

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ ПО ПРОТЯЖЕННОМУ СВЕТОВОДУ ПИКОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С СОЛИТОННЫМ ЦЕНТРОМ

А.С.Шербаков, Е.И.Андреева, И.С.Тарасов

Одной из весьма актуальных проблем в области создания волоконно-оптических линий связи является задача высокоскоростной передачи цифровой информации на дальние расстояния при максимальной длине регенерационного участка. В качестве возможного подхода здесь можно указать на использование сверхкоротких оптических импульсов с солитонным центром [1], по-видимому, способных распространяться по одномодовому волоконному световоду на расстояния свыше 200 км. При этом решение указанной задачи требует оптимального выбора параметров как самой линии передачи, так и оптических символьных импульсов. С этой целью в данной работе излагаются основы методики экспериментального моделирования процесса распространения пикосекундных импульсов с солитонным центром через протяженный одномодовый волоконный световод, а также результаты экспериментов по передаче такими импульсами многоразрядных двоичных цифровых сигналов.

Оптические импульсы с солитонным центром формируются в волоконном световоде при таком соотношении характеристик импульсов и световода, что безразмерный параметр $\Gamma = \gamma Z$ (где γ — потери в волокне, а Z — дисперсионная длина) удовлетворяет условию $\Gamma > [1]$. Для формирования импульса с солитонным центром необходима также начальная перекомпенсация дисперсионного распывания, что достижимо при превышении начальной амплитуды импульса амплитуды фундаментального солитона в световоде без потерь. Величина относительного превышения a_0 начальной амплитуды фундаментального солитона зависит от требуемой длины распространения z_0 импульса с солитонным центром, так что, согласно [1],

$$a_0 = \left[\frac{2\gamma z_0}{1 - \exp(-2\gamma z_0)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Решение учитывающего потери кубического уравнения Шредингера в виде импульса с солитонным центром может быть получено лишь для $z_a \geq Z$. В предельном случае $z_a = Z$ начальная энергия импульса должна быть равной

$$E = a_0^2 E_S = 4\tau\gamma\sigma^{-1} [1 - \exp(-2\Gamma)]^{-1}, \quad (2)$$

где E_S — начальная энергия фундаментального солитона в световоде без потерь, τ — длительность импульса, σ — нелинейный коэффициент Керра. Поскольку $Z \sim \tau^2 D^{-1}$ (где D — дисперсионный параметр), то, выбирая световод с малой дисперсией или увеличивая длительность символьного импульса, можно реализовать передачу цифровой информации импульсами с солитонным центром на большие расстояния без регенерации. При условии регистрации сигналов на выходе линии передачи с заданной вероятностью ошибки энергия символьного импульса не должна быть меньше некоторого порогового значения E_0 . С учетом потерь в световоде длиной $Z_a = Z$ пороговое значение энергии детектирования импульса, пересчитанное на вход линии передачи, составит величину $\bar{E} = E_0 \exp(2\Gamma)$. Условия $E > \bar{E}$ и $\Gamma \geq 1$ совместно определяют допустимые значения параметров линии связи и символьного импульса, при которых возможна передача цифровой информации с заданной вероятностью ошибки на расстояние $z_a = Z$ импульсами с солитонным центром. При этих условиях возможно масштабирование процесса распространения таких импульсов, в основе которого лежит степенной характер зависимостей всех параметров задачи друг от друга. Лишь при масштабировании параметра Γ пространственная динамика эволюции импульса в интервале $[0, Z]$ несколько изменяется. Анализ результатов работ [1,2] показывает, что с увеличением Γ , при начальной энергии, определяемой (1) и (2), скорость самосжатия импульса на начальном участке возрастает, так что состояние с минимальной длительностью достигается на более ранней стадии распространения, а степень сжатия увеличивается. Однако, если детали эволюции символьного импульса на интервале $[0, Z]$ не являются существенными, а наибольший интерес представляет лишь факт регистрации определенного количества фотонов на выходе линии передачи за время, равное начальной длительности импульса, то можно провести масштабирование и по параметру Γ . Таким образом, связь двух систем параметров: до и после масштабирования (индексы 1 и 2) осуществляется с помощью соответствующих коэффициентов пересчета: $k_\tau = \tau_2 \tau_1^{-1}$, $k_D = D_2 D_1^{-1}$, $K_\lambda = \lambda_2 \lambda_1^{-1}$, $k_\gamma = \gamma_2 \gamma_1^{-1}$, а масштабирование проводится с помощью следующих соотношений

$$Z_2 = k_\tau^2 k_D^{-1} k_\lambda^{-2} Z_1, \quad \Gamma_2 = k_\gamma k_\tau^2 k_D^{-1} k_\lambda^{-2} \Gamma_1,$$

Вариант	Z , км	λ , мкм	D , пс/нм км	γ , км	τ , пс	Γ
A	11	1.32	2	0.115	4.4	1.3
B	56	1.55	2	0.023	12	1.3
C	250	1.55	2	0.023	25	5.6

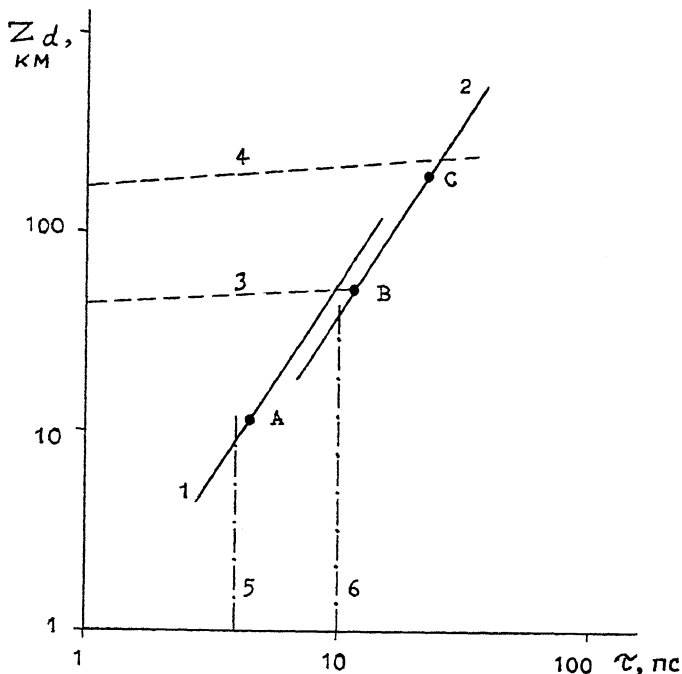


Рис. 1. К определению допустимой протяженности линии передачи Z сигналов оптических импульсов с солитонным центром с длительностью τ по световоду с дисперсией — 2 пс/нм км: 1 — $\lambda = 1.32$ мкм, 2 — $\lambda = 1.55$ мкм. Указаны ограничения как по энергии импульса значением $E = \tilde{E}$ (3 — $\gamma = 0.115$ км $^{-1}$, 4 — $\gamma = 0.023$ км $^{-1}$), так и по параметру Γ по уровню $\Gamma = 1$ (5 — $\lambda = 1.32$ мкм, $\gamma = 0.115$ км $^{-1}$, 6 — $\lambda = 1.55$ мкм, $\gamma = 0.023$ км $^{-1}$).

$$E_2 = k_\gamma k_\tau E_1, \quad \tilde{E}_2 = \tilde{E}_1 [2\Gamma_1 (k_\gamma k_\tau^2 k_D^{-1} k_\lambda^{-2} - 1)].$$

При выполнении условий $\Gamma_i > 1$ и $E_i > \tilde{E}_i$ с учетом сделанных оговорок обеспечивается физическая идентичность процессов в моделирующей и моделируемой системах. Это обстоятельство служит основой для разработки методики экспериментального моделирования процесса распространения сверхкоротких импульсов с солитонным центром на

дальние расстояния с помощью компактной лабораторной модели. Рис. 1 иллюстрирует возникновение ограничений протяженности линии передачи сигналов пикосекундными импульсами с солитонным центром при использовании световодов с параметрами, перечисленными в таблице. Вертикальные пунктирные линии на рис. 1 отражают условие $\Gamma > 1$ и определяют нижнюю границу длин световодов, а при фиксированных дисперсии и потерях в волокне — и нижнюю границу длительности символьных импульсов. При детектировании сигналов на выходе линии с вероятностью ошибки, например, 10^{-20} , получаем $E_0 = 6 \cdot 10^{-18}$ Дж на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм. Ограничения сверху при этом уровне E_0 показаны на рис. 1 *штрихпунктирными линиями*. Отрезки сплошных линий, заключенные в указанных границах, позволяют найти длину линии передачи при использовании в качестве носителей информации импульсов с солитонным центром. Точками *A*, *B* и *C* показаны совокупности параметров из таблицы. Так, например, при $D = 2$ пс/нм · км, $\gamma = 0.023$ км⁻¹ [0.2 дБ/км] и $\tau = 25$ пс протяженность линии связи достигает 250 км (точка *C*).

Для экспериментального исследования был создан лабораторный макет волоконно-оптической линии передачи цифровых сигналов, параметры которого соответствовали варианту *A* в таблице. Для увеличения возможной длины распространения импульсов следует выбирать волокно с малой дисперсией, у которого величина Z максимальна. Поэтому в вариантах *B* и *C* в таблице величина дисперсии модулируемых линий выбрана такой же, как и в модельном эксперименте на длине волны 1.32 мкм. Использованный образец одномодового световода имел точку нулевой дисперсии 2-го порядка на $\lambda_0 = 1.288$ мкм, что с учетом известных из [3] ограничений на величину $(\lambda - \lambda_0)$ обеспечивало корректность эксперимента с солитонными импульсами вблизи точки λ_0 .

Для формирования многоуровневых двоичных последовательностей солитонообразующих импульсов использовался электронно-перестраиваемый генератор пикосекундных цифровых оптических сигналов на основе полупроводникового лазера [4]. Выходные импульсы генератора, как показано в [5], близки к спектрально ограниченному и быстро формируют в волокне солитонные импульсы с *sech*-образной огибающей. Перестройка длительности и мощности (энергии) генерируемых импульсов позволяла варьировать параметры импульсов, распространяющихся в образце световода, с целью формирования импульсов с солитонным центром. В эксперименте была подобрана совокупность параметров входных импульсов $\tau = 4.4$ пс (по уровню 0.65 от

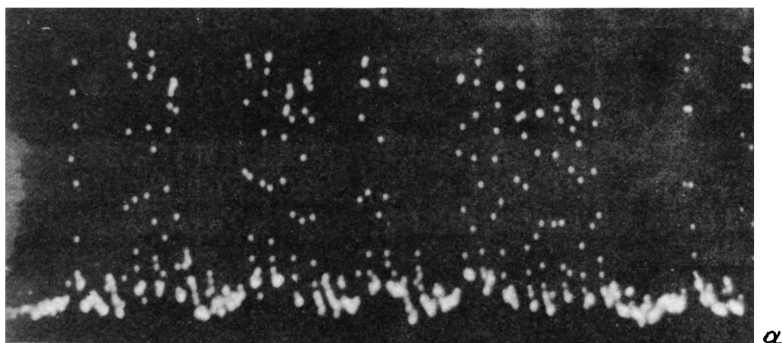


Рис. 2. Двоичная 32-разрядная цифровая последовательность, образована пикосекундными оптическими импульсами на входе (а) и на выходе (б) линии передачи.

максимальной интенсивности), $E = 1.1$ пДж (пиковая мощность равна 100 мВт), так что $E_s = 0.35$ пДж и $a_0 = 1.8$, при которой на выходе световода наблюдались импульсы с энергией 0.1 пДж и длительностью, равной исходной. Последнее является характерным для нелинейного режима распространения импульсов с солитонным центром в волокне при таком сочетании параметров эксперимента, когда фундаментальный солитон уже не может существовать [2]. На рис. 2 представлена 32-разрядная цифровая последовательность импульсов с солитонным центром на входе и выходе лабораторного макета линии передачи соответственно. Вертикальный масштаб на рис. 2, а в пять раз крупнее, чем на рис. 2, б, что отражает ослабление сигнала на 11 дБ при распространении в макете линии передачи. Амплитудная неравномерность импульсов на осциллограммах связана как с некоторыми особенностями функционирования генератора цифрового сигнала, так и с небольшим чи-

слом стробоскопических отсчетов на каждый символьный импульс при достигнутом в эксперименте временном разрешении при регистрации всей последовательности как целого около 300 пс. Изложенный выше метод моделирования позволяет аппроксимировать полученные при работе с макетом данные на равнозначные моделируемые линии передачи, например соответствующие вариантам *B* и *C* в таблице, и тем самым оптимизировать выбор параметров как линии передачи, так и символьных импульсов при длине регенерационного участка до 250 км.

Таким образом, разработана методика экспериментального моделирования процесса распространения пикосекундных оптических импульсов с солитонным центром на расстояния вплоть до предельно допустимых в данном режиме на компактном лабораторном макете. Предлагаемая методика при условии выполнения найденных соотношений между параметрами световода и символьных импульсов дает возможность на одном стенде исследовать различные варианты построения волоконно-оптической линии передачи цифровой информации пикосекундными импульсами с солитонным центром. Экспериментально реализована передача генерируемых полупроводниковым источником 32-разрядных двоичных сигналов оптическими импульсами с солитонным центром через протяженный одномодовый волоконный световод.

Список литературы

- [1] Hasegawa A., Kodama Y. // Opt. Lett. 1990. V. 15. N 24. P. 1443-1445.
- [2] Kubota H., Nakazawa M. // IEEE J. of Quantum Electron. 1990. V. 26. N 4. P. 692-700.
- [3] Wai P.K.A., Menyuk C.R., Lee Y.C., Chen H.H. // Opt. Lett. 1986. V. 11. N 7. P. 464-466.
- [4] Андреева Е.И., Шербаков А.С., Беришев И.Э., Ильин Ю.В., Тарасов И.С. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 17. С. 17-21.
- [5] Shcherbakov A., Andreeva E. // Proc. SPIE. 1993. V. 2097. P.

Санкт-Петербургский государственный
технический университет

Поступило в Редакцию
14 июля 1994 г.