, t) = \exp \left[\int_z^{z+h/2} \tilde{N}(s) ds \right] \exp [h\tilde{D}] \times \exp \left[\int_{z+h/2}^{z+h} \tilde{N}(s) ds \right] A(z, t). \quad (8)$$

Оператор $\exp [h\tilde{D}]$ вычисляется в фурье-пространстве:

$$\exp [h\tilde{D}] B(z, t) = \left\{ F^{-1} \exp [h\tilde{D}(i\omega)] F \right\} B(z, t), \quad (9)$$

где F – оператор фурье-преобразования. Можно показать, что схема имеет второй порядок точности по шагу h [8].

Рассмотрим процесс формирования автосолиitonного решения из начального гауссова импульса с пиковой мощностью $P_0 = 3$ мВт и длительностью на полувысоте $T_{0.5} = 6$ пс. Изменяя коэффициент усиления эрбиевого усилителя EDFA_{OR} в оптическом регенераторе и коэффициент ослабления аттенюатора, можно получить режимы устойчивого распространения несущего сигнала (рис.3, 4). Любой входной импульс (в пределах некоторой области значений параметров) эволюционирует в устойчивое асимптотическое решение (оптический автосолитон). На рис.3 показан фазовый портрет сигнала в плоскости $C, T_{0.5}$, где C – параметр фазовой модуляции, $T_{0.5}$ – ширина сигнала. Распределение мощности импульса на выходе из оптических регенераторов, т. е. на расстояниях, кратных 300 км, представлено на рис.4.

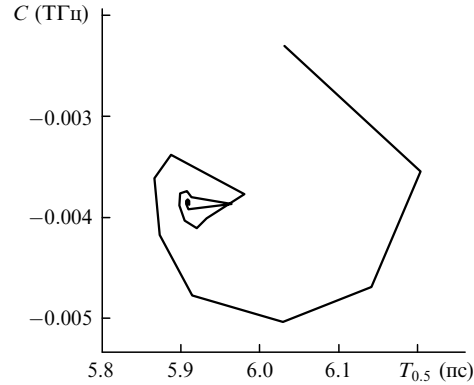


Рис.3. Фазовый портрет параметров импульса в плоскости параметра фазовой модуляции и ширины импульса.

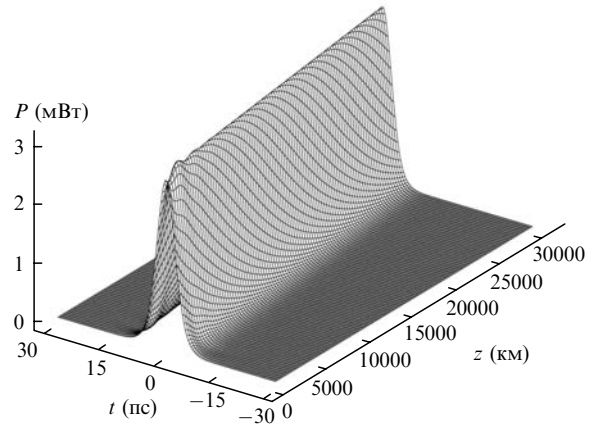


Рис.4. Динамика гауссова импульса с начальной шириной на полувысоте $T_{0.5} = 6$ пс и начальной пиковой мощностью $P_0 = 3$ мВт на выходе из оптического регенератора.

Для демонстрации эффективности действия насыщающегося поглотителя SA при подавлении шума сравним распределение мощности сигналов после распространения на большие расстояния в системе со встроенным оптическим регенератором и в аналогичной системе без него. На рис.5 представлены распределения мощности гауссова импульса с $T_{0.5} = 6$ пс и $P_0 = 3$ мВт после распространения на расстояние 30000 км для систем с SA и без него. Легко видеть, что применение насыщающихся поглотителей обеспечивает существенное подавление шумового излучения.

4. Примеры оптимизации конфигураций волоконно-оптических линий передачи со спектральным уплотнением каналов

Ниже представлены основные результаты расчетов по оптимизации волоконно-оптических линий связи с суммарной скоростью передачи $K \times 40$ Гбит/с, где K – число частотных каналов. Расстояние между соседними

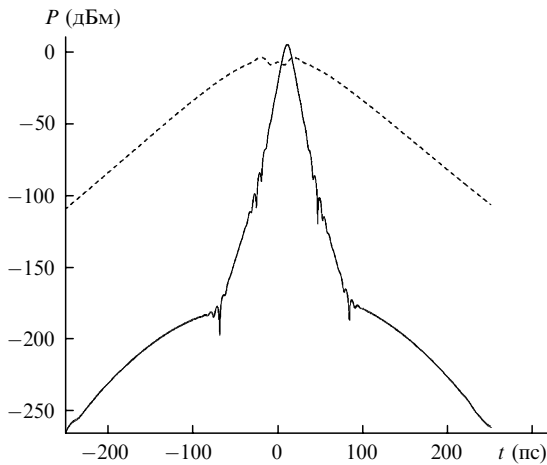


Рис.5. Распределения мощности гауссова импульса P с $T_{0,5} = 6$ пс и $P_0 = 3$ мВт после распространения на расстояние $z = 30000$ км для систем с насыщающимся поглотителем (сплошная кривая) и без него (штриховая кривая).

частотными каналами при несущей длине волны $\lambda_0 = 1550$ нм составляло 1.6 нм (200 ГГц), и в типичных расчетах рассматривалось от 4 до 8 каналов.

Для оценки «качества» коммуникационной системы используется коэффициент ошибки BER, который определяет количество ошибочных битов к общему числу переданных битов [9]. Считается, что приемлемому качеству системы передачи информации отвечает $BER \leq 10^{-9}$ (это соответствует одному ошибочно зарегистрированному биту на 10^9 переданных битов). Величины P_1 и P_0 зададим как вероятности ошибки в регистрации информационных сигналов «1» и «0» соответственно [9]:

$$P_1 = \int_{-\infty}^{I_d} p_1(x) dx, \quad P_0 = \int_{I_d}^{\infty} p_0(x) dx,$$

где I_d – уровень разрешимости, который определяется из условия минимальности коэффициента ошибки $BER = (P_1 + P_0)/2$. Предположим также, что плотности вероятностей появления «0» и «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 μ_i – средние значения; σ_i – дисперсии, $i = 0, 1$. Далее введем Q -фактор, который связан с BER следующим образом:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/4)}{\sqrt{2\pi}Q}, \quad (10)$$

где $Q = (\mu_1 - \mu_0)/(\sigma_1 + \sigma_0)$. Отметим, что коэффициенту ошибки $BER \leq 10^{-9}$ соответствует значение $Q \geq 6$.

Оптический усилитель не только усиливает входной оптический сигнал, но и добавляет к нему шумовую мощность усиленной спонтанной эмиссии. Наличие последней уменьшает отношение сигнал/шум системы, увеличивает коэффициент ошибки и приводит к ухудшению передаточных характеристик ВОЛС.

Мощность оптического сигнала имеет некое оптимальное значение, поскольку при малой мощности шумов усиленной спонтанной эмиссии эрбиевых усилителей уве-

личивают коэффициент ошибки в передаче данных. Использование более мощных импульсов увеличивает отношение сигнал/шум, однако при этом возрастает 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 шумовыми и нелинейными эффектами с точки зрения величины Q -фактора.

Исходной математической моделью, служащей для описания шумов спонтанной эмиссии, является модель «белого» шума. В случае эрбиевого волоконного усилителя спектральная плотность «белого» шума вычисляется по формуле

$$S_{sp} = (G - 1)n_{sp}h\nu_0, \quad (11)$$

где h – постоянная Планка; G – коэффициент усиления сигнала; n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии, который связан с коэффициентом шума усилителя NF (amplifier noise figure) следующим соотношением [9]:

$$NF = \frac{2n_{sp}(G - 1)}{G}. \quad (12)$$

Для систем со спектральным уплотнением после демультимплексирования в каждом частотном канале использовался индивидуальный оптический регенератор, как это показано на рис.2. Оптимизация была выполнена для двух конфигураций симметричных ВОЛС (см. рис.2), состоящих из периодических секций PSCF + RDF + PSCF + EDFA и TL + RTL + TL + EDFA длиной 60 км и с расстоянием между оптическими регенераторами 300 км.

Зададим дистанцию передачи данных как расстояние, для которого выполняется $Q \geq 6$. Для вычисления дистанции передачи в расчетах использовалось от 5 до 11 псевдослучайных последовательностей по 128 битов в каждой, и дальность передачи в каждом из каналов определялась медианным средним по дистанциям, вычисленным в каждой последовательности [10]. Далее дистанция передачи выбиралась как наименьшее расстояние по всем возможным каналам.

Типичное поведение Q -фактора волоконной линии в зависимости от расстояния показано на рис.6. Видно, что наличие в системе оптических регенераторов позволяет значительно увеличить расстояние, для которого выполняется $Q \geq 6$.

Результаты массивных численных расчетов представлены на рис.7,8. На рис.7 показаны результаты оптимизации линии PSCF + RDF + PSCF + EDFA. Видно, что при оптимальном выборе параметров оптического регенератора, входной пиковой мощности импульсов и средней дисперсии линии можно достичь длины дистанции передачи данных свыше 10000 км. Соответствующая система без оптических регенераторов имеет дистанцию распространения около 2000 км.

На рис.8 представлены результаты оптимизации линии TL + RTL + TL + EDFA. Здесь при оптимальных параметрах системы удалось достичь длины дистанции распространения более 8000 км. Наконец, на рис.9 представлены зависимости длины дистанции передачи для линии PSCF + RDF + PSCF + EDFA от параметров насыщающегося поглотителя P_{sat} и α_0 .

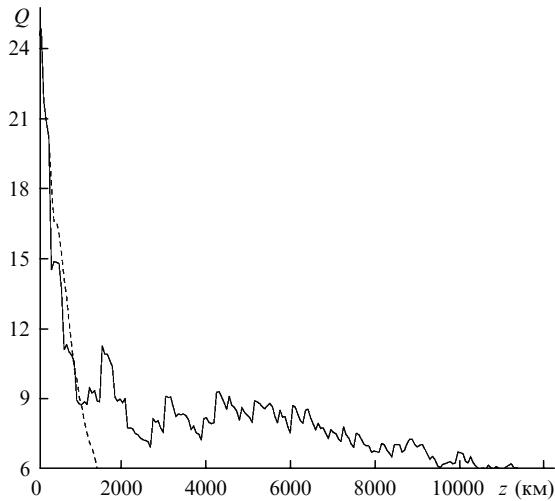


Рис.6. Характерный вид зависимости Q -фактора от дистанции передачи z в одном из частотных каналов в системе с оптическим регенератором (сплошная кривая) и без него (штриховая кривая) для оптической линии связи с дисперсионным управлением.

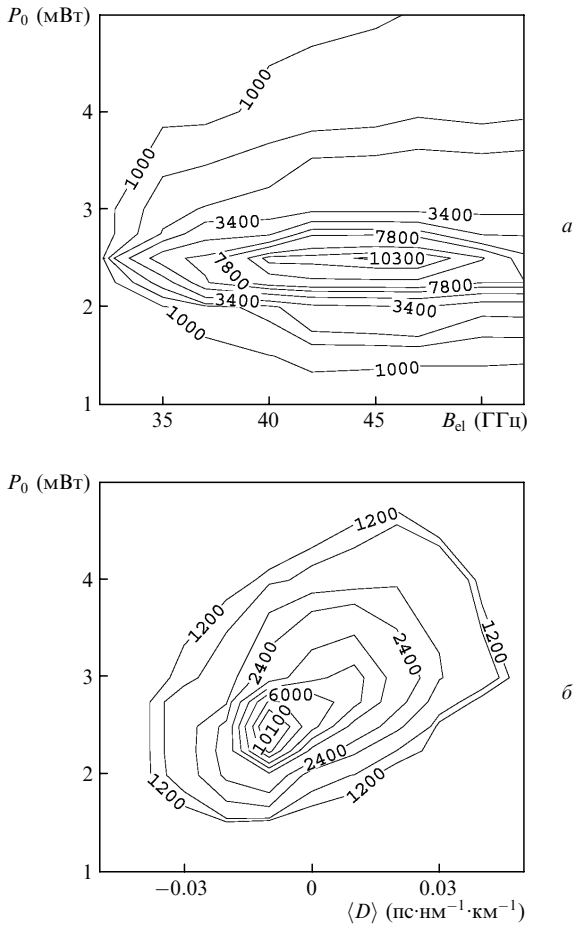


Рис.7. Линии уровня дистанции передачи (в км) в зависимости от входной пиковой мощности P_0 и ширины электрического фильтра B_{el} (а), а также от средней дисперсии $\langle D \rangle$ (б) для конфигурации PSCF + RDF + PSCF + EDFA.

5. Выводы

В работе представлены результаты численного моделирования волоконно-оптических линий связи со встроенными оптическими регенераторами на основе насыща-

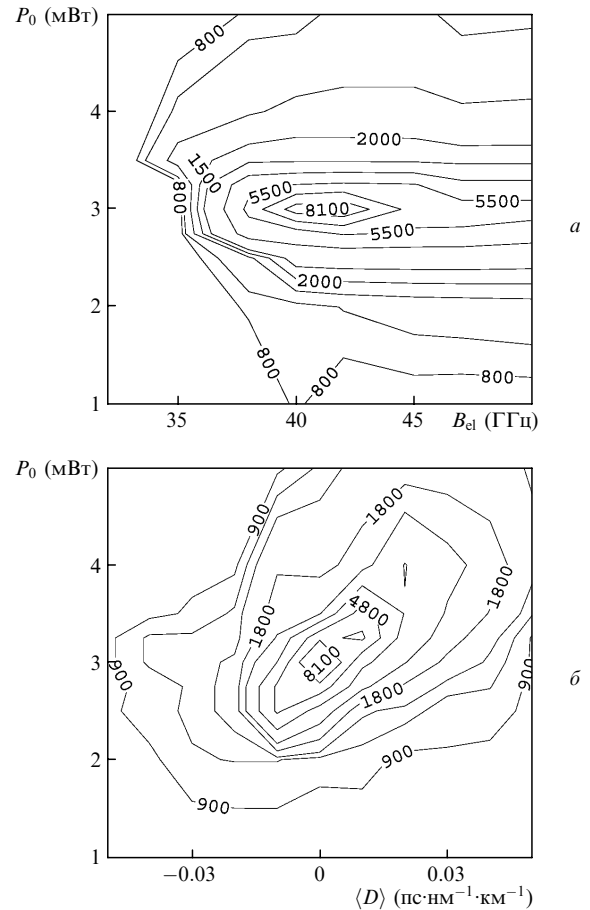


Рис.8. То же, что и на рис.7, для конфигурации TL + RTL + TL + EDFA.

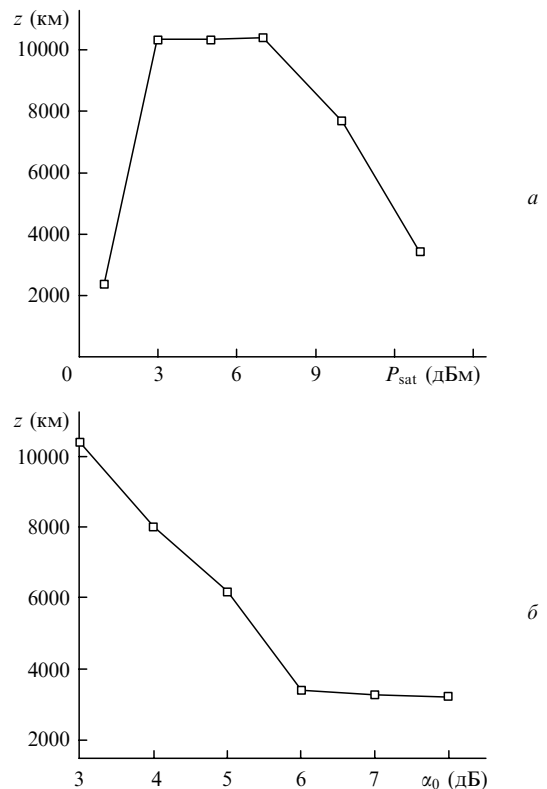


Рис.9. Зависимости длины дистанции передачи данных z от мощности насыщения P_{sat} (а) и от постоянных потерь α_0 (б) для конфигурации PSCF + RDF + PSCF + EDFA.

ющегося поглотителя при скорости передачи 40 Гбит/с в одном частотном канале. Найдены автосолиitonные режимы распространения одиночного оптического импульса. Выполнена оптимизация симметричных волоконно-оптических линий связи со спектральным уплотнением. Для линии PSCF + RDF + PSCF + EDFA достигнута длина дистанции передачи более 10000 км. Для линии TL + RTL + TL + EDFA длина дистанции распространения составила более 8000 км.

Данное исследование было поддержано Президентом Российской Федерации (грант № НШ-2314.2003.1), Российским министерством образования (грант № ЗН-080-01) и СО РАН (интеграционный грант № 2).

1. Дианов Е.М. *Вестник РАН*, **70**, 1010 (2000).
2. Hasegawa A. (Ed.) *Massive WDM and TDM soliton transmission*

systems. A ROSC Symposium (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2000).

3. Leclerc O., Lavigne B., Balmeffre E., et al. *C.R. Physique*, **4**, 163 (2003).
4. Audouin O., Pallise E., Desurvire E., Maunand E. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **10**, 828 (1998).
5. Rouvillain D., Brindel P., Segueineau F., et al. *Electron. Lett.*, **38**, 1113 (2002).
6. Govan D.S., Smith N.J., Knox W.M., Doran N.J. *J. Opt. Soc. Am. B.*, **14**, 2960 (1997).
7. Matsumoto M., Leclerc O. *Electron. Lett.*, **38**, 576 (2002).
8. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press, 2001).
9. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems* (New York: John Wiley&Sons Inc., 1997).
10. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *Electron. Lett.*, **37**, 1179 (2001).