

А. И. Латкин, А. В. Якасов*(Новосибирск)***АВТОСОЛИТОННЫЕ РЕЖИМЫ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА
В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ
С НЕЛИНЕЙНЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ ЗЕРКАЛАМИ**

Рассматриваются режимы распространения импульса в волоконно-оптической линии связи с периодически включенными нелинейными устройствами – нелинейными оптическими кольцевыми зеркалами (НОКЗ). Исследуется способность НОКЗ восстанавливать форму импульса и подавлять шумы спонтанной эмиссии. Показана возможность осуществления стабилизации импульса в широком интервале параметров линии (ширины оптического фильтра).

Введение. Использование дисперсионно-управляемых солитонов для передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) с периодически изменяющимся знаком дисперсии позволяет компенсировать влияние фазовой самомодуляции путем смены знака дисперсии оптического волокна (ОВ) [1]. В работах [2, 3] экспериментально показана возможность передачи данных в таких ВОЛС со скоростью 40 Гбайт/с на расстояние в несколько тысяч километров. Однако для высокоскоростных линий связи влияние шумов, обусловленных спонтанной эмиссией, может накапливаться и приводить к искажению формы передаваемых импульсов и снижению производительности ВОЛС, что требует периодического восстановления формы импульса. Использование для этих целей электронных устройств накладывает значительные ограничения на производительность ВОЛС, снижающие скорость их работы. Восстановление формы импульса может быть достигнуто путем комбинирования техники дисперсионного управления и периодически установленных насыщающихся поглотителей, что позволяет подавить флуктуации фазы, усиленную спонтанную эмиссию и взаимодействие импульсов [4]. В работах [5–7] показано, что роль насыщающегося поглотителя может также играть нелинейное оптическое кольцевое зеркало (НОКЗ) или дисперсионно-разбалансированное кольцевое зеркало. Скорость работы этих устройств определяется временем нелинейного отклика среды (кварца), составляющим всего несколько фемтосекунд.

Целью данной работы является исследование режимов распространения импульса в ВОЛС с периодически включенными НОКЗ.

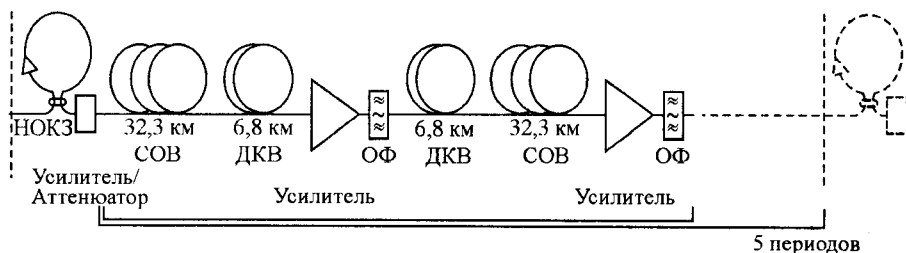


Рис. 1. Схема одного элемента периодической ВОЛС

Использование кольцевого зеркала в волоконно-оптических линиях связи. В работах [5, 6] предложена следующая симметричная дисперсионная схема ВОЛС (рис. 1). ВОЛС состоит из равного числа участков стандартного одномодового волокна (СОВ) и дисперсионно-компенсирующего волокна (ДКВ). При этом осуществляется чередование различных блоков ОВ: СОВ–ДКВ и ДКВ–СОВ. Каждый блок ОВ замыкают сосредоточенный эрбиевый усилитель и гауссовский оптический фильтр (ОФ). НОКЗ установлены в линию через каждые пять периодических секций. (НОКЗ состоит из оптического соединителя (50 : 50) и кольца оптического волокна со смещенной дисперсией (ВСД).) Значения коэффициента дисперсии групповой скорости (ДГС), константы затухания γ и эффективной площади моды A_{eff} для оптических волокон, используемых в линии и в НОКЗ, приведены в таблице. Симметрия зеркала разбалансирована усилителем, размещенным вблизи оптического соединителя (рис. 2).

Распространение сигнала по ОВ описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера (ОНУШ)

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} + i \frac{\beta_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} + \gamma(z) A(z, t) = i \sigma(z) |A(z, t)|^2 A(z, t), \quad (1)$$

где $A(z, t)$ – медленно меняющаяся огибающая импульса; $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$ – величина, связанная с дисперсией групповой скорости ДГС следующим соотношением:

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \text{ДГС}$$

(λ – длина волны света); $\gamma(z)$ – коэффициент затухания; $\sigma(z)$ – коэффициент

Расчетные параметры ОВ

Тип ОВ	ДГС, пс/(нм·км)	γ , дБ/км	A_{eff} , мкм ²
СОВ	15	0,22	70
ДКВ	-71,2	0,65	30
ВСД	0	0,3	25

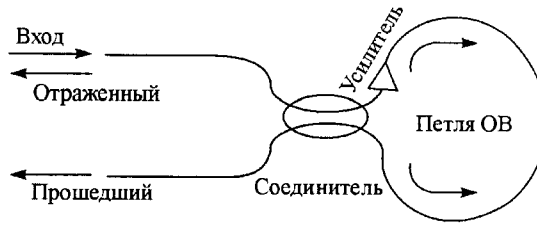


Рис. 2. Схема нелинейного оптического кольцевого зеркала

нелинейности, связанный с эффективной площадью моды соотношением

$$\sigma = 2\pi n_2 / \lambda A_{\text{eff}}$$

(n_2 – нелинейный коэффициент показателя преломления). Зависимость коэффициентов в ОНУШ от z следует понимать в том смысле, что для различных типов ОБ значения коэффициентов различные.

НОКЗ работает как интерферометр. Сигнал, поданный на вход такого устройства, разделяется на оптическом соединителе на сигналы, бегущие по кольцу в противоположных направлениях, которые затем интерферируют на выходе из кольца. При длине волны $\lambda = 1,553$ мкм дисперсия ВСД равняется нулю, форма импульса при распространении по НОКЗ не изменяется, появляется только дополнительный набег фазы за счет нелинейных эффектов. Сигнал, бегущий по часовой стрелке, усиливается сразу на входе в кольцо и затем испытывает сильное нелинейное преломление, в то время как сигнал, бегущий в противоположном направлении, усиливается только перед выходом из кольца и испытывает меньшее нелинейное преломление. В результате образуется ненулевой относительный набег разности фаз, пропорциональный мощности сигнала. Амплитуда и фаза импульса на выходе зеркала нелинейным образом зависят от входной мощности.

Коэффициент усиления составляет 23,1 дБ, потери на аттенуаторе 21 дБ, длина НОКЗ 3 км. При этих параметрах, как было показано в работе [5], до-

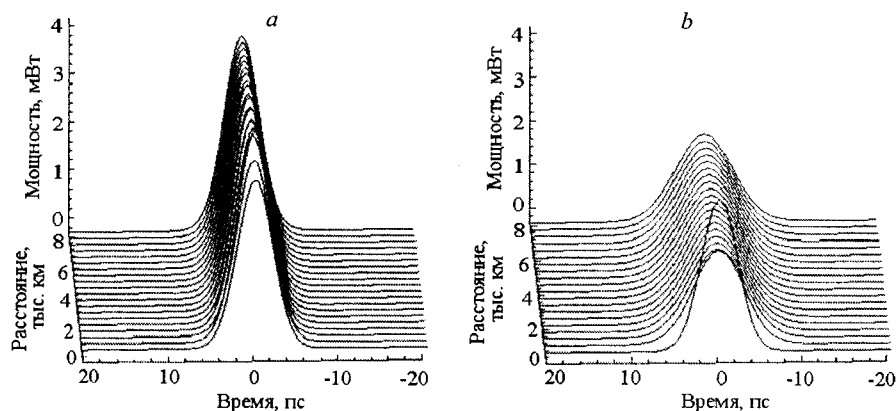


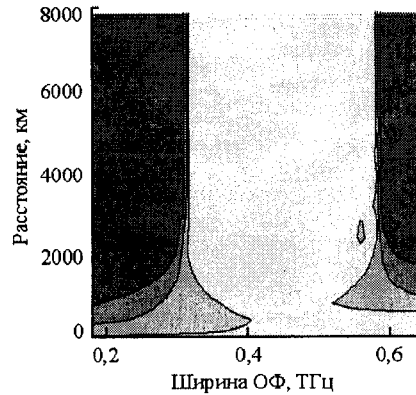
Рис. 3. Распространение импульса с входной пиковой мощностью 3,5 мВт и шириной на полувывоте 5 пс в линии с НОКЗ: при ширине фильтра $B_{\text{opt}} = 0,5$ ТГц (a) и $B_{\text{opt}} \approx 0,3$ ТГц (b). (Сигнал на входе НОКЗ.)

Рис. 4. Контурный график стабилизации

стигается оптимальный режим распространения одиночного импульса с пиковой мощностью 3,5 мВт.

В работах [5, 6] показано, что при некоторой ширине оптического фильтра в линии с НОКЗ осуществляется стабилизация одиночного импульса, т. е. на входе каждого НОКЗ происходит полное восстановление формы импульса. В этом случае говорят об автосолитонном режиме распространения. Термин «автосолитон» здесь введен для описания квазистационарного состояния, существование которого поддерживается НОКЗ. При прочих фиксированных параметрах линии распространение импульса в ней регулируется заданием ширины оптического фильтра. В данной работе показано, что в зависимости от выбранной ширины оптического фильтра могут реализовываться два различных режима стабилизации импульса (рис. 3).

Стабилизация для выбранного начального импульса возможна, когда ширина оптического фильтра лежит примерно в интервале 0,3–0,6 ТГц. Уровень стабилизации по пиковой мощности показан на контурном графике (рис. 4). Более темная область соответствует деградации сигнала, светлая – стабилизации по пиковой мощности. Внутри области стабилизации реализуется первый режим автосолитонного распространения (сплошная кривая на рис. 5, $B_{\text{opt}} = 0,5$ ТГц) с пиковой мощностью импульса 4 мВт и шириной на полувысоте 5 пс. Для большей наглядности использована логарифмическая шкала по оси ординат. При очень тонкой настройке ширины фильтра на границе области стабилизации реализуется второй режим автосолитонного распространения (штриховая кривая на рис. 5, $B_{\text{opt}} \approx 0,3$ ТГц) с пиковой мощностью импульса 2 мВт и шириной на полувысоте около 7 пс. На рис. 6 приведены для сравнения сигналы различной формы для первого режима стабилизации: начальный гауссовский импульс с пиковой мощностью 3,5 мВт и шириной на полувысоте 5 пс (сплошная кривая), автосолитон (штриховая кривая), фундаментальный солитон $P(t) = P_0 / ch^2(t/T)$ с пиковой мощностью и шириной на полувысоте такими же, как у автосолитона (штрихпунктирная кривая). Видно, что автосолитон заметно отличается как от начального импульса, так и от фундаментального солитона. Имеет смысл характеризовать стабилизацию одиночного импульса двумя величинами: среднеквадратичной шириной импульса



$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} t^2 |A(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |A(t)|^2 dt}} \quad (2)$$

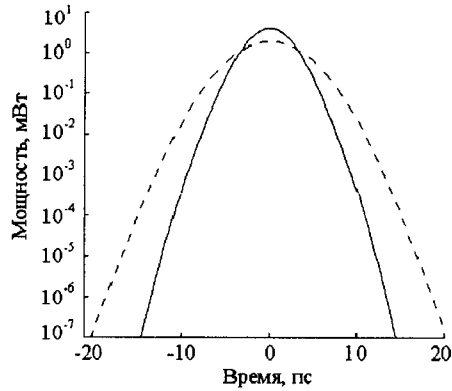


Рис. 5. Автосолитоны для двух режимов стабилизации

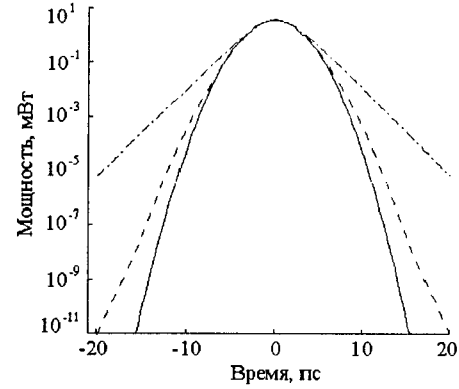


Рис. 6. Импульсы различной формы для первого режима стабилизации

и среднеквадратичным параметром фазовой модуляции импульса

$$C_{RMS} = \frac{i \int_{-\infty}^{\infty} t \left(A^*(t) \frac{\partial A(t)}{\partial t} - A(t) \frac{\partial A^*(t)}{\partial t} \right) dt}{4 \int_{-\infty}^{\infty} t^2 |A(t)|^2 dt} \quad (3)$$

Параметры автосолитона для первого режима стабилизации ($B_{opt} = 0,5$ ТГц): $T_{RMS} = 3,3$ пс, $C_{RMS} = 8 \cdot 10^{-3}$ ТГц², для второго режима стабилизации ($B_{opt} \approx 0,3$ ТГц): $T_{RMS} = 2,1$ пс, $C_{RMS} = 1,7 \cdot 10^{-3}$ ТГц².

Заключение. Таким образом, в предлагаемой работе показана возможность осуществления двух режимов стабилизации одиночного импульса с помощью НОКЗ простейшего типа, состоящего из оптического соединителя и петли сильнонелинейного оптоволокна. Найден интервал ширины фильтра, при которой существует автосолитонное решение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. N. Y.: A Wiley-Interscience Publication, 1997.
2. Alleston S. B., Harper P., Penketh I. S. et al. 1000 km transmission of 40 Gbit/s single channel RZ data over dispersion managed standard (non-dispersion shifted) fibre // Electron. Lett. 1999. **35**, N 10. P. 823.
3. Gnauck A. H., Park S.-G., Wiesenfeld J. M., Garrett L. D. Highly dispersed pulses for 2×40 Gb/s transmission over 800 km of conventional single-mode fiber // Electron. Lett. 1999. **35**, N 25. P. 2218.
4. Smith N. J., Doran N. J. Picosecond soliton transmission using concatenated nonlinear optical loop-mirror intensity filters // JOSA. 1995. **B12**. P. 1117.

5. **Boscolo S., Turitsyn S. K., Blow K. J.** Stabilization of dispersion-managed soliton transmission in systems with very large map strength by in-line nonlinear optical loop mirrors // Techn. Dig. of Nonlinear Guided Waves and Their Applications (NLGW 2001). Clearwater, Florida, USA. MC71. 2001. P. 248.
6. **Boscolo S., Turitsyn S. K., Blow K. J.** All-optical passive regeneration of 40 Gbit/s soliton data stream using dispersion management and in-line nonlinear optical loop mirrors // Techn. Dig. of Optical Fiber Communication Conference (OFC 2001). Anaheim, California, USA. MF6. 2001.
7. **Chi N., Carlsson B., Jeppesen P.** 2R regeneration based on dispersion-imbalanced loop mirror and its applications in WDM systems // Journ. Lightwave Technol. 2002. **20**, N 10. P. 1809.

*Новосибирский государственный университет,
E-mail: a.i.latkin@ngs.ru*

*Поступила в редакцию
4 ноября 2003 г.*

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!