

Использование оптических регенераторов для увеличения информационной емкости современных волоконно-оптических линий связи¹

Ю.И. Шокин, О.В. Штырина, С.К. Турицын, М.П. Федорук

Аннотация. Выполнено математическое моделирование многоканальных волоконно-оптических линий связи с периодической оптической 2R регенерацией информационных сигналов. Представлены результаты оптимизации конкретных конфигураций симметричных волоконных линий связи и показано, что дальность передачи в системах с периодической оптической регенерацией сигналов значительно превышает дальность передачи в аналогичных системах без оптических регенераторов.

Введение

В настоящее время обсуждаются два пути дальнейшего резкого увеличения информационной емкости волоконно-оптических систем связи [1]:

- а) расширение спектральной области и увеличение общего числа частотных каналов;
- б) 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 технологии дисперсионного управления (dispersion management) и оптической регенерации сигналов.

В системах с дисперсионным управлением используются периодически чередующиеся оптические волокна с противоположной по знаку хроматической дисперсией, что позволяет контролировать дисперсионное уширение импульса,

повысить коэффициент отношения мощности сигнала к шуму и уменьшить влияние нелинейных эффектов на деградацию оптических импульсов (например, [2]).

Существуют различные типы оптической регенерации сигналов [3]:

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

В работе выполнено математическое моделирование дисперсионно-управляемых многоканальных волоконно-оптических линий связи со встроенными 2R оптическими регенераторами и скоростью передачи 40 Гбит/с в одном частотном канале. В качестве основного элемента таких устройств регенерации применяется так называемый насыщающийся поглотитель (saturable absorber) [4-7].

¹ Данное исследование было поддержано грантом Президента Российской Федерации (№. НШ 9886.2006.9) и Интеграционным проектом СО РАН (№. 31).

1. 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 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 (F) и сильно нелинейным волоконным световодом (HNF) позволяет подавить шумы в единичных битах.

Конкретная конфигурация оптического регенератора (OR) была выбрана после предварительного моделирования нескольких потенциально возможных схем. В настоящей работе рассмотрен оптический регенератор, элементы которого расположены по схеме на Рис.1.

Входной сигнал, запускаемый в оптический регенератор, сначала усиливается волоконным эрбиевым усилителем $EDFA_{OR}$. Затем импульс насыщается в SA. Функция потерь $\alpha(t)$ в насыщающемся поглотителе (SA), 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, $\alpha_0 = -3$ дБ - постоянные потери, $z^* \equiv const$ - фиксированное расстояние, P_{sat} является пороговой мощностью насыщения, τ соответствует времени спада импульса.

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

$$P_{out}(z^*, t) = [1 - \alpha(t, P_{in}(z^*, t))] \cdot P_{in}(z^*, t) = T(t) \cdot P_{in}(z^*, t). \quad (2)$$

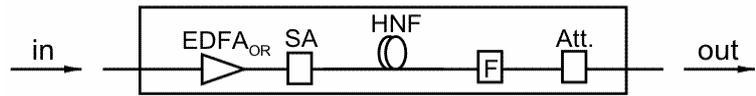


Рис. 1. Схема оптического регенератора

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

Затем сигнал распространяется по сильно нелинейному световоду (HNF) с аномальной дисперсией. Поскольку импульс обладает значительной энергией, он сужается при прохождении по HNF за счет фазовой самомодуляции и его спектр, соответственно, уширяется. Далее устанавливается оптический фильтр (F), который обеспечивает потери тем больше, чем выше энергия входного импульса. В результате происходит саморегуляция энергии сигнала.

Ширина оптического фильтра F, который имеет гауссову форму в расчетах, составляла 100-120 ГГц. Характерная длина HNF составляла 3-6 км. На выходе из OR средняя мощность сигнала восстанавливалась до своего первоначального значения с помощью устройства, называемого аттенюатором.

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

Принципиальная схема волоконно-оптической линии связи показана на Рис.2а. Периодическая секция такой линии состоит из двух одинаковых кусков трансмиссионного волокна (TF) с положительной (аномальной) дисперсией и находящегося между ними куска дисперсионно-компенсирующего волокна (CF) с отрицательной (нормальной) дисперсией. Длина периодической ячейки линии составляла 60 км, расстояние между оптическими регенераторами было 300 км. Типы волоконных световодов и их параметры, используемые в расчетах, приведены в Табл. 1.

Табл. 1. Типы волоконных световодов и их параметры

PSCF	Потери на 1550 нм	0.18 дБ/км
	Эффективная площадь моды	110 $\mu\text{ м}^2$
	Дисперсия	20 пс/нм/км
	Дисперсионный наклон	0.06 пс/нм ² /км
	Нелинейный показатель преломления	2.7 10^{-20} м ² /Вт
RDF	Потери на 1550 нм	0.3 дБ/км
	Эффективная площадь моды	20 $\mu\text{ м}^2$
	Дисперсия	-42 пс/нм/км
	Дисперсионный наклон	-0.13 пс/нм ² /км
	Нелинейный показатель преломления	2.7 10^{-20} м ² /Вт
TL	Потери на 1550 нм	0.21 дБ/км
	Эффективная площадь моды	60 $\mu\text{ м}^2$
	Дисперсия	8 пс/нм/км
	Дисперсионный наклон	0.08 пс/нм ² /км
	Нелинейный показатель преломления	2.7 10^{-20} м ² /Вт
RTL	Потери на 1550 нм	0.28 дБ/км
	Эффективная площадь моды	28 $\mu\text{ м}^2$
	Дисперсия	-16 пс/нм/км
	Дисперсионный наклон	-0.16 пс/нм ² /км
	Нелинейный показатель преломления	2.7 10^{-20} м ² /Вт
HNF	Потери на 1550 нм	0.5 дБ/км
	Эффективная площадь моды	6.5 $\mu\text{ м}^2$
	Дисперсия	2 пс/нм/км
	Дисперсионный наклон	0.03 пс/нм ² /км
	Нелинейный показатель преломления	2.7 10^{-20} м ² /Вт

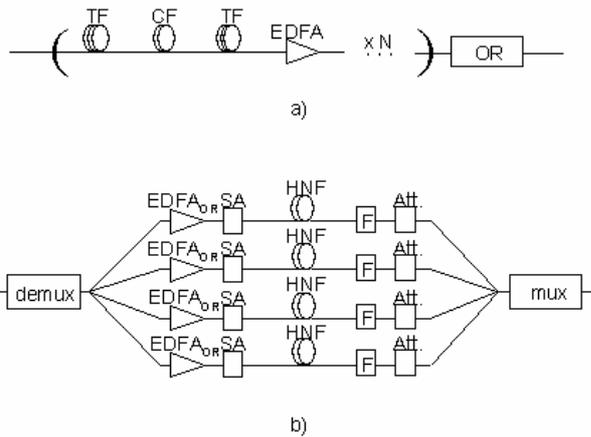


Рис. 2 Схема периодической ячейки линии передачи (а) и оптического регенератора в случае системы с четырьмя частотными каналами (б)

Распространение оптических импульсов вдоль волоконно-оптической линии связи описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера (НУШ):

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

Здесь z — расстояние вдоль линии, t — время, $|A|^2$ — мощность сигнала, β_2 — параметр дисперсии групповой скорости, β_3 — дисперсия 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 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, $\omega_0 = \frac{c_1}{\lambda_0}$ — круговая частота несущего сигнала, c_1 — скорость света, A_{eff} — эффективная площадь собственной моды световода.

Для численного решения уравнения (3) использовался метод расщепления по физическим процессам. Запишем это уравнение в операторной форме:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\tilde{D} + \tilde{N})A, \quad (4)$$

где \tilde{D} обозначает оператор линейной части, учитывающий дисперсионные эффекты и затухание, а \tilde{N} — нелинейный оператор:

$$\tilde{D} = -\gamma - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3}, \quad (5)$$

$$\tilde{N} = i\sigma \left[|A|^2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial t} (|A|^2 A) - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \right]. \quad (6)$$

Решение НУШ формально можно записать в виде:

$$A(z+h, t) = \exp \left[\int_z^{z+\frac{h}{2}} \tilde{N}(s) ds \right] \exp[h\tilde{D}] \exp \left[\int_{z+\frac{h}{2}}^{z+h} \tilde{N}(s) ds \right] A(z, t). \quad (7)$$

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

$$\exp[h\tilde{D}]B(z, t) = \{F^{-1} \exp[h\tilde{D}(i\omega)]F\}B(z, t), \quad (8)$$

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

Ниже представлены только основные результаты расчетов по оптимизации волоконно-оптических линий связи с пропускной способностью $K \times 40$ Гбит/с, где K — число частотных каналов. Расстояние между соседними частотными каналами составляло 1.6 нм (200 ГГц) и в типичных расчетах рассматривалось от 4 до 8 каналов.

Основной характеристикой любой коммуникационной системы является величина коэффициента ошибки (Bit-Error Rate), которая определяет количество ошибочных битов к общему числу переданных битов [9]. Стандартным значением коэффициента ошибки является величина $BER \leq 10^{-9}$, что соответствует одному ошибочно зарегистрированному биту на 10^9 переданных битов. Величины P_1 и P_0 определим как вероятности ошибки в регистрации "1" и "0" [9], соответственно:

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

где I_d — уровень разрешимости, который определяется из условия минимальности коэффициента ошибки $BER = \frac{P_1 + P_0}{2}$.

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 μ_i — средние значения, σ_i — дисперсии.

Далее введем величину Q -фактора, которая связана с BER следующим образом:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(-\frac{Q^2}{4} \right)}{\sqrt{2\pi}Q}, \quad (9)$$

где $Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$. Отметим, что коэффициенту

ошибки $BER \leq 10^{-9}$ соответствует значение $Q \geq 6$.

Оптический усилитель, помимо усиления входного оптического сигнала, добавляет к сигналу шумы усиленной спонтанной эмиссии (Amplified Spontaneous Emission). Наличие ASE вызывает уменьшение отношения сигнал/шум системы, увеличивает коэффициент ошибки и приводит к ухудшению передаточных характеристик волоконной линии связи.

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, однако усиливается роль нелинейных эффектов, которые тоже ведут к деградации информационного сигнала. Поэтому имеется оптимальное значение пиковой мощности входных импульсов с фиксированной шириной, которое обеспечивает наилучший баланс между эффектами шума и нелинейности с точки зрения величины Q -фактора.

Исходной математической моделью, служащей для описания шумов усиленной спонтанной эмиссии, служит модель «белого шума». В случае эрбиевых волоконных усилителей спектральная плотность «белого шума» вычисляется по формуле:

$$S_{sp} = (G-1)n_{sp}h\nu, \quad (10)$$

где h — постоянная Планка, ν — несущая частота сигнала, G — коэффициент усиления сигнала в усилителе, n_{sp} — коэффициент спонтанной эмиссии, который связан с коэффициентом

шума усилителя NF (amplifier noise figure) следующим соотношением:

$$NF = 2n_{sp}(G-1)/G. \quad (11)$$

Для систем со спектральным уплотнением после демультиплексирования в каждом частотном канале использовался индивидуальный оптический регенератор, как это показано на Рис.2. Оптимизация была выполнена для двух конфигураций симметричных волоконно-оптических линий связи:

- а) $PSCF + RDF + PSCF + EDFA$,
- б) $TL + RTL + TL + EDFA$

с длиной периодической ячейки 60 км и расстоянием между оптическими регенераторами 300 км.

Определим дистанцию передачи данных как расстояние, для которого величина Q -фактора $Q \geq 6$. Для вычисления дистанции передачи данных в расчетах использовались от 5 до 11 псевдослучайных последовательностей по (2^7-1) битов в каждой, и дальность передачи в каждом из каналов определялась как медианное среднее по дистанциям, вычисленным в каждой последовательности [10]. Далее дистанция передачи выбиралась как наименьшее расстояние по всем возможным каналам.

Результаты массивных численных расчетов показаны на Рис.3-Рис.6. В представленных ниже расчетах рассматривались 4 частотных канала.

На Рис.3 показаны результаты оптимизации линии $PSCF + RDF + PSCF + EDFA$ в плоскости параметров «средняя дисперсия линии - входная пиковая мощность». Видно, что соответствующим выбором параметров оптического регенератора, входной пиковой мощности импульсов и средней дисперсии линии можно достичь дистанции передачи данных свыше 10000 км. Соответствующая система без оптических регенераторов демонстрирует дистанцию распространения около 2000 км.

Аналогичные результаты оптимизации линии $TL + RTL + TL + EDFA$ представлены на Рис.4. Здесь при оптимальных параметрах системы удалось достичь дистанции распространения более 8000 км.

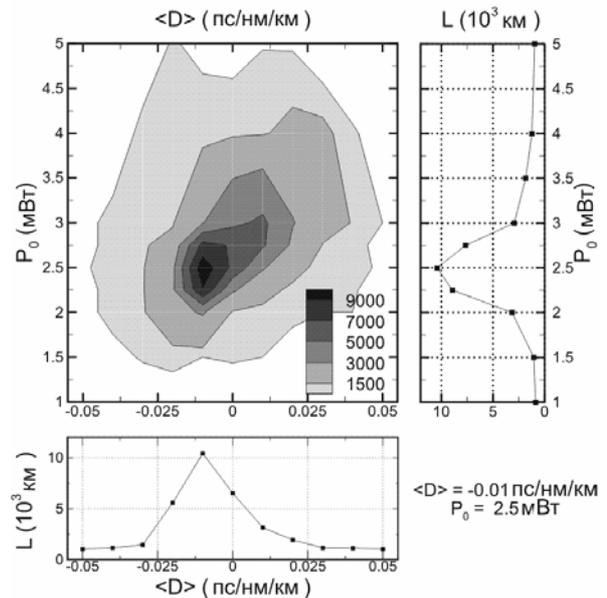


Рис. 3 Линии уровня дистанции передачи в зависимости от средней дисперсии $\langle D \rangle$ и входной пиковой мощности P_0 для симметричной дисперсионной конфигурации $PSCF+RDF+PSCF+EDFA$

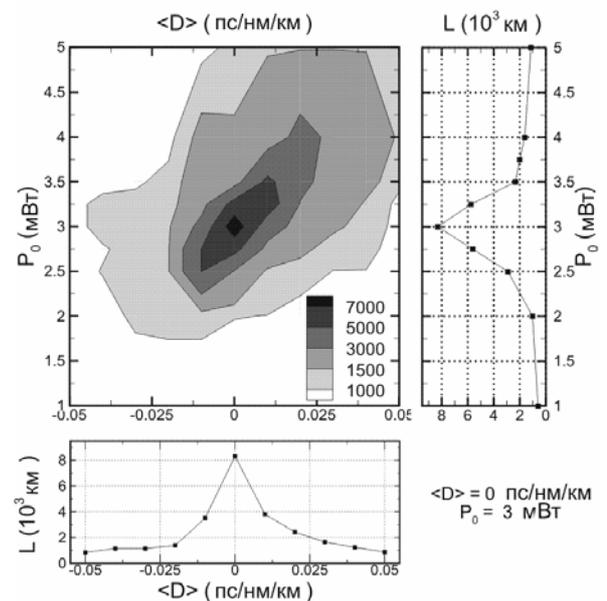


Рис. 4 Линии уровня дистанции передачи в зависимости от средней дисперсии $\langle D \rangle$ и входной пиковой мощности P_0 для симметричной дисперсионной конфигурации $TL+RTL+TL+EDFA$

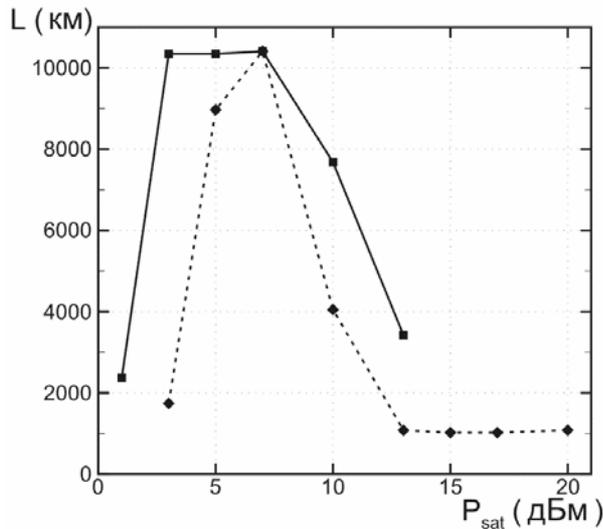


Рис. 5 Зависимость дистанции передачи данных L от мощности насыщения P_{sat}

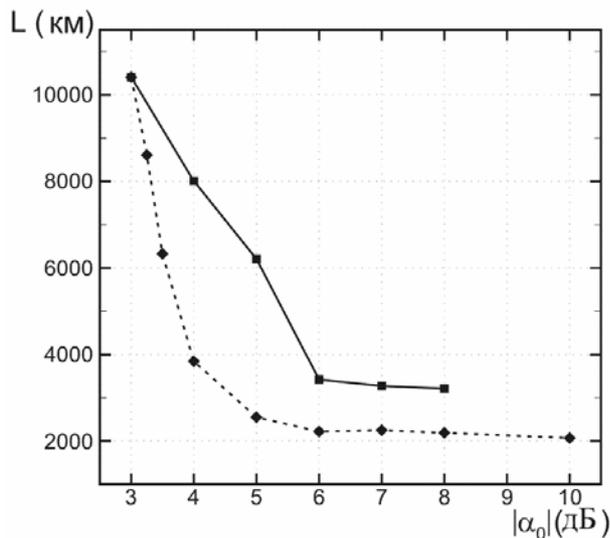


Рис. 6 Зависимость дистанции передачи данных L от параметра α_0

На Рис.5 и Рис.6 представлены зависимости дистанции передачи для линии $PSCF + RDF + PSCF + EDFA$ от параметров насыщающегося поглотителя P_{sat} и α_0 .

Сначала рассмотрим, как на характеристики системы влияет изменение мощности насыщения P_{sat} . На Рис.5 показана дистанция распространения ($Q > 6$) в зависимости от мощности

насыщения. Штриховой линией показаны результаты, в которых все оптимальные параметры взяты для мощности насыщения $P_{sat} = 7$ дБм, а сплошной линией приведены результаты полной оптимизации при заданной фиксированной мощности насыщения. Видно, что в пределах достаточно широкого изменения мощности насыщения 3–7 дБм дистанция распространения равна 10000 км.

Наконец рассмотрим, как изменение величины α_0 повлияет на характеристики системы. На Рис.6 показано изменение дистанции распространения с увеличением потерь в насыщающемся поглотителе (с увеличением модуля α_0). Штриховой линией показаны результаты, в которых все оптимальные параметры взяты для $\alpha_0 = -3$ дБ, а сплошной линией - результаты полной оптимизации при заданной фиксированной величине α_0 . Очевидно, что увеличение этих потерь приводит к увеличению коэффициента усиления волоконного эрбиевого усилителя, расположенного в оптическом регенераторе, и, как следствие, к деградации оптического сигнала из-за нелинейных эффектов.

Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования волоконно-оптических линий связи со встроенными оптическими регенераторами на основе насыщающегося поглотителя в режиме передачи данных 40 Гбит/сек в одном частотном канале. Выполнена оптимизация симметричных волоконно-оптических линий связи со спектральным уплотнением. Для линии $PSCF + RDF + PSCF + EDFA$ достигнуты дистанции передачи более 10000 км. Для линии $TL + RTL + TL + EDFA$ достигнуты дистанции распространения более 8000 км. Соответствующие системы без оптических регенераторов демонстрируют дистанцию распространения около 2000 км.

Литература

1. Дианов Е.М. От тера-эры к пета-эре // Вестник РАН – 2000 – Т.70 - №11.- С.1010-1015.
2. Massive WDM and TDM soliton transmission systems. A ROSC Symposium (Akira Hasegawa (Ed.)), Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.

3. Leclerc O., Lavigne B., Balmeffre E. et al. All-optical signal regeneration : from first principles to a 40 Gbit/s system demonstration // C.R. Physique. – V.4. – 2003. – P.163-173.
4. Audouin O., Pallise E., Desurvire E., Maunand E. Use of fast in-line saturable absorbers in wavelength-division-multiplexed soliton systems // IEEE Photon. Techn. Lett.– 1998.– V.10.– P.828-829.
5. Rouvillain D., Brindel P., Segueineau F. et al. Optical 2R regenerator based on passive saturable absorber for 40 Gbit/s WDM long-haul transmission // Electron. Lett.– 2002.– V.38.– P.1113-1114.
6. Govan D.S., Smith N.J., Knox W.M., Doran N.J. Stable propagation of solitons with increased energy through the combined action of dispersion management and periodic saturable absorption // JOSA B.– 1997.– V.14.– P.2960-2966.
7. Matsumoto M., Leclerc O. Analysis of 2R optical regenerator utilising self-phase modulation in highly nonlinear fibre // Electron. Lett.– 2002.– V.38.– P.576-577.
8. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2001.
9. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. Second edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
10. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. Numerical estimate of BER in optical systems with strong patterning effects // Electron. Lett. – 2001. V.37.– №.19.

Шокин Юрий Иванович. Родился в 1943 году. Окончил Новосибирский государственный университет в 1966 году. Доктор физико-математических наук (1980), академик РАН (1994). Автор 280 научных работ, в том числе 18 монографий. Специалист в области прикладной математики и информатики, математического моделирования. Директор Института вычислительных технологий СО РАН (ИВТ СО РАН).

Штырина Ольга Владимировна. Родилась в 1980 году. Окончила Новосибирский государственный университет в 2003 году. Кандидат физико-математических наук (2006г.). Автор 11 научных работ. Специалист в области математического моделирования. Научный сотрудник ИВТ СО РАН.

Турицын Сергей Константинович. Родился в 1960 году. Окончил Новосибирский государственный университет в 1982 году. Кандидат физико-математических наук (1986г.). Автор 175 научных работ и 8 параграфов в книгах. Специалист в области теоретической физики. Профессор Астонского университета (г. Бирмингем), Великобритания.

Федорук Михаил Петрович. Родился в 1956 году. Окончил Новосибирский государственный университет в 1982 году. Доктор физико-математических наук (1999г.). Автор 115 научных работ, в том числе 3-х монографий. Специалист в области математического моделирования нелинейных процессов в физике. Заместитель директора по научной работе ИВТ СО РАН.