

# Солитонные линии связи на основе спектрально-эффективных форматов модуляции

О.В.Юшко, А.А.Редюк

*Представлены результаты математического моделирования распространения оптических сигналов по солитонным волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) на основе спектрально-эффективных форматов модуляции сигнала. Исследовано влияние шумов спонтанной эмиссии, нелинейных искажений и протяжённости ВОЛС на качество передачи информации. Проведено сравнение характеристик принятого оптического сигнала для солитонных и традиционных ВОЛС с компенсацией дисперсии. Показано, что солитонные ВОЛС магистральной протяжённости при существенном влиянии нелинейности обеспечивают более высокое качество передачи данных, а также позволяют использовать форматы модуляции более высокого порядка по сравнению с традиционными линиями связи. В контексте когерентной передачи данных солитонные ВОЛС позволяют использовать фазовую модуляцию с большим количеством уровней, повышая тем самым спектральную эффективность линии связи.*

**Ключевые слова:** солитонные линии связи, когерентное детектирование, многоуровневые форматы модуляции, математическое моделирование.

## 1. Введение

В настоящее время основными задачами в развитии волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) являются увеличение пропускной способности и увеличение дальности передачи данных [1]. Абсолютное большинство современных ВОЛС устроено таким образом, что результат влияния линейных и нелинейных эффектов со стороны волоконного световода на оптический сигнал компенсируется или по мере его распространения по линии, или после его детектирования на приёмнике. Если для компенсации оптических потерь и дисперсионного воздействия уже существует ряд широко используемых практических методов (эрбиевые усилители и волоконный компенсатор дисперсии), то для компенсации или подавления нелинейных эффектов таких универсальных методов нет, и соответствующие технологии находятся в стадии активного исследования [2–6].

Влияние нелинейных искажений сигнала на качество передачи информации становится существенным при росте канальной скорости и уменьшении расстояния между соседними спектральными каналами и является основным ограничивающим фактором дальнейшего увеличения пропускной способности традиционных линий связи на основе простейших форматов модуляции сигнала. Под термином «традиционная линия связи» здесь и далее в тексте подразумевается линия связи с компенсацией дисперсионных эффектов, вне зависимости от формы огибающей сигнала.

**О.В.Юшко, А.А.Редюк.** Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: olesya.yushko@gmail.com, alexey.redyuk@gmail.com

Поступила в редакцию 15 января 2014 г., после доработки – 13 марта 2014 г.

Мощность оптического сигнала является одним из критических параметров при определении допустимой протяжённости линии связи. При небольшой мощности сигнала нелинейность вносит малый вклад в его искажение, однако накапливающийся по мере распространения шум от усилителей способен существенно исказить сигнал. С другой стороны, при большой мощности сигнала нелинейные эффекты становятся основной причиной его искажения. Мощность сигнала связана с одним из важнейших параметров ВОЛС – отношением сигнал/шум (SNR). Возможность работы ВОЛС в области высоких значений SNR способствует улучшению качества декодирования сигнала, а также позволяет передавать информацию на большие расстояния. Кроме того, из теории Шеннона для квазилинейной передачи сигнала известно, что именно в области высоких значений SNR возможен дальнейший рост спектральной эффективности ВОЛС. Современные линии связи, обеспечивающие высокую (40–100 Гбит/с) канальную скорость передачи данных, тем не менее, работают в области  $SNR < 30$  дБ [7–9] или же на небольших расстояниях [10]. Одной из задач настоящего исследования является изучение ВОЛС, работающих в области высоких SNR, с большими мощностями сигнала, т. е. с большим влиянием нелинейности, а также для больших расстояний распространения. В данном контексте невозможно представить нелинейный эффект Керра в виде нелинейного шума [7]. Таким образом, мы рассматриваем ВОЛС с меньшей канальной скоростью (до 10 Гбит/с), однако с большим влиянием нелинейных эффектов на передаваемый сигнал. Такие линии связи характерны для магистральной передачи данных на большие расстояния.

Одним из способов увеличить протяжённость линии связи, сохранив высокую спектральную эффективность передачи данных, является использование солитонных ВОЛС. Особая форма солитонного импульса поддерживает непрерывный баланс эффектов дисперсии и нелинейности. Вследствие их взаимной компенсации солитон сохраняет форму сигнала по мере распространения по во-

локну. Известно, что при фиксированной канальной скорости наибольшей спектральной эффективностью будет обладать ВОЛС с сигналом, имеющим форму импульсов Найквиста [11], поскольку именно эта форма обеспечивает плотную упаковку частотных каналов. Однако компенсация влияния нелинейных эффектов на форму солитонов при их распространении на большие расстояния позволит сохранить высокое значение такого показателя, как произведение спектральной эффективности на дальность передачи. Этот факт даёт солитонным линиям связи большое преимущество перед традиционными линиями связи при передаче информации и стимулирует дальнейшие исследования свойств солитонов [1, 12].

Мы предлагаем рассмотреть солитонные ВОЛС в новом контексте когерентной передачи информации – когда оптическая фаза используется для кодирования информации. Так, использование для кодирования  $M$  различных фаз солитонного импульса увеличивает битовую скорость в  $\log_2 M$  раз по сравнению со стандартным форматом ООК (On-Off Keying), что позволяет увеличить скорость передачи информации при той же величине битового интервала. Такой подход является альтернативой стандартному квазилинейному подходу к передаче данных, при котором нелинейность и дисперсия компенсируются раздельно. Использование многоуровневых форматов модуляции совместно с солитонной передачей данных позволит преодолеть современные нелинейные ограничения спектральной эффективности традиционных ВОЛС [11, 13]. Поэтому исследование передачи информации по ВОЛС с помощью последовательности солитонов и с применением спектрально-эффективных форматов модуляции является актуальным и требует применения методов математического моделирования.

Настоящая работа посвящена математическому моделированию передачи оптических импульсов по ВОЛС на основе спектрально-эффективных форматов модуляции сигнала. Представлена модель линии связи с распределённым ВКР-усилением, основанная на обобщённом нелинейном уравнении Шрёдингера. Выполнены численные расчёты по распространению оптического сигнала на расстояния до 5000 км как для традиционных, так и для солитонных ВОЛС. Проведено сравнение и анализ полученных результатов.

Целью работы является демонстрация принципиальной возможности применения солитонных линий связи с многоуровневым кодированием фазы для передачи информации при большой мощности вводимого в волокно излучения и значительном влиянии нелинейности, когда использование традиционных линий связи затруднено.

## 2. Математическая модель

Объектом исследования являются магистральные ВОЛС протяжённостью до 5000 км с распределённым ВКР-усилением. Для численных расчётов использовалась модель с идеальным распределённым ВКР-усилением, когда оптические потери компенсируются непрерывно таким образом, что среднее значение мощности сигнала остается постоянным на протяжении всей дистанции. Для описания распространения электромагнитного поля вдоль оптического волокна использовалось обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера (НУШ) [11, 14]:

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

где  $A(z, t)$  – комплексная огибающая амплитуды поля;  $t$  – время;  $z$  – расстояние вдоль волокна;  $\beta_2$  – параметр хроматической дисперсии;  $\gamma$  – параметр нелинейности. Член уравнения  $N(z, t)$  описывает генерацию шума, возникающего вследствие оптически усиленного спонтанного излучения [15]. В качестве модели шума используется модель аддитивного белого гауссова шума со спектральной плотностью на поляризацию (мощностью шума на единицу частоты)  $N_{ASE} = n_{sp}\hbar\omega\alpha L$ , где  $\hbar$  – постоянная Планка;  $\omega$  – несущая частота сигнала;  $\alpha$  – потери;  $L$  – дистанция распространения;  $n_{sp} = N_2(N_2 - N_1)$  – коэффициент спонтанной эмиссии;  $N_1$  – количество атомов, находящихся в основном состоянии;  $N_2$  – количество возбужденных атомов. Численное моделирование проводилось на основе фурье-метода расщепления по физическим процессам (симметричная схема второго порядка аппроксимации) [14]. Значения всех параметров, используемых в расчётах, представлены ниже.

$n_{sp}$ . . . . .	1.0
$\omega/2\pi$ (ТГц) . . . . .	193.6
$\alpha$ (км <sup>-1</sup> ) . . . . .	0.046
$L$ (км) . . . . .	500–5000
Количество частотных каналов . . . . .	15
$\beta_2$ (пс <sup>2</sup> ·км <sup>-1</sup> ) . . . . .	-21.5
$\gamma$ (мВт <sup>-1</sup> ·км <sup>-1</sup> ) . . . . .	$1.27 \times 10^{-3}$

На приёмнике выполнялась компенсация накопленной хроматической дисперсии и нелинейных эффектов с помощью метода обратного распространения сигнала. Для этого использовалось НУШ с противоположными знаками членов и в отсутствие шумового члена уравнения:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - i\gamma|A|^2 A.$$

В качестве начальной амплитуды бралась амплитуда полученного на приёмнике сигнала. Данный метод цифровой обработки сигнала зарекомендовал себя во многих задачах оптики [16–19] и на данный момент является одним из наиболее перспективных современных методов улучшения качества передачи сигнала [20]. Для солитонных ВОЛС этот метод позволяет снизить межканальные взаимодействия, а также взаимодействия соседних импульсов друг с другом.

Качество передачи импульсов в расчётах оценивалось с помощью параметра ошибки EVM [21], который характеризует отклонение принятого сигнала от начального вследствие его искажений. Для последовательности импульсов EVM вычисляется следующим образом:

$$EVM = \left[ \frac{\sum_i |r_i^0 - r_i|^2}{N_s \sum_i |r_i^0|^2} \right]^{1/2},$$

где  $r_i^0$  – начальное состояние на комплексной плоскости констелляционной диаграммы, а  $r_i$  – амплитуда принятого сигнала. Очевидно, что параметр ошибки EVM является мерой отклонения сигнала от начального положения на констелляционной диаграмме и, кроме того, позволяет оценить порядок фазового формата модуляции, который можно использовать при передаче сигнала по оптоволокну. Так, например, для  $EVM < 25\%$  можно использовать модуляцию 8-PSK, а для  $EVM < 55\%$  – двоичный формат BPSK. Каждому значению параметра EVM соответствует однозначно определяющееся значение параметра

тра битовой ошибки BER [21] для каждого формата модуляции сигнала. Все приведенные значения EVM для оценки выбора формата модуляции соответствуют  $BER = 5 \times 10^{-2}$ .

В численных расчётах использовались псевдослучайные последовательности длиной  $2^{14}$  бит. В качестве формата модуляции был выбран четырёхуровневый фазовый формат модуляции QPSK. При моделировании традиционных линий связи использовались импульсы с профилем в виде функции sinc:

$$A(0, t) = P_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_b}\right) / \left(\frac{2\pi t}{T_b}\right),$$

где  $P_0$  – начальная пиковая мощность, а  $T_b$  – битовый интервал. Подобная форма импульса обладает рядом неоспоримых преимуществ. Во-первых, спектр импульса имеет прямоугольную форму, что практически исключает межканальные взаимодействия. Во-вторых, данная форма импульса позволяет полностью исключить межсимвольные взаимодействия [11, 22]. Выбранный формат модуляции позволяет провести сравнение характеристик солитонных ВОЛС с максимально достижимыми параметрами традиционных ВОЛС, такими как битовая скорость, дальность передачи информации и спектральная эффективность.

При моделировании солитонных линий связи использовались импульсы с профилем

$$A(0, t) = \frac{2\sqrt{P_0}}{\exp(-\tau) + \exp(\tau)}, \quad P_0 = |\beta_2| / \gamma T_0^2, \quad (1)$$

где  $T_0$  – ширина импульса, а  $\tau = t/T_0$ . Отличительными чертами солитонного импульса является связь пиковой мощности и ширины импульса, а также «частицеподобное» поведение, например упругое взаимодействие. Действие дисперсионных и нелинейных эффектов волокна влияет только на фазу солитона, и если рассмотреть действие эффектов независимо, можно легко получить выражения дисперсионного  $d\Phi_D$  и нелинейного  $d\Phi_{NL}$  сдвига фаз [23]:

$$d\Phi_{NL} = \text{sech}^2(t/\tau) dz, \quad d\Phi_D = [0.5 - \text{sech}^2(t/\tau)] dz.$$

Сумма этих дифференциалов равна константе, а значит, после интегрирования уравнения Шрёдингера начальный импульс приобретет лишь набег фазы, равный  $z/2$ . Именно в этом заключен механизм взаимной компенсации дисперсионных и нелинейных эффектов.

Важным параметром при проектировании ВОЛС является отношение сигнал/шум, которое определяется следующим образом:

$$SNR = 2 \frac{B_{ref}}{R_s} OSNR = 2 \frac{B_{ref}}{R_s} \frac{P_{ave}}{P_N},$$

где  $B_{ref}$  – характерная ширина полосы (12.5 ГГц);  $P_{ave}$  – средняя мощность сигнала;  $R_s$  – символьная скорость передачи данных;  $P_N$  – мощность шума [24].

### 3. Численный эксперимент

Были проведены анализ и сравнение результатов математического моделирования солитонных и традиционных ВОЛС, схема которых представлена на рис.1. Значения пиковой мощности исходного сигнала  $P_0$  составляли  $-2$ ,  $-4$  и  $-6$  дБм. Данный диапазон мощностей

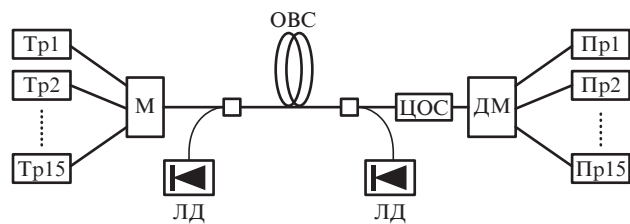


Рис.1. Схема моделируемой линии связи:

Tr – транспондеры; М – мультиплексор; ДМ – демultipлексор; Пр – приемники; ЦОС – модуль цифровой обработки сигнала (ОПС); ЛД – лазерные диоды прямой и обратной накачки.

охватывает область больших значений SNR, при которых существенно влияние нелинейных эффектов и где сравнение представляет наибольший интерес.

Для каждой мощности  $P_0$  длительность солитонного импульса однозначно определяется выражением (1) и составляет 164, 208 и 260 пс соответственно. Для того чтобы избежать сильного влияния соседних импульсов друг на друга, длина битового интервала должна удовлетворять соотношению  $T_b/T_{FWHM} > 2$  [21], где  $T_{FWHM}$  – ширина импульса на полувысоте. Исходя из этого, было зафиксировано значение битового интервала  $T_b = 1000$  пс, что соответствует символьной скорости 1 Гбод. Учитывая формат модуляции QPSK, битовая скорость составила 2 Гбит/с в одном спектральном канале при спектральной эффективности  $\sim 0.6$  бит·с<sup>-1</sup>·Гц<sup>-1</sup>. Для адекватного сравнения результатов моделирования символьная скорость для традиционных ВОЛС была выбрана также 1 Гбод.

### 4. Результаты

На рис.2 представлены результаты численного расчета зависимости EVM от дистанции распространения для выбранных пиковых мощностей импульсов. Видно, что значение параметра ошибки увеличивается с ростом протяженности линии. Это обусловлено искажением сигнала в результате одновременного накопления шумов спонтанного излучения и влияния нелинейных и дисперсионных эффектов. Также видно, что с ростом мощности импульса при традиционной передаче данных (рис.2,б) параметр ошибки быстро увеличивается, что вызвано, прежде всего, ростом влияния нелинейности при распространении сигнала по волокну. Оценить влияние нелинейных эффектов наиболее удобно через параметр нелинейной длины

$$L_{NL} = (\gamma P_0)^{-1}.$$

Так, например, для мощности  $P_0 = -6$  дБм нелинейная длина  $L_{NL} = 3200$  км, а  $P_0 = -2$  дБм соответствует  $L_{NL} = 1300$  км. Таким образом, при использовании традиционных линий связи в области больших (более 40 дБ) SNR безошибочная передача сигнала возможна не более чем на 1500 км. Максимальная дальность передачи традиционных линий в данном случае достигается при наименьшей ( $-6$  дБм) мощности  $P_0$  и составляет  $\sim 4500$  км.

Солитонные линии связи (рис.2,а), наоборот, демонстрируют большую устойчивость к уменьшению  $L_{NL}$ . Значения EVM здесь не превышают 9%, что свидетельствует о хорошем качестве сигнала и возможности безошибочного декодирования. Расхождение кривых на рис.2,а незначительно, поскольку дисперсия и нелинейные эффекты взаимно компенсируются и последние прак-

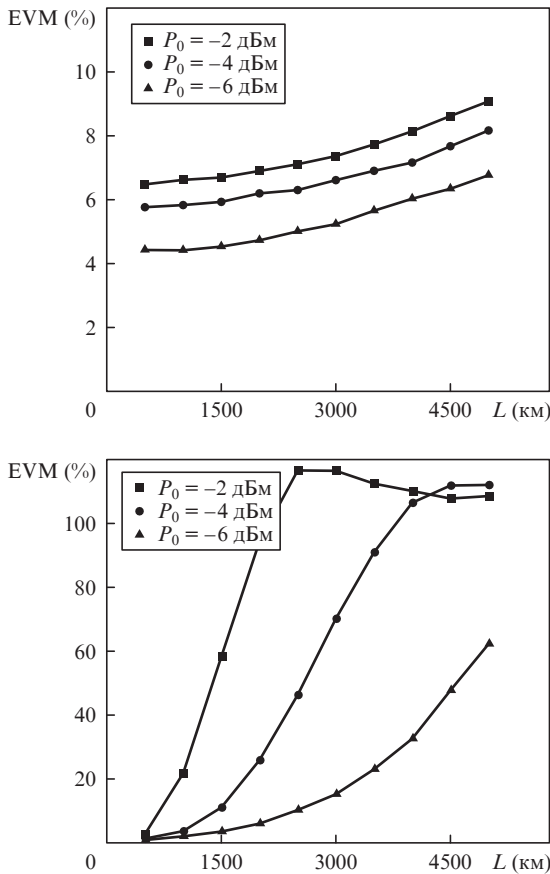


Рис.2. Зависимость параметра ошибки от дистанции распространения для солитонных (а) и традиционных (б) линий связи.

тически не дают вклад в разрушение сигнала. Здесь увеличение EVM с ростом мощности  $P_0$  связано с ростом межсолитонного взаимодействия [25], а дальность передачи сигнала, при которой возможно безошибочное декодирование, не достигает своего максимума, то есть может быть более 5000 км.

Рис.3 иллюстрирует искажение сигнала с ростом дистанции распространения для солитонных и традиционных ВОЛС. Как видно, солитонная передача сигнала не только обладает лучшим качеством передачи, но и позволяет использовать фазовую модуляцию более высокого порядка, например 8-PSK.

На рис.4 приведены диаграммы принятого сигнала после распространения по солитонной ВОЛС на 5000 км с использованием формата 8-PSK при  $P_0 = -4$  дБм. В резуль-

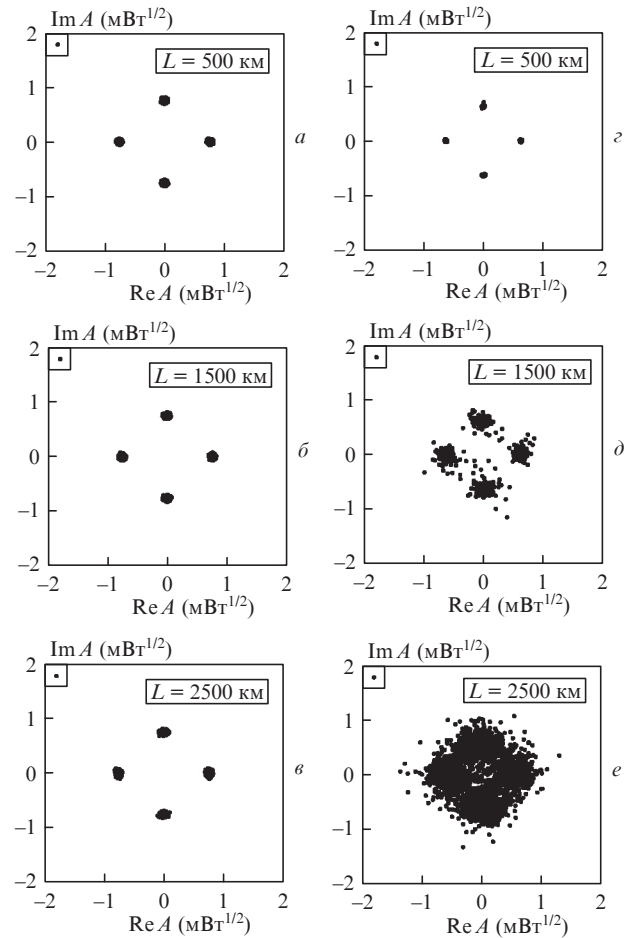


Рис.3. Конституционные диаграммы для солитонных (а-е) и традиционных (з-е) ВОЛС различной длины;  $P_0 = -4$  дБм,  $N_{NL} = 2000$  км.

тате увеличения порядка модуляции битовая скорость возросла до 3 Гбит/с в одном канале при спектральной эффективности порядка  $1 \text{ бит} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$ . Значение EVM в данном случае увеличилось менее чем в два раза по сравнению со случаем QPSK-модуляции и находится всё ещё ниже порогового значения (менее 25%) для безошибочного детектирования.

Отдельно исследовалось влияние накопленного шума на качество передачи сигнала. Прежде всего необходимо подчеркнуть, что, хотя пиковые мощности солитонных импульсов и импульсов формы sinc были выбраны рав-

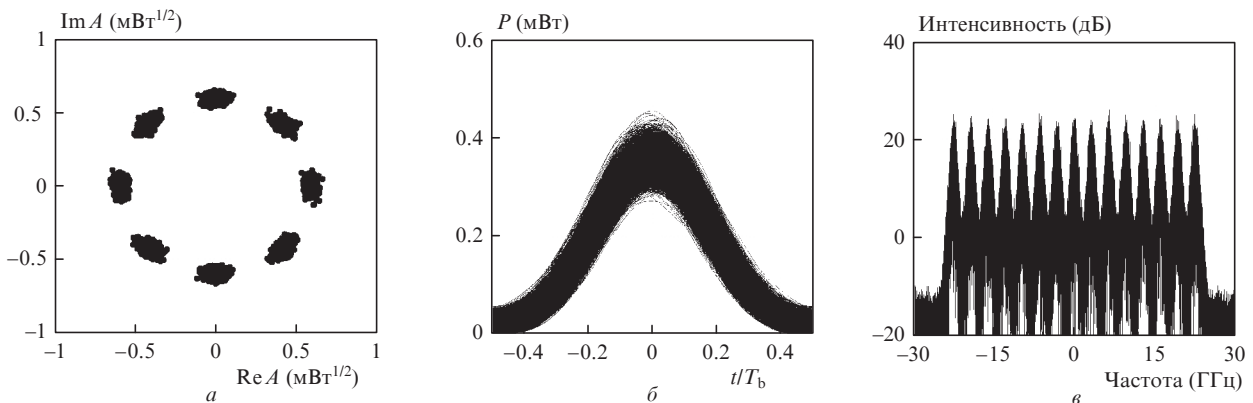


Рис.4. Конституционная (а) и индикаторная (б) диаграммы, а также спектр сигнала (е) солитонной линии связи после распространения на 5000 км.

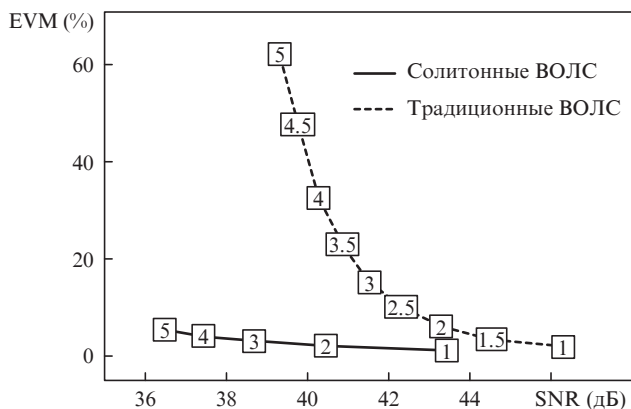


Рис.5. Сравнение солитонных и традиционных ВОЛС в зависимости от накопленного шума. Цифры, приведенные на кривых, соответствуют расстоянию распространения (в тыс. км).

ными, средние мощности импульсов различаются. Тем не менее, для пиковой мощности  $P_0 = -6$  дБм, вследствие соотношения ширины импульса и битового интервала, средние мощности оказываются одного порядка величины и сравнение правомерно. Более того, чтобы исключить вклад нелинейных эффектов в разрушение сигнала, будем проводить сравнение в области расстояний  $L < L_{NL}$ . Напомним, что  $L_{NL} = 3200$  км для мощности  $P_0 = -6$  дБм.

На рис.5 продемонстрирован рост ошибки с накоплением шума. При небольших ( $L < 1000$  км) расстояниях распространения, т.е. для больших значений SNR (44–47 дБ), значения EVM для обеих линий совпадают. Далее, с накоплением шума ( $L = 3000$  км, SNR  $\approx 42$  дБ) значение EVM для традиционных ВОЛС примерно в пять раз больше, чем для солитонных. Это говорит об устойчивости солитона к временному джиттеру, вызванному действием накопленного шума на сигнал.

### 5. Солитонные линии связи с канальной скоростью 10 Гбит/с

Дальнейшее увеличение канальной скорости солитонных линий связи связано с уменьшением ширины солитонного импульса, а значит, с увеличением мощности передаваемого сигнала. Сравним солитонные и традиционные линии связи в контексте передачи информации со

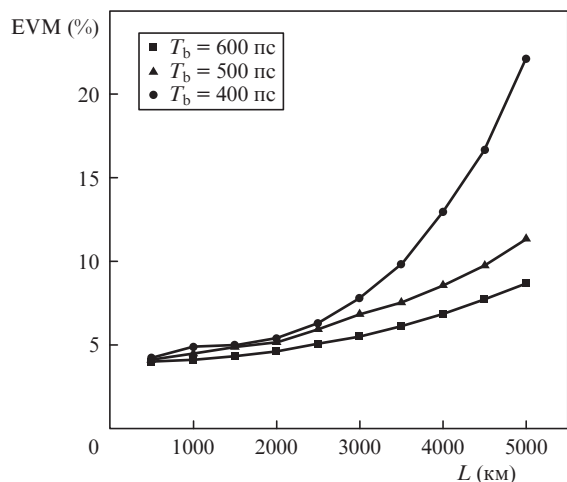


Рис.6. Зависимость накопленной ошибки от расстояния распространения для солитонной ВОЛС с форматом модуляции 4-ASK/16-PSK.

скоростью 10 Гбит/с в одном спектральном канале. Чтобы исключить резкий рост мощности, выберем четырехуровневую фазовую модуляцию сигнала 4-ASK/QPSK, 4-ASK/8-PSK и 4-ASK/16-PSK с соответствующими битовыми интервалами 400, 500 и 600 пс.

На рис.6 представлен результат численного расчета зависимости EVM от дистанции распространения для солитонной линии связи. Увеличение искажения сигнала с ростом мощности импульса обосновано усилением взаимодействия солитонных импульсов. Видно, что передача информации по магистральным ВОЛС ( $L \leq 5000$  км) при использовании форматов модуляции с большим количе-

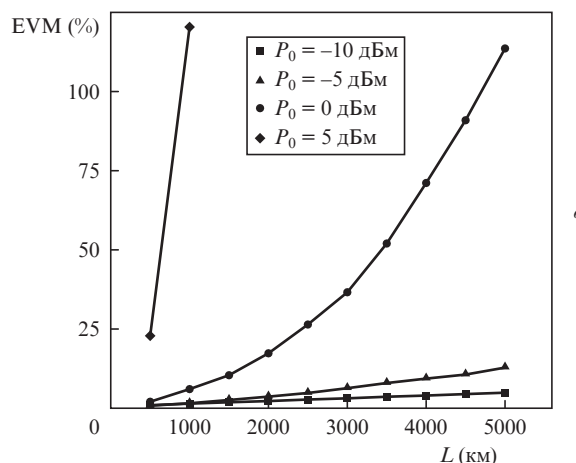
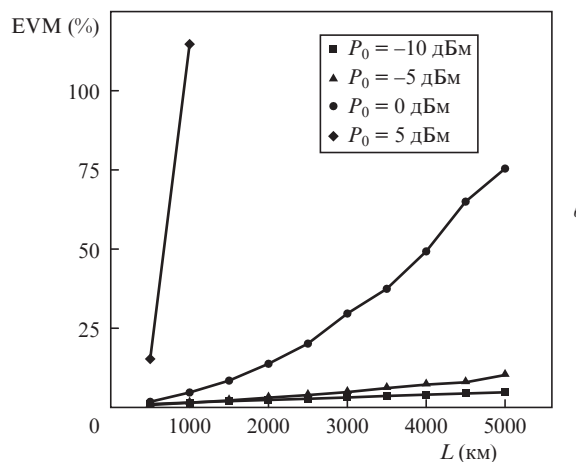
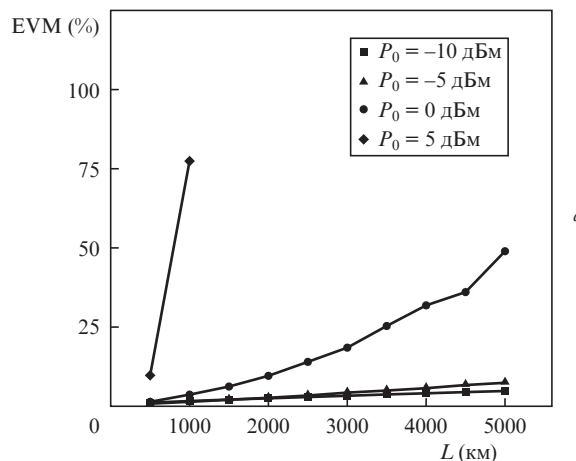


Рис.7. Зависимость EVM от дистанции распространения сигнала по традиционным линиям связи для  $T_b = 400$  (а), 500 (б) и 600 пс (в).



ством уровней фазы и несколькими уровнями амплитуды – 4-ASK/16-PSK – возможна. Аналогичный расчет для традиционных ВОЛС представлен на рис.7. Видно, что с мощностями более 0 дБм передача сигнала возможна не далее чем на 2500 км.

## 6. Заключение

Проведено математическое моделирование передачи оптических импульсов по традиционным и солитонным ВОЛС при использовании спектрально-эффективных форматов модуляции сигнала. Установлено, что солитонные линии связи более устойчивы к влиянию нелинейных эффектов при большой мощности вводимого в волокно излучения по сравнению с традиционными ВОЛС. Для солитонных линий связи протяженностью 5000 км значение SNR, при котором возможно корректное детектирование принятого сигнала, достигает 39 дБ.

В работе показано, что в случае, когда дистанция распространения  $L$  меньше нелинейной длины  $L_{NL}$ , солитонные линии связи обладают большей устойчивостью по отношению к накоплению шума по мере распространения оптического сигнала.

Кроме того, установлено, что скорость передачи информации в одном спектральном канале по солитонным линиям связи может быть существенно увеличена в результате использования фазовых форматов модуляции с большим количеством амплитудных уровней. Спектральная эффективность, достигнутая при передаче данных со скоростью 10 Гбит/с в одном спектральном канале, составила  $2.4 \text{ бит} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$ .

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 14.B25.31.0003), а также РФФИ (проект № 14-01-31258 мол\_а).

1. Turitsyn S.K., Bale B., Fedoruk M.P. *Phys. Rep.*, **521** (4), 135 (2012).
2. Tkach R. *Bell Labs Tech. J.*, **14**, 3 (2010).

3. Rafique D., Ellis A.D. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **23**, 1838 (2011).
4. Millar D.S., Makovejs S., Behrens C., Hellerbrand S., Killeve R.I., Bayvel P., Savory S.J. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **16**, 1217 (2010).
5. Ip E., Kahn J.M. *J. Lightwave Technol.*, **26**, 3416 (2008).
6. Шапиро Е.Г., Федорук М.П. *Фотон-экспресс*, **6**, 124 (2011).
7. Гуркин Н.В., Капин Ю.А., Наний О.Е., Новиков А.Г., Павлов В.Н., Плаксин С.О., Плоцкий А.Ю., Трещиков В.Н. *Квантовая электроника*, **43** (6), 546 (2013).
8. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Плаксин С.О., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р. *Квантовая электроника*, **43** (6), 550 (2013).
9. Редюк А.А., Штырина О.В., Наний О.Е., Капин Ю.А., Сачалин Е.А., Титов Э.Б., Трещиков В.Н., Ярышкин А.А., Федорук М.П. *Квантовая электроника*, **41** (10), 929 (2011).
10. Gainov V., Gurkin N., Lukin S., Akopov S., Makovejs S., Ten S., Nani O. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 075107 (2013).
11. Essiambre R., Winzer P. *J. Lightwave Technol.*, **28**, 662 (2010).
12. Turitsyn S.K., Shapiro E.G., Medvedev S.B., Fedoruk M.P., Mezentsev V.K. *CR Phys.*, **4**, 145 (2003).
13. Prilepsky J.E., Derevyanko S.A., Turitsyn S.K. *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 183902 (2012).
14. Агравал Г.П. *Нелинейная волоконная оптика* (М: Мир, 1996).
15. Henry C.H. *J. Lightwave Technol.*, **4**, 288 (1986).
16. Lavery D., Makovejs S., Killeve R. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **24**, 176 (2012).
17. Ezra I., Kahn J.M. *J. Lightwave Technol.*, **26**, 20 (2008).
18. Amiralizadeh S., Nguyen A., Rusch L. *Opt. Express*, **21**, 20376 (2013).
19. Shoichiro O., Takahito T., Takeshi H., Yuichi A., et al. *Proc. Optical Fiber Communication Conf.* (Los Angeles, 2012).
20. Tanimura T., Nolle M., Fisher J.K., Schubert C. *Opt. Express*, **20**, 28779 (2012).
21. Schmogrow R., Nebendahl B., Winter M., Josten A., Hillerkuss D., Koenig S. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **24**, 61 (2012).
22. Schmogrow R., Winter M., Meyer M., Hillerkuss D., Wolf S., et al. *Opt. Express*, **20**, 317 (2012).
23. Mollenauer L.F., Gordon J.P. *Solitons in Optical Fibers* (Amsterdam, Boston: Elsevier Academic Press, 2006).
24. Essiambre R.-J. *Proc. Optical Fiber Communication Conf.* (Geneva, 2011).
25. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. *Оптические солитоны* (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005).