

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Шестопапов В. П., Литвиненко Л. Н., Масалов С. А., Сологуб В. Г. Дифракция волн на решетках. Харьков, 1973. [2] Люисселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике. М., 1963. [3] Шестопапов В. П. Дифракционная электроника. Харьков, 1976. [4] Тараненко З. И., Трохименко Я. К. Замедляющие системы. Киев, 1965.

Поступила в редакцию  
14.11.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 5

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.378.325

### ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

А. В. Иванов, А. Н. Матвеев

(кафедра общей физики для физического факультета)

Аналитически и численно исследуется динамика распространения огибающей оптического импульса пикосекундной длительности в волоконном световоде. На основе метода обратной задачи рассмотрено влияние фазового шума на параметры солитонов в дальней зоне световода. Анализируются статистические характеристики ансамбля солитонов.

Динамика распространения огибающей оптического импульса пикосекундной длительности в волоконном световоде описывается задачей Коши для нелинейного уравнения Шрёдингера:

$$iq_z = q_{\tau\tau}/2 + |q|^2 q, \quad q(\tau, 0) = q_0(\tau). \quad (1)$$

Здесь  $z = L/L_d$ ,  $\tau = (t - v_g^{-1}L)/\tau_n$ ,  $q = (L_d/L_{nl})^{1/2} \cdot [A(\tau, z)/I_0^{1/2}]$  — безразмерные переменные,  $v_g = (k'_\omega)^{-1}$  — групповая скорость,  $\tau_n$  — длительность импульса,  $I_0$  — эффективная интенсивность,  $A(\tau, z)$  — медленно меняющаяся огибающая импульса, а  $L_d = \tau_n/k''_{\omega_2}$ ,  $L_{nl} = (k\tilde{n}_2 I_0)^{-1}$  — соответственно дисперсионная и нелинейная длины.

Известно, что на расстояниях порядка нескольких дисперсионных длин (что составляет для рассматриваемого диапазона длительностей величину от нескольких десятков сантиметров до десятков метров [1]) исходный сигнал асимптотически стремится к состоянию, характерному для дискретного солитонного спектра [2]. Представляет интерес, таким образом, исследование параметров солитонных составляющих исходного импульса в дальней зоне световода ( $z \gg 1$ ). Ограничимся рассмотрением класса начальных данных, для которых асимптотика решения (1) представляет собой односолитонный импульс:

$$q^s(\tau, z) = \kappa \exp(-i\upsilon\tau - i(v^2 - \kappa^2)z/2 + i\phi) \operatorname{ch}^{-1}\kappa(\tau - \tau_c - \upsilon z), \quad (2)$$

$\kappa$ ,  $\upsilon$ ,  $\phi$ ,  $\tau_c$  — формфактор, скорость, фаза и координата центра солитона соответственно. Для анализа асимптотической стабилизации наиболее эффективным оказывается использование известного метода обратной задачи рассеяния (МОЗР) [2, 3], основанного на особой симметрии уравнения (1).

Важным частным случаем начальных условий является сигнал, испытывавший случайную фазовую модуляцию вида [4–6]

$$q_0(\tau) = \operatorname{ch}^{-1}\tau \cdot \exp(i\theta(\tau)), \quad (3)$$

где  $\theta(\tau)$  — случайный процесс (в дальнейшем будем называть его шумом) с временем корреляции  $\tau_n$ .

В настоящей работе предлагается основанный на МОЗР метод расчета параметров солитонов дальней зоны для фазово-модулированных импульсов типа (3). Численные расчеты сравниваются с аналитическими результатами, полученными на основе первого порядка теории возмущений МОЗР.

Согласно МОЗР с решением  $q$  уравнения (1) связывается пара комплекснозначных функций: коэффициентов прохождения  $a(\lambda)$  и отражения  $b(\lambda)$  ассоциированной линейной задачи [2]. Параметры солитона (2) определяются значением нуля  $a(\lambda)$  в верхней полуплоскости:  $\lambda_1 = \xi + i\eta$ ,  $\eta > 0$ , причем  $\kappa = 2\eta$ ,  $\nu = 2\xi$ ,  $\varphi = \arg(-ib_1)$ ,  $\tau_c = (2\eta)^{-1} \ln |-ib_1|$ , где  $b_1 = b(\lambda_1, z=0)$ .

Рассмотрим влияние на параметры солитонов случайной составляющей исходных импульсов (3). Наибольший практический интерес представляет, очевидно, случай малых флуктуаций, что дает возможность воспользоваться методикой, предложенной в работе [7]. Для флуктуаций начальных данных вида (3) справедливо

$$\begin{aligned} \delta\lambda_1 &= \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \cdot \text{ch}^{-3} \tau [\text{ch}(\tau - i\theta(\tau)) - \text{ch} \tau], \\ \delta\tau_c &= \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \cdot \tau \text{ch}^{-2} \tau (\cos \theta(\tau) - 1), \\ \delta\varphi &= \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \cdot \text{ch}^{-2} \tau (1 - \tau \text{th} \tau) \sin \theta(\tau). \end{aligned} \quad (4)$$

Если время корреляции много больше длительности импульса (что выполняется, например, при диффузионном дрейфе фазы [8]), то случайную функцию  $\theta(\tau)$  можно разложить в ряд по степеням  $(\tau/\tau_K)$ :  $\theta(\tau) = \theta_0 + \theta_1 \tau/\tau_K + (1/2)\theta_2 (\tau/\tau_K)^2 + O(\tau/\tau_K)^3$ . Фаза  $\theta_0$  и сдвиг частоты  $\omega = \theta_1/\tau_K$  вследствие калибровочной инвариантности приводят к сдвигу фазы и скорости солитона [3].

Под влиянием фазовой модуляции

$$\tilde{\theta}(\tau) = \frac{1}{2} \theta_2 (\tau/\tau_K)^2 = \frac{1}{2} \omega' r^2 \quad (5)$$

у импульса появляется отличная от нуля несолитонная составляющая. Это приводит к изменению формфактора солитона  $\kappa$  и его фазы  $\varphi$ . На скорость и положение цен-

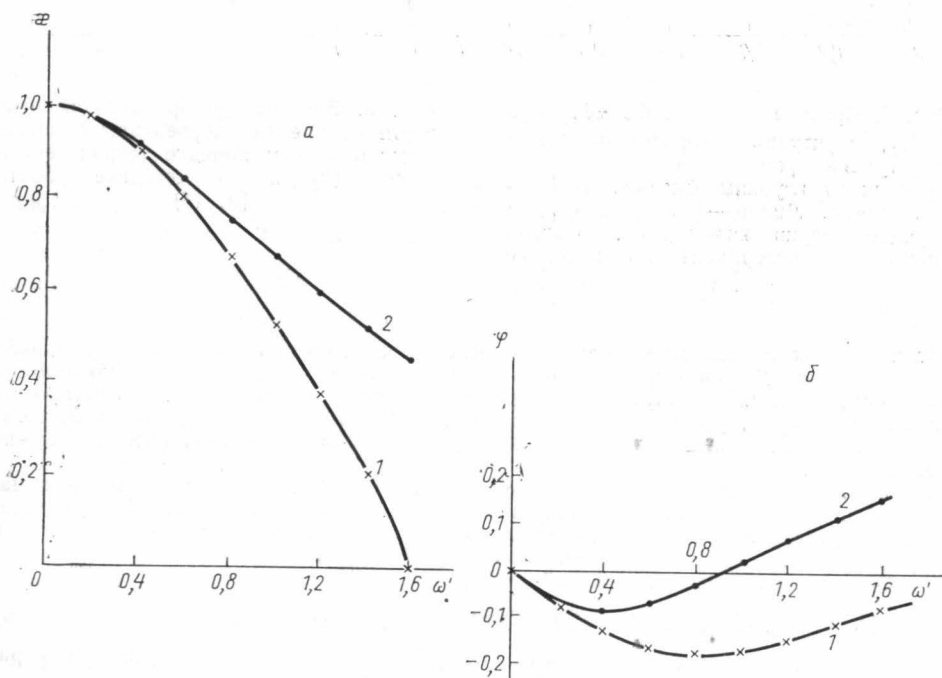


Рис. 1. Зависимости  $\kappa(\omega')$  (а) и  $\varphi(\omega')$  (б): 1 — по методике [9], 2 — в первом порядке теории возмущений

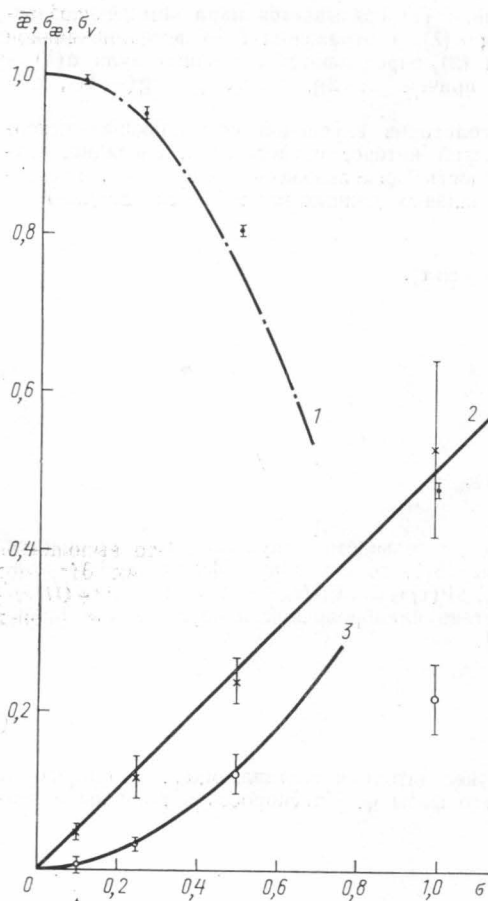


Рис. 2. Средние значения формфактора  $\bar{\kappa}$  (1), флуктуации скорости  $\sigma_v$  (2) и флуктуации формфактора  $\sigma_k$  (3) как функции от глубины фазовой модуляции шума. Линии — расчет в первом порядке теории возмущений, точки — численный эксперимент по методике [9].

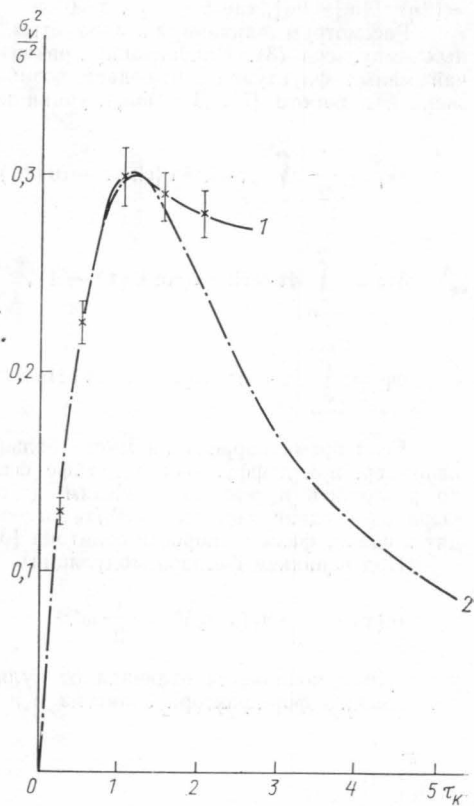


Рис. 3. Зависимость флуктуаций скорости от времени корреляции фазового шума в первом порядке теории возмущений (2) и по методике работы [9] (1).

тра коэффициент фазовой модуляции  $\omega'$  вследствие симметрии влияния не оказывает. Значения сдвигов формфактора и фазы солитона, испытавшего фазовую модуляцию  $\omega'$ , могут быть получены из формул (4) или по методике [9]. Сравнительные зависимости  $\kappa(\omega')$ ,  $\varphi(\omega')$  приводятся на рис. 1. Точками нанесены результаты, полученные с использованием первого порядка теории возмущений (4), крестиками — по методике [9].

В то время как в методе возмущений существенно используются условия малости  $\sigma$  и больших значений  $\tau_k$ , алгоритм работы [9] свободен от подобных ограничений, но требует больших вычислительных затрат. Использование обоих подходов позволяет оценить пределы применимости метода возмущений.

Окончательно можно записать

$$q(\tau, z) = \kappa(\omega') \exp(i(\theta_0 + \varphi(\omega'))) - i\omega\tau - i\omega^2 z/2) \operatorname{ch}^{-1}(\tau - \omega z). \quad (6)$$

Отметим, что зависимость  $\kappa(\omega')$  согласуется с результатом, полученным в работе [10].

Большой практический интерес представляет также исследование функций распределения и их моментов в случае, если ансамбль солитонов промодулирован сла-

бым (не разрушающим солитонного состояния) шумом, имеющим заданную корреляционную функцию. Анализ подобных режимов представляет интерес при формулировании требований, предъявляемых к источникам сигналов при создании солитонных информационных систем, и может дать такую технически важную характеристику, как вероятность пропуска сигнала при различных уровнях шума.

Авторами был поставлен численный эксперимент по исследованию влияния глубины и спектра фазовой модуляции на функции распределения формфакторов и скоростей образовавшихся солитонов.

На рис. 2 представлены аналитические и экспериментальные зависимости средних значений и дисперсий формфакторов и скоростей солитонов от глубины фазовой модуляции шума, имеющего гауссову функцию распределения и гауссову корреляционную функцию. Видно, что при малых  $\sigma$  первый порядок возмущений МОЗР хорошо описывает зависимость флуктуаций и скорости от параметров шума.

Полученные по методике работы [9] функции  $\bar{\kappa}(\sigma)$ ,  $\sigma_{\kappa}(\sigma)$  имеют квадратичный характер ( $\bar{\kappa} \simeq 1 - \sigma^2$ ,  $\sigma_{\kappa} \sim \sigma^2$ ),  $\sigma_{\nu}$  растет линейно с ростом  $\sigma$ . Это приводит к тому, что даже при больших  $\sigma$  статистика флуктуаций скорости остается гауссовой.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость дисперсии скорости солитона от времени корреляции шумовой компоненты. Отметим характерный максимум  $\sigma_{\nu}^2$  при  $\tau_{\kappa} \sim 1$ , свидетельствующий о наиболее интенсивном взаимодействии регулярной и случайной составляющих при временах корреляции, сравнимых с длительностью солитона.

Видно также, что метод возмущений хорошо согласуется с методом работы [9] при любых  $\tau_{\kappa}$ .

Отметим в заключение, что предложенные методики дополняют появившиеся в последнее время работы по изучению формы и корреляционной функции импульса типа «шумовой вспышки» на расстояниях, не превышающих длины дисперсионного расплывания (в ближней зоне световода) [11], а также работы, изучающие аналогичные задачи самовоздействия световых пучков в нелинейной фокусирующей среде [12].

Авторы выражают глубокую благодарность В. А. Выслоуху и И. В. Череднику за помощь и обсуждение результатов работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Mollenauer L. F. et al. // Phys. Rev. Lett. 1980. 45. P. 1095—1098.
- [2] Захаров В. Е., Манаков С. В., Новиков С. П., Питаевский Л. П. Теория солитонов. М., 1980. [3] Satsuma J., Yajima N. // Suppl. Progr. Theor. Phys. 1974. N 55. P. 284—306. [4] Lewis Z. V. // Phys. Lett. 1985. A112, N 3. P. 99—103. [5] Elgin J. N. // Phys. Lett. 1985. A110, N 9. P. 441—448. [6] Blow K. J., Wood D. N. // Opt. Comm. 1986. 58, N 5. P. 349—354. [7] Выслоух В. А., Чередник И. В. // ТМФ. 1986. 68, № 1. С. 143—147. [8] Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику. М., 1981. [9] Выслоух В. А., Чередник И. В. // ДАН. 1986, 289, № 2. С. 336—340. [10] Desem C., Chu P. L. // Opt. Lett. 1986. 11, N 4. P. 248—250. [11] Фаттахов А. М., Чиркин А. С. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1985. 49, № 3. С. 553—560. [12] Алешкевич В. А., Лебедев С. С., Матвеев А. Н. // ЖЭТФ. 1982. 83, № 4(10). С. 1249—1253.

Поступила в редакцию  
05.12.86