

Моделирование автосолитонных оптических импульсов при высокоскоростной передаче информации по волоконным световодам

А.И.Латкин

Исследовано распространение импульса в волоконно-оптической линии связи с периодически включенными регенераторами – нелинейными кольцевыми зеркалами. Установлено существование автосолитонного режима распространения оптического импульса. Показано, что включение в линию связи кольцевого зеркала приводит к существенному увеличению дальности распространения при небольшой отрицательной средней дисперсии в линии.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, автосолитон, нелинейное оптическое кольцевое зеркало, оптическая регенерация.

Передача дисперсионно управляемых импульсов является ключевой задачей при создании высокоскоростных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) [1]. Важную роль играет также оптическая регенерация сигнала. В этом случае одним из основных факторов, ограничивающих быстродействие ВОЛС, являются шумы спонтанного излучения, вносимые усилителями. В качестве нелинейных фильтров, подавляющих маломощные шумы и восстанавливающих форму передаваемых импульсов, могут использоваться оптические регенераторы. Применение же в качестве регенераторов электрических устройств ведет к серьезным ограничениям быстродействия ВОЛС. Поэтому актуальной проблемой является создание чисто оптических регенераторов.

В качестве таких устройств могут выступать интерферометры, построенные на основе оптического волокна (ОВ), например нелинейное оптическое кольцевое зеркало (НОКЗ), являющееся оптоволоконным аналогом интерферометра Саньяка. Благодаря нелинейной передаточной характеристике, НОКЗ может восстанавливать форму сигнала [2]. Впервые возможность применения НОКЗ для значительного увеличения дальности распространения данных в высокоскоростных ВОЛС была показана в работах [3, 4].

Нами было проведено моделирование ВОЛС, состоящей из равного числа участков стандартного одномодового волокна (SMF) и волокна, компенсирующего дисперсию (DCF). Схема ВОЛС приведена на рис.1. В этой линии связи проводился эксперимент по передаче данных в одном канале со скоростью 40 Гбит/с и было показано, что добавление в линию НОКЗ приводит к значительному увеличению дальности распространения данных [5].

В исследуемой ВОЛС осуществляется чередование волокон SMF и DCF. Каждый участок ОВ замыкает ВКР-усилитель, т. е. лазер, генерирующий обратную волну накачки на длине волны $\lambda_p = 1455$ нм. Эта длина волны

меньше несущей длины волны сигнала $\lambda_s = 1553$ нм, так что в результате энергия из волны накачки передается сигналу за счет эффекта комбинационного взаимодействия. Длина первого участка SMF составляет 77 км, длина второго участка – 88 км, длины участков DCF задаются значением средней дисперсии в линии. НОКЗ включено в линию в начале каждой периодической секции линии связи после гауссова фильтра со спектральной шириной $B_{opt} = 160$ ГГц. НОКЗ состоит из оптического соединителя (70 : 30) и оптического волокна со смещенной точкой нулевой дисперсии (DSF). Перед НОКЗ установлен эрбиевый усилитель с коэффициентом усиления $G = 23$ дБ (предусилитель), осуществляющий усиление сигнала до мощностей, необходимых для работы НОКЗ в нелинейном режиме, после НОКЗ стоит аттенуатор с $G = -23$ дБ, компенсирующий избыточную мощность сигнала. Замыкает периодическую секцию эрбиевый усилитель с $G \approx 11$ дБ.

На стыках между участками ОВ (SMF и DCF) имеются потери, которые мы положили равными –2 дБ. Мы считаем, что потери, связанные с затуханием на участках ОВ компенсируются ВКР-усилителями, а потери, связанные с действием НОКЗ, фильтров, а также потери на соединениях компенсируются эрбиевым усилителем, находящимся в конце периодической секции.

Нашей целью было численное исследование возможных режимов распространения одиночного импульса в этой линии, а также определение параметров, при которых возможно значительное увеличение дальности распространения данных в ВОЛС.

Распространение сигнала по ОВ описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера [6]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \gamma |A|^2 A = -i \frac{\alpha}{2} A. \quad (1)$$

Здесь A – огибающая электрического поля импульса; z – координата вдоль волокна; t – «запаздывающее» время, связанное с физическим временем t_{phys} соотношением $t = t_{phys} - z/v_g$; v_g – групповая скорость пакета; $\beta_2 = d(1/v_g)/d\lambda$ – дисперсия групповой скорости; $\beta_3 = d\beta_2/d\omega$; $\omega = 2\pi c/\lambda$ – частота; α – коэффициент затухания; $\gamma =$

А.И.Латкин. Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1; e-mail: a.i.latkin@ngs.ru

Поступила в редакцию 24 сентября 2004 г., после доработки – 30 ноября 2004 г.

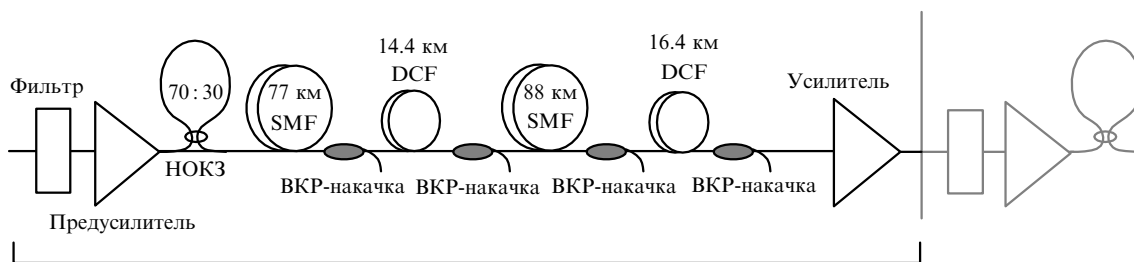


Рис.1. Схема периодической секции волоконно-оптической линии связи.

$2\pi n_2/\lambda A_{\text{эфф}}$ – коэффициент нелинейности; $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь моды; n_2 – нелинейный показатель преломления волокна.

Заметим, что уравнение (1) описывает только распространение сигнала по ОВ с заданными значениями коэффициентов $\beta_2, \beta_3, \gamma, \alpha$. Реальная же линия включает два разных типа ОВ с различными значениями этих коэффициентов (SMF и DCF), а также в ней имеются такие элементы, как фильтры, усилители и НОКЗ. Моделирование осуществляется следующим образом: на участке ОВ решается уравнение (1) (с тем или иным набором значений коэффициентов), затем при прохождении какого-либо сосредоточенного устройства сигнал преобразуется в соответствии с передаточной характеристикой этого устройства, после чего эволюция сигнала вновь описывается уравнением (1) (уже с другими $\beta_2, \beta_3, \gamma, \alpha$), и вся процедура повторяется необходимое число раз.

Принцип действия оптического фильтра основан на умножении распределения фурье-преобразования амплитуды импульса $A(\omega)$ на передаточную функцию фильтра. Эта функция имеет гауссову форму с единичной амплитудой на несущей частоте $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_s$, ее ширина на полувысоте равна $B_{\text{опт}}$. Если обозначить передаточную функцию оптического фильтра $R(\omega)$, то его действие записывается как $A_{\text{out}}(\omega) = A_{\text{in}}(\omega)R(\omega)$.

При учете прохождения сигнала через эрбиевый усилитель амплитуда сигнала домножается на коэффициент усиления $G = 10 \lg[G(\text{дБ})]$ [6]. ВКР-усилитель осуществляет распределенное усиление, и в случае, когда мощность волны накачки P_p значительно превосходит мощность сигнала P_s (в нашем случае $P_p \sim 1 \text{ Вт}$, $P_s \sim 1 \text{ мВт}$), можно пренебречь влиянием сигнала на волну накачки и считать, что она экспоненциально спадает за счет потерь в волокне, так что $P_p = P_0 \exp[-\alpha_p(L-z)]$, где L – дистанция, через которую установлены лазеры, генерирующие волну накачки, α_p – коэффициент затухания волны накачки. В результате в уравнении (1) следует заменить α на $\alpha_{\text{эфф}} = \alpha - 2g_0 \exp[-\alpha_p(L-z)]$. Учитывается также, что усилители добавляют к сигналу шумы спонтанного излучения. В задаче о распространении одиночного импульса можно пренебречь шумами спонтанного излучения, однако их необходимо принимать во внимание при моделировании передачи данных по ВОЛС.

Нелинейное оптическое кольцевое зеркало состоит из петли оптоволокну с большим коэффициентом нелинейности и оптического соединителя. Сигнал, попадающий на вход такого устройства, разделяется на оптическом соединителе на сигналы, бегущие по кольцу в противоположных направлениях (при этом амплитуды сигналов делятся в отношении 70 : 30, а к фазе одного из сигналов добавляется $\pi/2$). Для каждого из сигналов отдельно решается уравнение (1) с соответствующими начальными

Табл.1. Типы волоконных световодов и их параметры.

Параметр	SMF	DCF	DSF
α_s на $\lambda_s = 1553 \text{ нм}$ (дБ/км)	0.2	0.52	0.2
α_p на $\lambda_p = 1455 \text{ нм}$ (дБ/км)	0.279	0.87	–
$A_{\text{эфф}}$ (мкм ²)	80	20	54.1
β_2 (пс·нм ⁻¹ ·км ⁻¹)	16.2	–86.9	2.8
β_3 (пс·нм ⁻² ·км ⁻¹)	0.037	0.058	0.069
n_2 (м ² /Вт)	2.7×10^{-20}	2.7×10^{-20}	2.7×10^{-20}

ми условиями, после чего учитывается их интерференция на оптическом соединителе [2].

Уравнение (1) решалось численно. Был применен метод расщепления на линейную и нелинейную часть. Линейная часть уравнения решалась методом Фурье с использованием быстрого преобразования Фурье [7, 8]. Для разных типов волокна значения коэффициентов $\beta_2, \beta_3, \gamma, \alpha$ различны. Они приведены в табл.1.

Вначале рассмотрим распространение одиночного импульса в ВОЛС. Параметры НОКЗ задаются таким образом, чтобы мощность сигнала на выходе зеркала P_{out} равнялась мощности сигнала на его входе P_{in} . При этом выбирается точка после первого максимума передаточной характеристики [2], тогда небольшие колебания мощности не будут приводить к разбалансировке зеркала, т.е. будет существовать положительная обратная связь (рис.2), которая приведет к саморегуляции энергии импульса, другими словами, к формированию автосолитона после многократного прохождения НОКЗ. Заметим, что в наших расчетах, в отличие от работ [3, 4], волокно, из которого изготовлено кольцо НОКЗ, имеет ненулевые дисперсии второго и третьего порядков. За

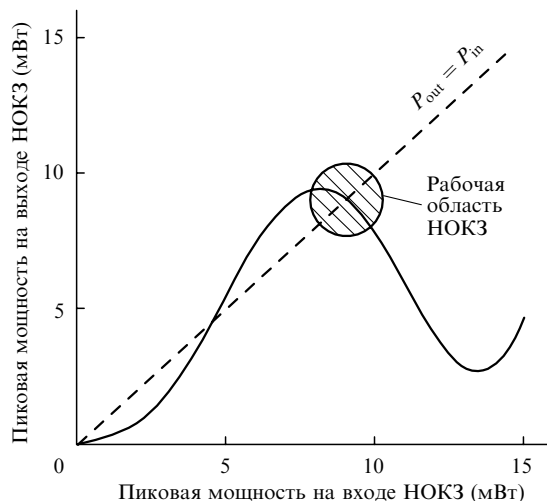


Рис.2. Передаточная характеристика кольцевого зеркала.

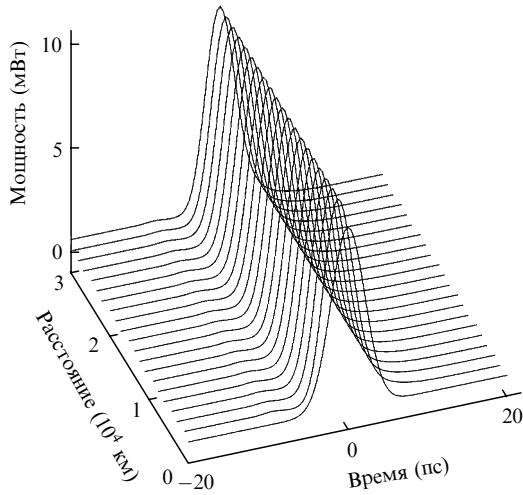


Рис.3. Динамика гауссова импульса с шириной на полувысоте 4.2 пс и начальной пиковой мощностью $P_0 = 12.5$ мВт на входе НОКЗ.

счет этого амплитуда и фаза сигнала на выходе устройства зависят не только от его начальной амплитуды (мощности), но и от ширины импульса. Следовательно, процесс формирования устойчивого автосолитона становится более сложным, однако при правильном подборе параметров линии и НОКЗ энергия сигнала устанавливается уже после нескольких первых периодических секций ВОЛС.

В качестве начального импульса выбирался импульс гауссовой формы с пиковой мощностью $P_{\text{peak}} = 12.5$ мВт и шириной на полувысоте $T_{0.5} = 4.2$ пс. На рис.3 изображена последовательность импульсов, выведенных в конце периодических секций, т. е. представлена так называемая медленная динамика импульса. Изменения параметров импульса на протяжении одной периодической секции называются быстрой динамикой импульса.

При распространении сигнала по ВОЛС имеется систематический сдвиг центра импульса во времени из-за того, что среднее значение β_3 в линии не равно нулю. Поэтому на рис.3 в каждой точке по z приведено распределение амплитуды $A(z, t - \bar{t}(z))$, где

$$\bar{t}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} t |A(z, t)|^2 dt / \int_{-\infty}^{\infty} |A(z, t)|^2 dt. \quad (2)$$

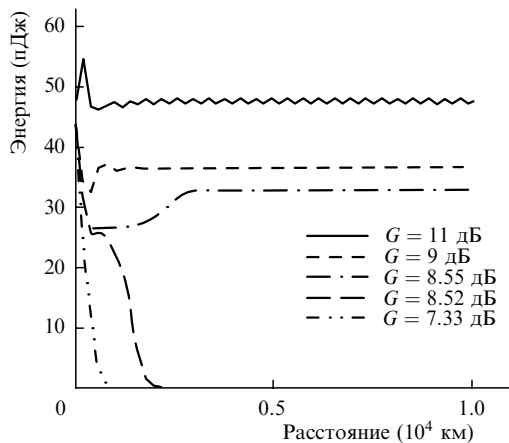


Рис.4. Зависимости энергии импульса от расстояния для различных значений коэффициента усиления G .

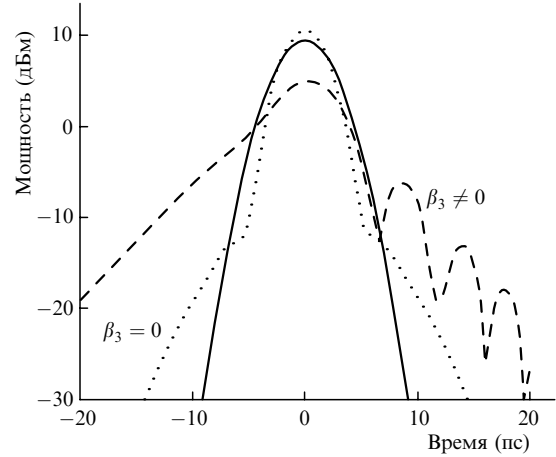


Рис.5. Временные зависимости мощностей начального гауссова импульса (сплошная кривая) и автосолиitonов в линии связи при $\beta_3 = 0$ (пунктирная кривая) и $\beta_3 \neq 0$ (штриховая кривая).

Характер распространения импульса определяется параметрами ВОЛС, в частности, коэффициентом усиления G эрбиевого усилителя. Варьируя эту величину, можно добиться устойчивого автосолиitonного режима, когда энергия импульса на входе НОКЗ не меняется от секции к секции. На рис.4 показаны зависимости энергии импульса от пройденного расстояния для нескольких значений G . Видно, что устойчивое распространение импульса возможно только в некотором диапазоне значений G .

При этом из-за ненулевого значения β_3 автосолиiton имеет сложную форму, несимметричную относительно центра импульса (штриховая кривая на рис.5; для наглядности мощность измеряется в децибелах относительно милливатта ($P(\text{дБм}) = 10 \lg[P(\text{мВт})/1 \text{ мВт}]$). В результате даже в том случае, когда энергия импульса и его среднеквадратичная ширина, определяемая как [8]

$$\bar{T} = \left[\int_{-\infty}^{\infty} t^2 |A(z, t)|^2 dt / \int_{-\infty}^{\infty} |A(z, t)|^2 dt \right]^{1/2}, \quad (3)$$

являются константами, значения его пиковой мощности и ширины на полувысоте могут периодически колебаться в отличие от линии с $\beta_3 = 0$ [3, 4]. Для сравнения на рис.5 приведены форма импульса для линии с нулевой средней

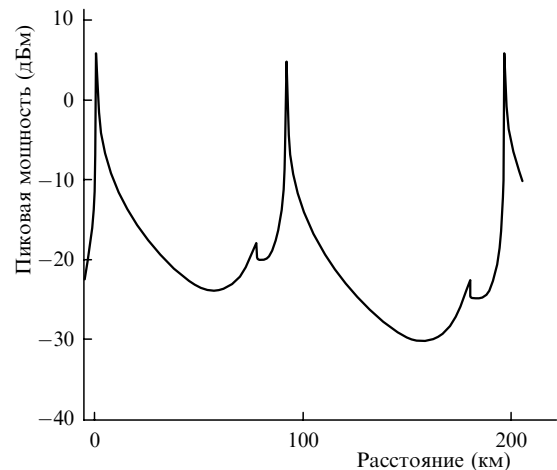


Рис.6. Зависимость пиковой мощности от расстояния на одной периодической секции линии связи.

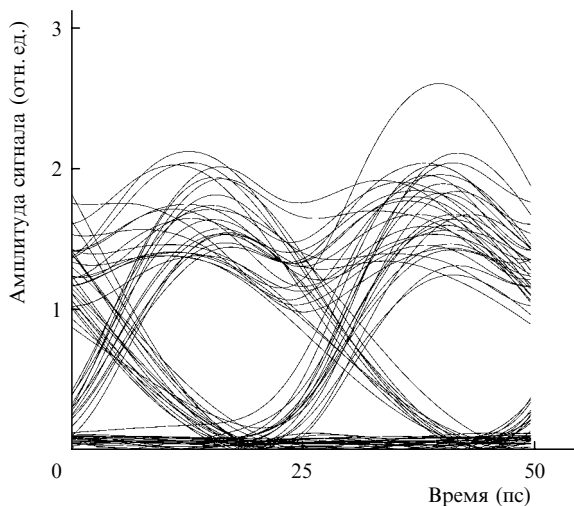


Рис.7. Индикаторная диаграмма для линии связи без регенератора; Q -фактор равен 6 на расстоянии 1600 км (максимум Q по периодической секции).

β_3 (пунктирная кривая) и начальный гауссов импульс (сплошная кривая).

Быстрая динамика пиковой мощности импульса на протяжении одной секции показана на рис.6. Имеющиеся локальные пики соответствуют местам расположения ВКР-лазеров, генерирующих волну накачки.

Теперь перейдем к моделированию передачи данных в этой линии. Данные передавались в одном канале со скоростью 40 Гбит/с. При этом параметры линии и НОКЗ выбирались так, чтобы в линии мог распространяться автосолиiton (т. е. модельная задача о распространении одиночного импульса в ВОЛС может рассматриваться как предварительная оптимизация параметров ВОЛС для увеличения ее производительности в плане передачи данных). Основной характеристикой линии является дальность распространения – максимальное расстояние, на котором значение коэффициента ошибки BER не превышает критического значения 10^{-9} при данной скорости передачи данных. При моделировании передачи данных учитывались шумы спонтанного излучения, поскольку они являются одним из основных факторов, ограничивающих дальность распространения в линии.

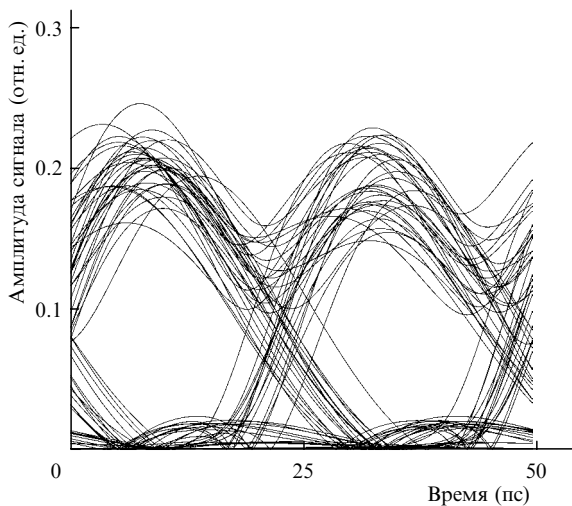


Рис.8. Индикаторная диаграмма для линии связи с регенератором; Q -фактор равен 9 на расстоянии 7000 км (максимум Q по периодической секции).

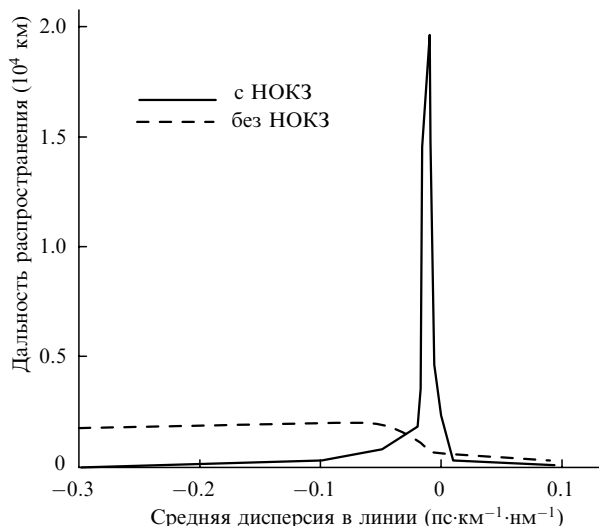


Рис.9. Зависимость дальности распространения от средней дисперсии в линии связи с регенератором и без регенератора.

Часто вместо коэффициента ошибки используют так называемый Q -фактор, связанный с BER следующим соотношением:

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

Значение $Q = 6$ соответствует $BER = 10^{-9}$.

Мы варьировали основные параметры, влияющие на дальность распространения – среднюю дисперсию в линии D_{av} и пиковую мощность передаваемых импульсов P_{peak} , чтобы определить максимально возможную дальность распространения в этой линии.

Передаваемые данные моделировались псевдослучайной последовательностью длиной $2^7 - 1$ бит, для каждого набора параметров проводились расчеты с 7 независимыми битовыми последовательностями, после чего находилось медианное среднее дальности распространения [9]. На рис.7,8 приведены так называемые индикаторные диаграммы для линии без НОКЗ (рис.7) и со встроенным НОКЗ (рис.8). На этих диаграммах распределение амплитуды импульсов в каждой паре последовательных битовых интервалов (длиной $T_b = 25$ пс при скорости 40 Гбит/с) сдвинуто по времени, так что все они наложены друг на друга на отрезке от 0 до 50 пс. Индикаторные диаграммы наглядно показывают, что в линии без НОКЗ уже на расстоянии 1600 км последовательность импульсов искажена значительно сильнее, чем в линии со встроенным НОКЗ на расстоянии 7000 км.

На рис. 9 показана зависимость дальности распространения от средней дисперсии для линии с НОКЗ (сплошная кривая) и без НОКЗ (штриховая кривая). При некоторой средней дисперсии ($D_{av} = -0.01$ пс·км⁻¹·нм⁻¹) в линии с НОКЗ имеется резкий максимум и значение дальности распространения достигает 20000 км, в то время как в линии без НОКЗ зависимость плавная и дальность распространения не превышает 2000 км. Для сравнения в эксперименте [5] было получено увеличение дальности распространения в линии с НОКЗ до 4000 км. Зависимость дальности распространения от пиковой мощности импульса на входе очень слабая в достаточно широком интервале мощностей ($P_{peak} = 7 - 18$ мВт).

Итак, мы продемонстрировали возможность увеличения дальности распространения данных в ВОЛС при использовании следующего алгоритма. Сначала решается модельная задача, причем параметры НОКЗ и линии (коэффициент усиления G) выбираются такими, чтобы в линии имелись автосолиitonные решения. После этого уже непосредственно моделируется передача данных при варьировании основных параметров, влияющих на дальность распространения: средней дисперсии в линии и пиковой мощности передаваемых импульсов. Подобный алгоритм позволяет найти значения параметров, при которых дальность распространения максимальна.

Таким образом, нами представлены результаты численного моделирования ВОЛС со встроенными оптическими регенераторами на основе НОКЗ. Показано, что в данной линии возможно существование автосолиitonов, т. е. импульсов, параметры которых периодически восстанавливаются. При этом за счет ненулевой средней дисперсии третьего порядка в линии автосолиiton имеет сложную форму, поэтому целесообразно описывать такой импульс не пиковой мощностью и шириной на полувывсоте, а полной энергией и среднеквадратичной ши-

риной. Выполнена оптимизация ВОЛС с одним частотным каналом и скоростью передачи данных 40 Гбит/с. Для линии со встроенным НОКЗ достигнута дальность распространения 20000 км, что на порядок превышает дальность распространения в линии без НОКЗ.

1. Alleston S.B., Harper P., Penketh I.S., Bennion I., Doran N.J., Ellis A.D. *Electron. Lett.*, **35** (10), 823 (1999).
2. Agrawal G.P. *Applications of Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press, 2001).
3. Boscolo S., Turitsyn S.K., Blow K.J. *Techn. Dig. Nonlinear Guided Waves Their Applications (NLGW 2001)* (Clearwater, Florida, USA, 2001, p. 248, MC71).
4. Boscolo S., Turitsyn S.K., Blow K.J. *Techn. Dig. Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC 2001)* (Anaheim, California, USA, 2001, MF6).
5. Gray A., Huang Z., Lee Y.W.A., Khrushchev I.Y., Bennion I. *Opt. Lett.*, **29** (9), 926 (2004).
6. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997).
7. Cooley J.W., Tukey J.W. *Math. Comput.*, **19**, 297 (1965).
8. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press, 2001).
9. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *Electron. Lett.*, **37** (19), 1179 (2001).