

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ РАЗНЫХ ДЛИН ВОЛН

В.В. Афанасьев, Е.М. Дианов, В.Н. Серкин

В рамках модели векторного нелинейного уравнения Шредингера рассмотрены основные закономерности взаимодействия оптических солитонов разных длин волн. Показано, что при неупругом столкновении шредингеровских солитонов и их распаде формируются межволновые связанные состояния солитоноподобных импульсов в "прошедшей" и "отраженной" волнах.

Экспериментальная реализация солитонных режимов распространения лазерных импульсов в волоконных световодах /1/ выдвинула в число актуальных проблему разработки и создания принципиально новых систем оптической связи, основанных на применении нелинейных явлений в самой передающей среде — волоконном световоде. Лабораторные эксперименты /2/ убедительно продемонстрировали возможность создания нелинейных ("солитонных") волоконно-оптических линий связи и систем оптической памяти на солитонах в ближайшем будущем. Основой математического описания солитонов является модель нелинейного уравнения Шредингера. Принципиальная особенность шредингеровских солитонов состоит в их устойчивости относительно широкого класса возмущений и упругом взаимодействии при столкновении друг с другом /3/.

Целью данной работы является исследование взаимодействия оптических солитонов разных длин волн ("цветов"). Подобные задачи возникают, например, при спектральном уплотнении каналов, когда по одному и тому же световоду передается информация импульсами на различных длинах волн; при описании распространения двух поляризационных компонент одного импульса /4/, а также описании распространения солитонных импульсов в многомодовых световодах.

Взаимодействие оптических солитонов разных длин волн описываем в рамках модели векторного нелинейного уравнения Шредингера /5/ для огибающих волновых пакетов ψ_1 и ψ_2 :

$$2i \frac{\partial \psi_i}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial \tau^2} + R_{1i} |\psi_i|^2 \psi_i + R_{ij} |\psi_j|^2 \psi_i, \quad i, j = 1, 2, \quad i \neq j. \quad (1)$$

Система уравнений (1) записана в безразмерном виде /6/. Взаимодействие между волнами определяется эффектом фазовой кросс-модуляции.

Система (1) имеет точное солитонное решение, описывающее межволновое связанное состояние солитоноподобных импульсов. Такое решение для единичной матрицы R_{ij} впервые найдено в /5/. Обобщая на случай произвольных R_{ij} , выпишем решение, описывающее импульсы единичной амплитуды и длительности,

$$\begin{aligned} \psi_1(\tau, \xi) &= \operatorname{sech} \tau \exp[-i(R_{11} + R_{12} - 1)\xi/2], \\ \psi_2(\tau, \xi) &= \operatorname{sech} \tau \exp[-i(R_{22} + R_{21} - 1)\xi/2]. \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициенты нелинейности должны удовлетворять соотношениям $R_{11} + R_{12} = 2$, $R_{21} + R_{22} = 2$, физический смысл которых состоит в том, что сумма энергий импульсов равна энергии фундаментального солитона $\psi(\tau, \xi) = \operatorname{sech} \tau \exp(-i\xi/2)$.

Как показывают проведенные численные эксперименты, межволновые связанные состояния (2) устойчивы к шумовым возмущениям, искажениям формы импульсов на входе в волокно, небольшим флуктуациям интенсивности. Корректность вычислений контролировалась по интегралам сохранения. Коэффициенты нелинейности были выбраны $R_{11} = R_{22} = 2$, $R_{12} = R_{21} = 4$, что соответствует распространению односолитонного импульса по одномодовому волокну. Начальные условия задавались в виде $\psi_{1,2}(\tau, \xi) = \operatorname{sech}(\tau \pm \Delta) \exp(\pm i\nu\tau)$. Значения Δ выбирались в пределах 2 — 7, значения ν — в пределах 0 — 4.

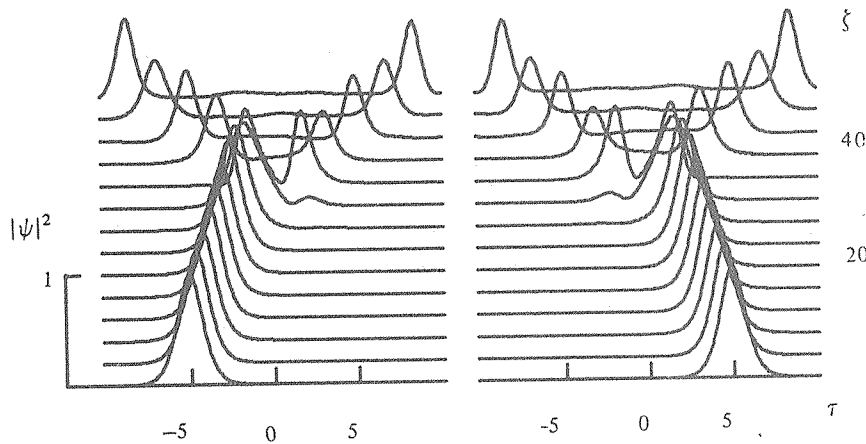


Рис. 1. Пример столкновения двух солитонов ($\nu = 0,1, \Delta = 5$): малая расстройка групповых скоростей, солитон распадается на отраженный и прошедший импульсы, по порядку равные между собой, образуется устойчивое связанное состояние прошедшего импульса одного "цвета" с отраженным импульсом другого "цвета". После столкновения изменяются групповые скорости импульсов.

Моделирование показало, что при большой расстройке групповых скоростей ($\nu > 2$) импульсы проходят друг сквозь друга практически без изменения формы. При $\nu < 1$ каждый из импульсов в результате взаимодействия распадается на два, которые можно условно назвать отраженным и прошедшим (рис. 1): отраженный импульс одного "цвета" совпадает по времени с прошедшим импульсом другого "цвета". Эти импульсы образуют межволновое связанное состояние, устойчивое на расстояниях не менее десяти дисперсионных длин. Кроме того, изменяются и групповые скорости импульсов — расстройка групповых скоростей между двумя связанными состояниями больше, чем между импульсами до взаимодействия. Зависимость доли энергии в прошедшем импульсе от ν показана на рис. 2.

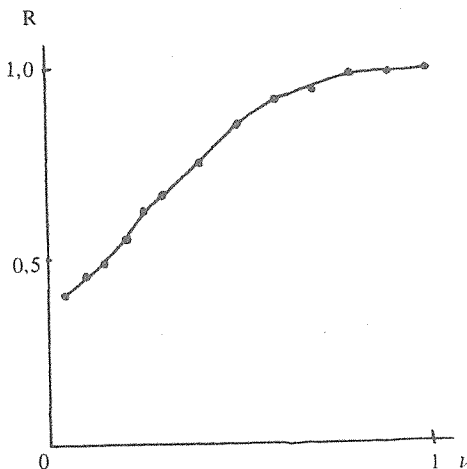


Рис. 2. Зависимость доли энергии в прошедшем импульсе (R) от расстройки групповых скоростей при $\Delta = 5$.

Проанализируем параметры образовавшихся связанных состояний. Решение ищем в виде импульса формы $A_1 \operatorname{sech}(\tau / \tau_1)$ с изменившейся после столкновения относительной групповой скоростью ν_2 . Анализ системы (1) с решением такого вида показывает, что при $R_{ij} \neq R_{ji}$ (где $i, j = 1, 2, i \neq j$) возможен только симметричный распад, т.е. распад на импульсы равной энергии. При этом их амплитуда A_1 составляет $A_1 = (R_{11} + R_{12}) / 8$, длительность $\tau_1 = 4 / (R_{11} + R_{12})$. Для выбранных значений R_{11} и R_{12} $A_1 = 3/4, \tau_1 = 2/3$. Для скорости после столкновения ν_1 из анализа закона сохранения гамильтониана может быть получена формула, связывающая ее со значением скорости до столкновения ν : $\nu_1 = [2\nu^2 + 1/3 - 2R_{11}/3 + (R_{11} + R_{12})^2 / 48]^{1/2}, \nu_1 = (2\nu^2 + 2/3)^{1/2}$ для $R_{11} = 2, R_{12} = 4$.

В численных экспериментах исследовано также взаимодействие импульсов с разными форм-факторами $\psi_i(\tau, \xi=0) = \kappa_i \operatorname{sech}(\kappa_i \tau)$, $i = 1, 2$, причем $\kappa_1 = 1,5$, $\kappa_2 = 0,75$. Численное моделирование показало, что в отличие от случая импульсов одинаковой длительности межволновые связанные состояния здесь не образуются. Для $\Delta = 7$ при $\nu \geq 0,35$ наблюдалось прохождение одного импульса сквозь другой без существенных изменений формы: при меньших ν импульс с $\kappa = 0,75$ разрушается (разбивается на несколько импульсов, энергия каждого из которых меньше солитонной), а импульс с $\kappa = 1,5$ изменяет скорость — отражается, замедляется или имеет после столкновения нулевую скорость (рис. 3).

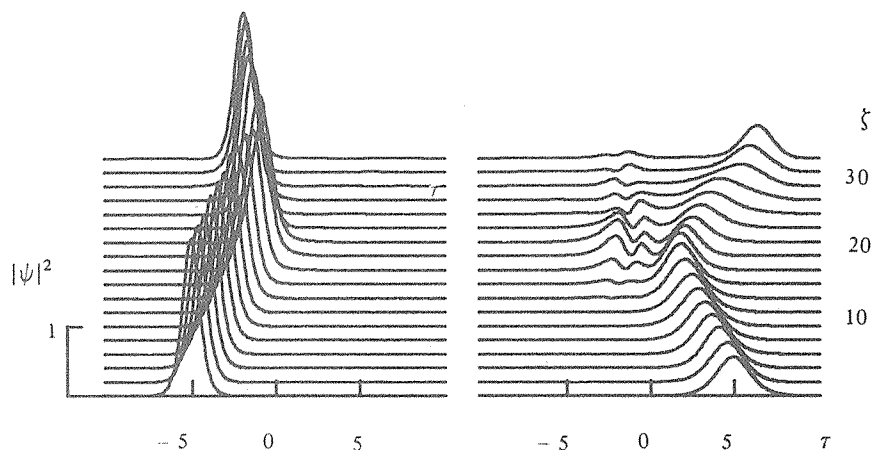


Рис. 3. Столкновение солитонов с различными форм-факторами при $\kappa_1 = 0,75$, $\kappa_2 = 1,5$, $\Delta = 5$, $\nu = 0,2$. Один из импульсов разрушается, другой изменяет групповую скорость.

Рассмотренные эффекты могут быть использованы в "чисто оптических" системах обработки и передачи информации. Наличие расстройки групповых скоростей (разницы "цветов"), при которой столкновения солитонов разных длин волн носят упругий характер, позволяет реализовать режим спектрального уплотнения и "солитонных" каналов. Благодаря неупругому характеру взаимодействия при столкновении одно и многосолитонных импульсов возможно формировать солитоны с управляемыми параметрами. Неупругий характер взаимодействия позволяет создать коммутирующие устройства, действие которых основано на нелинейном делении одного солитона в одной волне на два в связанных волокнах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mollenauer L. F. et al. Phys. Rev. Lett., 45, 1095 (1980).
2. Mollenauer L. F., Smith K. Opt. Lett., 13, 675 (1988).
3. Захаров В. Е., Шабат А. Б. ЖЭТФ, 61, 118 (1971).
4. Menyuk C. R. Opt. Lett., 12, 614 (1987).
5. Манакон С. В. ЖЭТФ, 65, 505 (1973).
6. Афанасьев В. В. и др. Письма в ЖЭТФ, 48, 588 (1988).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 30 июня 1989 г.