

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛИНИЯХ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ*

Ю. И. ШОКИН, М. П. ФЕДОРУК

Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

e-mail: shokin@ict.nsc.ru, mife@ict.nsc.ru

А. Д. ШАПИРО

Новосибирский государственный университет, Россия

e-mail: holo@akadem.org

Е. Г. ШАПИРО, С. К. ТУРИЦЫН

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия

e-mail: shapiro.e@iae.nsk.su

We present a novel nonlinear transmission regime at 40 Gbit/s using non-periodic carrier pulses with 50% duty cycle and sliding (with propagation) chirp-free points. The quasi-stable transmission of such carrier pulses is supported by large normal span average dispersion and misbalanced optical amplification.

Введение

Концепция управления дисперсией (dispersion management) является ключевой технологией при разработке магистральных, сверхбыстрых волоконно-оптических линий связи (со скоростью передачи 40 Гбит/с и более в одном частотном канале). В дисперсионно-управляемых системах используются волоконные световоды с противоположной по знаку хроматической дисперсией, что позволяет контролировать дисперсионное уширение импульса. Если средняя дисперсия линии на одном периоде $\langle D \rangle = 0$, то тогда в линейном случае в отсутствие затухания и шума форма сигнала будет полностью восстанавливаться в конце линии [1]. Уменьшение суммарной хроматической дисперсии позволяет подавить флуктуации положения отдельных битов — так называемый эффект Гордона — Хаусса [2]. Поэтому часто при проектировании современных волоконно-оптических линий связи фиксируют нулевую среднюю дисперсию.

Однако использование линейных режимов передачи информации по магистральным линиям связи со встроенными оптическими усилителями не является оптимальным с точ-

*Работа выполнена при поддержке Президента РФ (грант № НШ-2314.2003.1).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2004.

ки зрения минимизации коэффициента ошибки из-за сильного воздействия на маломощный оптический сигнал шумов усиленной спонтанной эмиссии. Эти шумы приводят к искажению формы сигнала в единичных битах и появлению паразитных возмущений поля в нулевых битах (на исходно пустых местах). Увеличение мощности оптических сигналов вызывает их деградацию вследствие нелинейности. При скоростях передачи данных 40 Гбит/с в одном частотном канале основным нелинейным фактором, ограничивающим пропускную способность линии, является взаимодействие соседних битов.

Одним из возможных путей уменьшения паразитного влияния нелинейных факторов является использование квазилинейных режимов передачи информации на основе оптических импульсов с длительностью, много меньшей чем длительность битового интервала [3, 4]. Однако короткая длительность несущих импульсов ведет к спектральному уширению, что не всегда оптимально для режимов с высокой спектральной эффективностью в системах со спектральным уплотнением каналов.

Здесь мы продемонстрируем возможность квазиустойчивых нелинейных режимов передачи данных с длительностью оптических сигналов, составляющей 50% длительности битового интервала. Найденные квазиустойчивые импульсы существуют при большой нормальной дисперсии и разбалансировке оптического усиления и представляют новый тип нелинейных носителей информации. Показано, что достаточно большая нормальная средняя дисперсия приводит к существенному увеличению пропускной способности волоконной линии связи в режиме передачи данных $N \times 40$ Гбит/с и 100 ГГц разделением между соседними частотными каналами.

1. Постановка задачи

Распространение оптических импульсов по волоконной линии связи с распределенной дисперсией описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера для комплексной огибающей A электромагнитного поля [1]:

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

Здесь z — расстояние вдоль линии; t — время; $|A|^2$ — мощность сигнала; β_2 — параметр дисперсии групповой скорости; σ — коэффициент керровской нелинейности. Величины γ , σ и β_2 представлены как функции от z , чтобы учесть изменения этих параметров при переходе от одного типа световода к другому. Коэффициент нелинейности σ определяется формулой $\sigma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{\text{eff}}}$, где n_2 — нелинейный показатель преломления; λ_0 — несущая длина волны; A_{eff} — эффективная площадь собственной моды световода. Функция $G(z)$ описывает процессы затухания и усиления оптического сигнала. Конкретный вид $G(z)$ задается типом оптического усиления. Для численного решения уравнения (1) использовался метод операторной экспоненты [1].

Оценкой “качества” коммуникационной системы является величина коэффициента ошибки (Bit-Error Rate), которая определяет количество ошибочных битов к общему числу переданных битов [5].

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 (среднеквадратичные отклонения).

Тогда можно ввести стандартную величину — Q -фактор,

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

которая связана с BER следующим образом:

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

В линиях, где используются теоретико-информационные методы коррекции ошибок (Forward Error Correction (FEC)) [6], приемлемыми значениями Q -фактора считаются 4 и более.

В расчетах передаточная способность волоконно-оптических линий связи анализировалась в терминах Q -фактора ($Q > 6$ для коэффициента ошибки $\text{BER} < 10^{-9}$), полученного посредством усреднения 25 псевдослучайных последовательностей по $2^7 - 1$ бит в каждой [7].

2. Конфигурации линий и параметры волоконных световодов

Нами без ограничения общности были рассмотрены волоконно-оптические линии связи, состоящие из 17 участков вида

A. SMF +EDFA +DCF+ EDFA,

где SMF — стандартное одномодовое волокно и DCF — волокно с компенсацией дисперсии.

Длина SMF составляла 85 км, и для полной компенсации дисперсии длина DCF выбиралась равной 14.45 км. Для компенсации затухания сигнала в линии использовались два волоконных эрбиевых усилителя (EDFA) с коэффициентом шума 4.5 дБ и одинаковыми коэффициентами усиления 13.4 дБ. Заметим, что потери после прохождения сигнала в SMF не полностью компенсировались и полная компенсация потерь производилась после DCF, приводя к разбалансировке усиления и поддержанию квазиустойчивых, нелинейных режимов распространения.

Параметры волоконных световодов

SMF	Затухание при 1550 нм	0.2 дБ/км
	Эффективная площадь	$u \cdot 10^4 80$ мкм ²
	Дисперсия	17 пс/нм/км
	Дисперсионный наклон	$u \cdot 10^4 0.07$ пс/нм ² /км
	Нелинейный показатель преломления	$u \cdot 10^4 2.7 \cdot 10^{-20}$ м ² /Вт
DCF	Затухание при 1550 нм	0.65 дБ/км
	Эффективная площадь	$u \cdot 10^4 19$ мкм ²
	Дисперсия	-100 пс/нм/км
	Дисперсионный наклон	$u \cdot 10^4 -0.41$ пс/нм ² /км
	Нелинейный показатель преломления	$u \cdot 10^4 2.7 \cdot 10^{-20}$ м ² /Вт

Б. SMF + BRA + DCF + EDFA.

В этой конфигурации вместо эрбиевого волоконного усилителя после участка SMF для компенсации потерь использовался волоконный рамановский усилитель с обратной накачкой (BRA). Для изучения влияния распределенного усиления на устойчивость нелинейного режима выбирались различные соотношения между коэффициентами усиления волоконного рамановского и эрбиевого усилителей.

Средняя дисперсия линии (SAD) изменялась за счет небольшого изменения длины волокна с компенсацией дисперсии DCF. Численное моделирование было выполнено для восьми частотных каналов в диапазоне длин волн от 1550.1 до 1555.8 нм с 100 ГГц разделением между соседними каналами и скоростью передачи данных 40 Гбит/с в одном частотном канале (см. таблицу). В качестве единичных битов в расчетах использовались гауссовы импульсы с длительностью 12.5 пс и различной пиковой мощностью.

3. Результаты численного моделирования

Рассмотрим результаты численного моделирования. Для первой конфигурации, даже при относительно низких входных пиковых мощностях около 1 мВт, режим распространения сигнала является нелинейным. На рис. 1 показана величина Q -фактора после 1700 км распространения для 8 частотных каналов (вертикальные линии) в зависимости от средней дисперсии для начальной пиковой мощности 2.6 мВт. Видно, что оптимальным с точки зрения величины Q -фактора является режим с достаточно большой нормальной величиной средней дисперсии $\langle D \rangle = -0.7$ пс/нм/км. Большая величина средней дисперсии свидетельствует, что оптимальный режим распространения нелинейный. Для понимания физического механизма этого нелинейного режима рассмотрим более детально эволюцию

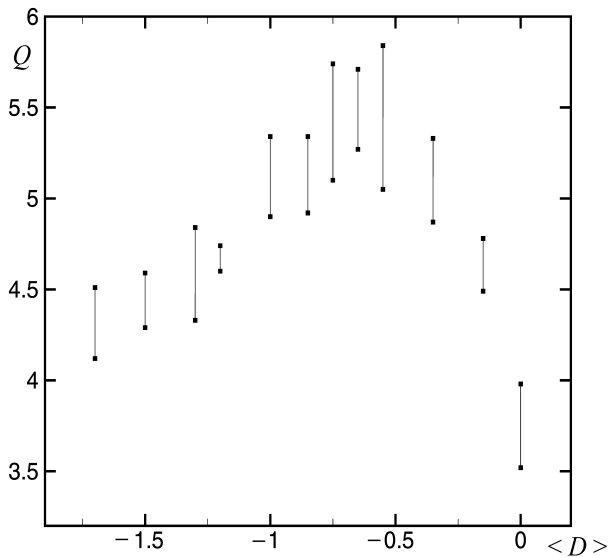


Рис. 1. Конфигурация А. Q -фактор в 8 каналах после распространения сигнала на расстояние 1700 км в зависимости от средней дисперсии при входной пиковой мощности 2.6 мВт.

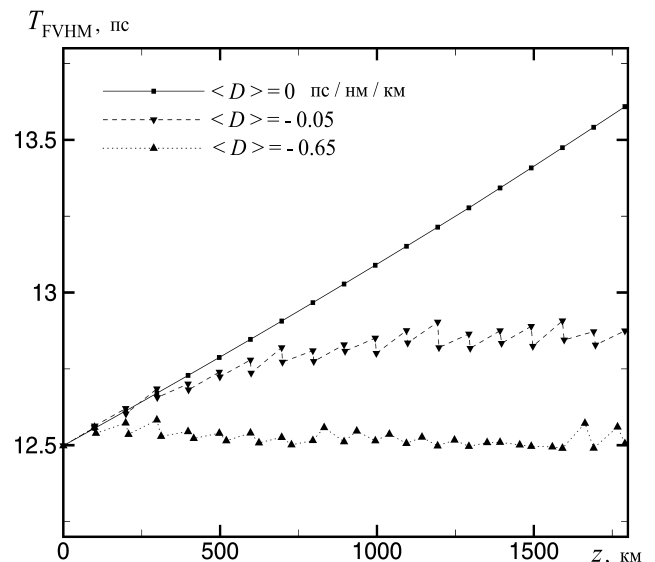


Рис. 2. Ширина импульса T_{FWHM} в зависимости от дистанции распространения z для трех различных величин нормальной средней дисперсии линии.

одиноким импульсом в системе для различных значений средней дисперсии. Эволюция длительности оптического импульса с пиковой мощностью 2 мВт вдоль линии показана на рис. 2. Уширение импульса при нулевой средней дисперсии свидетельствует о влиянии нелинейности, и для стабилизации ширины импульса требуется конечная средняя дисперсия. Уширение несущих сигналов при нулевой средней дисперсии ведет к их деградации и уменьшению величины Q -фактора. Это уширение можно предотвратить уже для режимов с малой величиной нормальной средней дисперсии (-0.05 пс/нм/км), использование которых ведет к стабилизации ширины импульса. Отметим, что в этом случае стабилизация происходит при ширинах больше начальной ширины импульса $T_{FWHM} = 12.5$ пс, как это видно из рис. 2.

Использование большой нормальной дисперсии (~ -0.7 пс/нм/км) приводит к стабилизации начальной ширины импульса и даже к его незначительному сжатию. Физический механизм стабилизации или даже слабой компрессии импульса подобен механизму, описанному в [8]. Распространение в нелинейном режиме приводит к появлению чирпа (chirp) у импульса. Далее, благодаря разбалансировке усиления распространение импульса по световоду с противоположным знаком хроматической дисперсии происходит в линейном режиме (с низкой мощностью), что приводит к сжатию импульса. Хотя режим распространения нелинейный, важно отметить, что данный эффект не является солитонным, поскольку сигнал, распространяющийся в линии, не имеет характеристик дисперсионно-управляемого солитона [9]. Наиболее важное отличие от дисперсионно-управляемого солитона состоит в том, что точка нулевого чирпа в стандартном одномодовом волокне сдвигается на расстояние $\Delta z = L\langle D \rangle / D_{SMF}$ после каждой секции, как это показано на рис. 3. Здесь L есть длина периодического участка линии. Для данной входной мощности после конечного числа секций точка нулевого чирпа исчезает и оптический импульс начинает уширяться от секции к секции. Данное обстоятельство приводит к усилению эффекта

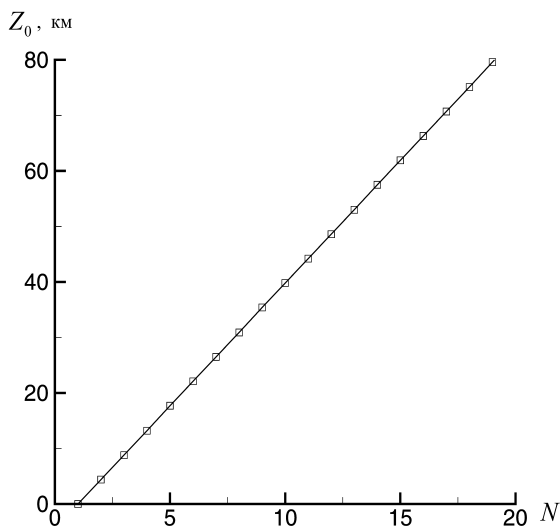


Рис. 3. Положение точки Z_0 нулевого чирпа оптического импульса в зависимости от номера секции N .

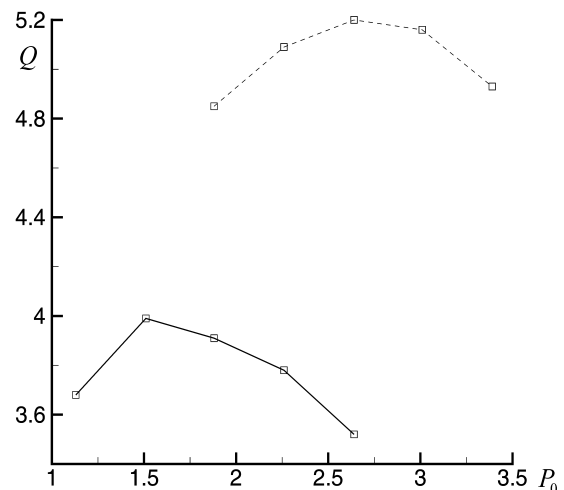


Рис. 4. Зависимость Q -фактора от входной мощности сигнала: сплошная линия — $\langle D \rangle = 0$, штрихпунктирная — $\langle D \rangle = -0.65$ пс/нм/км.

межсимвольного взаимодействия.

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, но при этом усиливается паразитная роль нелинейных эффектов, которые ведут к деградации сигнала. Поэтому имеется такое значение пиковой мощности входных импульсов с фиксированной шириной, которое обеспечивает наилучший баланс между эффектами шума и нелинейностью с точки зрения величины Q -фактора. Поскольку режимы с относительно большой величиной нормальной средней дисперсии допускают квазиустойчивый нелинейный режим распространения без значительного “расплывания” оптических импульсов, в таких режимах уменьшается взаимодействие соседних битов. Данное обстоятельство позволяет при выбранной ширине импульса использовать более мощные входные сигналы, что в свою очередь улучшает отношение сигнал/шум без существенного ухудшения качества сигнала из-за нелинейности.

На рис. 4 приведена зависимость Q -фактора в худшем из каналов от пиковой мощности входного импульса при средних дисперсиях $\langle D \rangle = 0$ и $\langle D \rangle = -0.65$ пс/нм/км. Оптимальное значение пиковой мощности входного сигнала при $\langle D \rangle = -0.65$ пс/нм/км больше, чем при нулевой дисперсии, однако уменьшение отрицательной роли нелинейных эффектов в этом случае приводит к уменьшению коэффициента ошибки (увеличению Q -фактора).

Необходимо подчеркнуть, что найденный нелинейный режим со скользящей точкой нулевого chirpa не зависит от конкретной конфигурации линии и может быть реализован для различных систем. Подобные результаты получены для второй конфигурации оптической линии связи. Эволюция ширины импульса для случаев, когда волоконный рамановский усилитель компенсирует 1 и 10 дБ затухания сигнала для различных средних

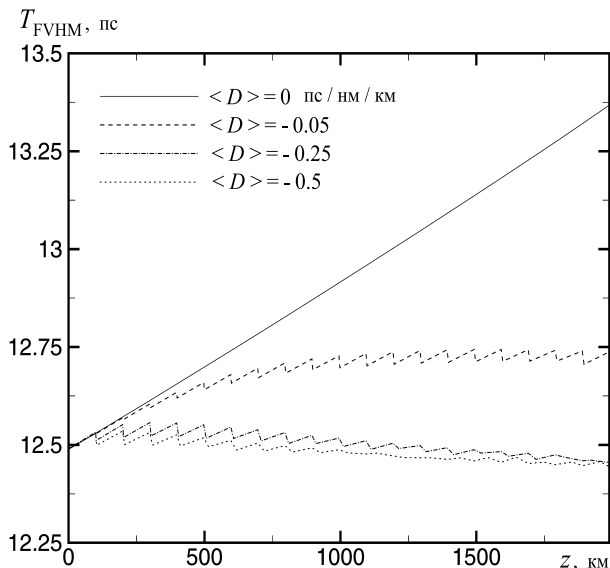


Рис. 5. Зависимость длительности импульса T_{FWHM} от дистанции распространения z для коэффициента рамановского усиления 1 дБ в гибридной схеме усиления Б.

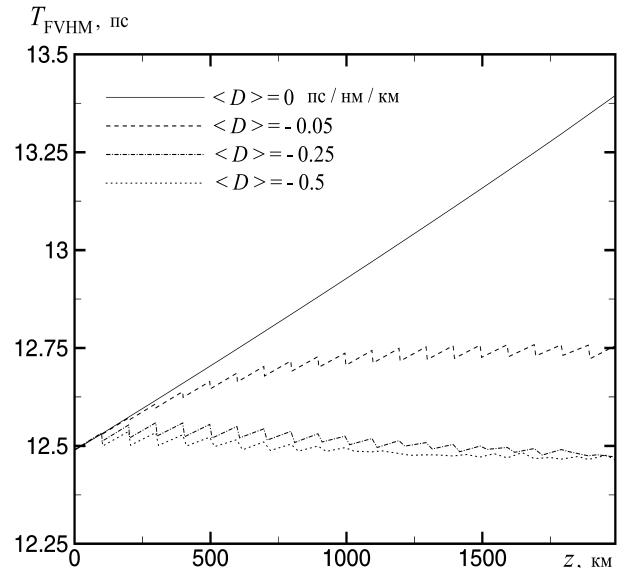


Рис. 6. Зависимость длительности импульса T_{FWHM} от дистанции распространения z для коэффициента рамановского усиления 10 дБ в гибридной схеме усиления Б.

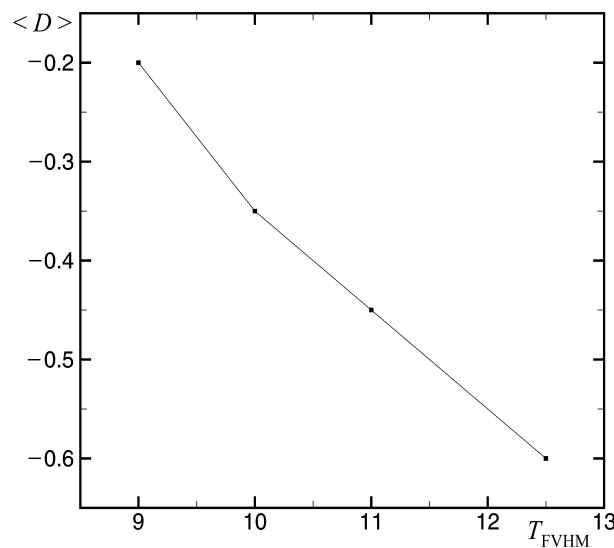


Рис. 7. Конфигурация А. Величина средней дисперсии линии в зависимости от начальной длительности входных сигналов при средней мощности $P_{\text{ave}} = -1.5$ дБм.

дисперсий линии показана на рис. 5 и 6 соответственно. Как можно видеть, тип усиления фактически не влияет на установление квазиустойчивого нелинейного режима, хотя, как показывают расчеты, оптимальная пиковая мощность сигнала зависит от типа усиления. Минимальная величина нормальной средней дисперсии, которая приводит к стабилизации ширины импульса, показана на рис. 7. Можно видеть, что более широкие импульсы требуют большей величины нормальной средней дисперсии для стабилизации уширения.

Заключение

Методами математического моделирования исследованы нелинейные режимы распространения оптических импульсов в режиме передачи данных 40 Гбит/с с длительностью оптического импульса, составляющей 50% битового интервала, и скользящей (с дистанцией распространения) точкой нулевого чирпа. Квазиустойчивое распространение таких импульсов возможно в режиме большой нормальной средней дисперсии и разбалансировки оптического усиления. Достигнутая в нелинейных режимах передачи информации величина $Q \geq 4$ позволяет применять для таких линий теоретико-информационные методы коррекции ошибок (Forward Error Correction (FEC)).

Список литературы

- [1] AGRAWAL G.P. Nonlinear Fiber Optics. N.Y.: Acad. Press, 2001.
- [2] GORDON J.P., HAUS H.A. Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission // Opt. Lett. 1986. Vol. 11. P. 665–667.
- [3] PARK S.-G., GNAUCK A.H., WIESENFELD J.M., GARRETT L.D. 40-Gb/s transmission over multiple 120-km spans of conventional single-mode fiber using highly dispersed pulses // IEEE Photon. Technol. Lett. 2000. Vol. 12. P. 1085–1087.

- [4] GNAUCK A.H., PARK S.-G., WIESENFELD J.M., GARRETT L.D. Highly dispersed pulses for 2×40 Gbit/s transmission over 800 km of conventional singlemode fibre // Electron. Lett. 1999. Vol. 35. P. 2218–2219.
- [5] AGRAWAL G.P. Fiber-Optic Communication Systems. Second edition. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [6] GROVER W.D. Forward error correction in dispersion-limited lightwave systems // J. Lightwave Technol. 1988. Vol. 6. P. 643.
- [7] SHAPIRO E.G., FEDORUK M.P., TURITSYN S.K. Numerical estimate of BER in optical systems with strong patterning effects // Electron. Lett. 2001. Vol. 37, N. 19.
- [8] FISHER R.A., BISHEL W.K. Pulse compression for more efficient operation of solid-state laser amplifier chains // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 24. P. 468.
- [9] 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. Vol. 4. P. 145–161.

Поступила в редакцию 27 октября 2004 г.