

Новый формат данных для волоконно-оптических линий передачи с плотной упаковкой частотных каналов

М.В.Лысакова, М.П.Федорук, С.К.Турицын, Е.Г.Шапиро

Предложен спектрально-плоский формат (flat-top format) передачи цифровых сигналов с sinc-образным профилем одиночного импульса, резонансно расположенным вдоль нескольких битовых интервалов. Благодаря быстрому убыванию спектральной мощности такой формат обеспечивает ослабление взаимодействия двух соседних частотных каналов. Результаты численного моделирования показали возможность передачи данных в линии со скоростью 40 Гбит/с без коррекции ошибок (FEC) на расстояние 1200 км со спектральной эффективностью $0.8 \text{ бит} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$ без использования уплотнения каналов по поляризации.

Ключевые слова: оптоволоконные линии связи, формат передачи цифровых сигналов, спектральное уплотнение, частотные каналы, волоконные световоды сигналов.

1. Введение

Дальнейшее увеличение суммарной емкости волоконно-оптических линий связи стало возможным благодаря увеличению спектральной эффективности передачи данных. В последнее десятилетие повышенный интерес вызывают высокоскоростные (40 Гбит/с и более) технологии передачи данных с плотно упакованными частотными каналами [1–4], что предполагает, разумеется, узкое фильтрование сигналов для подавления взаимодействия между ними. Однако это приводит к искажению формы сигнала во временной области. Передача спектрально-ограниченных сигналов со скоростью 40 Гбит/с на канал ранее изучалась в [5], но там форма импульсов специальным образом не контролировалась.

В настоящей работе мы предлагаем и исследуем функционирование систем со скоростью передачи данных $N \times 40$ Гбит/с (N – число каналов) и спектральным уплотнением, используя спектрально-плоский формат (flat-top format) вдоль полосы частот B и временной профиль сигнала $\text{sinc}(\pi Bt)$. Импульсы такой формы позволяют подавить сильное взаимодействие соседних битов за счет расположения нулей функции $\text{sinc}(\pi Bt)$ в центрах битовых интервалов.

2. Спектрально-плоский формат

Для получения sinc-образной формы несущих сигналов с ограниченным спектром короткий гауссов импульс

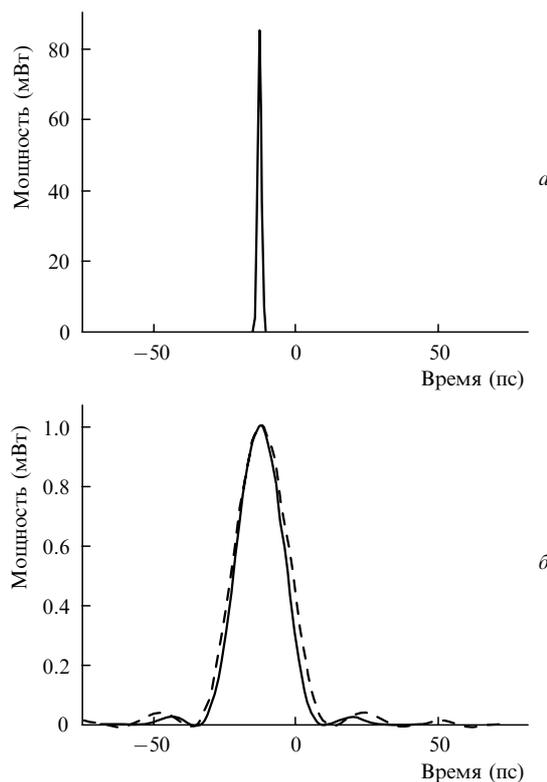


Рис.1. Временной профиль импульса до (а) и после супергауссова оптического фильтра (б, сплошная кривая), а также график функции $\text{sinc}(\pi Bt)/t$ (б, штриховая кривая).

(1.7 пс) был предварительно пропущен через супергауссов оптический фильтр. На рис.1 показан временной профиль импульса до и после оптического фильтра. Заметим, что ширина оптического фильтра B подобрана таким образом, что нули функции $\text{sinc}(\pi Bt)$ находятся в серединах битовых интервалов. В результате этого взаимодействие между соседними битами уменьшается. На рис.2 показано формирование сигнала с многоволновым

М.В.Лысакова. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2;
e-mail: zaharyuta@gorodok.net

М.П.Федорук. Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 6;
e-mail: mife@ict.nsc.ru

С.К.Турицын, Е.Г.Шапиро. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Копытова, 1;
e-mail: e.shapirgo@iae.nsk.su. Адрес С.К.Турицына в настоящее время: Aston University, Birmingham, United Kingdom;
e-mail: s.k.turitsyn@aston.ac.uk

Поступила в редакцию 12 мая 2004 г.

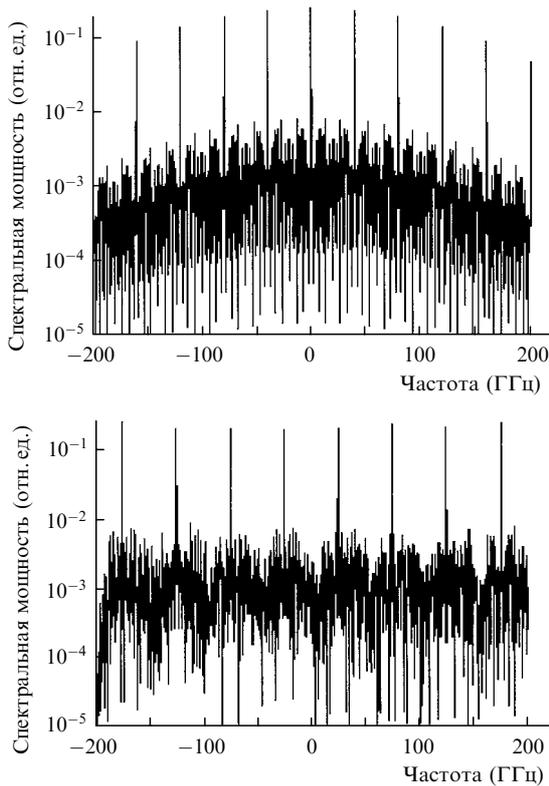


Рис.2. Спектры сигналов одного частотного канала до применения оптического фильтра (а) и восьми частотных каналов после его применения (б).

уплотнением оптических несущих на основе использования спектрально-ограниченных импульсов.

3. Результаты численного моделирования

Для описания динамики оптических импульсов в оптоволоконной линии связи использовалось нелинейное уравнение Шредингера для комплексной огибающей электромагнитного поля $E(z, t)$ [6]:

$$i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{1}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \sigma(z) |E|^2 E = i \left[-\gamma(z) + r_k \sum_{k=1}^N \delta(z - z_k) \right] E = iG(z)E.$$

Здесь z – расстояние, на которое распространяется сигнал; t – время; $|E|^2$ – мощность оптического импульса; $\beta_2(z)$ – коэффициент дисперсии групповой скорости; $\sigma(z) = 2\pi n_2(z)/[\lambda_0 A_{\text{эфф}}(z)]$ – коэффициент нелинейности; n_2 – нелинейный показатель преломления; λ_0 – несущая длина волны; $A_{\text{эфф}}(z)$ – эффективная площадь сечения световода; z_k – положение оптических усилителей.

Для простоты рассмотрим периодическое усиление с периодом Z_a . Если коэффициент потерь γ между двумя последовательными усилителями является постоянной величиной, то коэффициент усиления $r_k = [\exp(\gamma_k Z_a) - 1]$. Коэффициент потерь на k -м отрезке $\gamma_k = 0.05 \ln(10) \alpha_k$, где затухание сигнала α_k задается в дБ/км. Для численного моделирования данного уравнения использовался метод расщепления Фурье по физическим процессам [6].

Без потери общности рассмотрим распространение сигналов sinc-образной формы в коммуникационной сис-

теме $N \times 40$ Гбит/с со спектральным уплотнением и расстоянием между соседними частотными каналами 50 ГГц. Периодическая секция волоконно-оптической линии передачи состоит из двух волоконных световодов (SMF и DCF) и сосредоточенного эрбиевого усилителя (EDFA): SMF (20 км) + DCF (6.8 км) + SMF (20 км) + EDFA (общая длина 46.8 км). Характеристики волоконных световодов таковы: SMF – $\lambda = 1550$ нм, дисперсия $D = 17$ пс·нм⁻¹·км⁻¹, дисперсионный наклон $S = 0.07$ пс × нм⁻¹·нм⁻¹·км⁻¹, потери 0.2 дБ/км; DCF – $\lambda = 1550$ нм, $D = -100$ пс·нм⁻¹·км⁻¹, $S = -0.41$ пс·нм⁻¹·нм⁻¹·км⁻¹, потери 0.65 дБ/км. Сосредоточенный эрбиевый усилитель (EDFA) имеет коэффициент шума 4.5 дБ.

Рассматривалась передача данных в восьми частотных каналах в диапазоне длин волн 1548.78–1551.98 нм (расстояние между соседними каналами составляло 50 ГГц) при средней дисперсии линии $\langle D \rangle = -0.03$ пс·нм⁻¹ × км⁻¹. Смешение и разделение каналов проводилось с помощью супергауссова фильтра (6-го порядка) с шириной 43 ГГц и заданным оптимальным сдвигом относительно центра канала. Для формирования sinc-образной последовательности очень короткие импульсы (1.7 пс) с пиковой мощностью 85 мВт предварительно были пропущены через оптический фильтр шириной 43 ГГц (см. рис.1). Следует отметить, что сдвиг оптического фильтра $\Delta\nu$ относительно центра частотного канала является очень важным параметром задачи.

На рис.3 представлены eye-диаграммы сигнала после его прохождения через супергауссов оптический фильтр со сдвигом $\Delta\nu$ относительно центра канала, равным нулю и –6 ГГц. Видно, что форма импульсов для этого формата данных очень сильно отличается от их формы для формата как с «возвращением к нулю» (RZ format), рассмотренного в [5], так и «без возвращения к нулю» (NRZ). Оптимальному сдвигу $\Delta\nu = -6$ ГГц соответству-

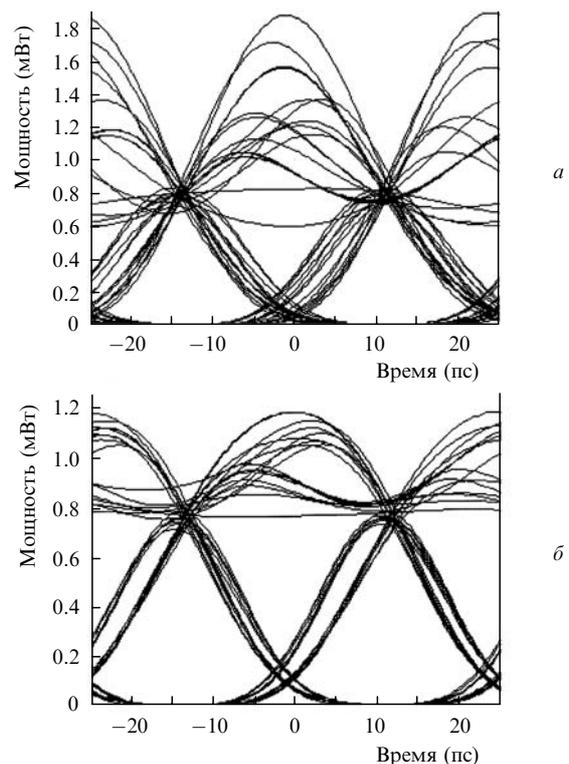


Рис.3. Eye-диаграммы сигнала после прохождения через супергауссов оптический фильтр с нулевым сдвигом (а) и с $\Delta\nu = -6$ ГГц (б).

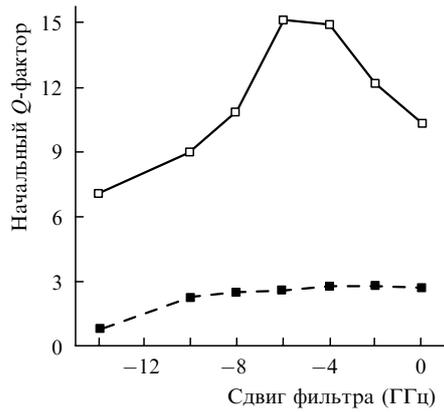


Рис.4. Зависимости начального Q -фактора для спектрально-плоского формата данных (сплошная кривая) и для обычного формата «с возвращением к нулю» (штриховая кривая) при оптимальных для каждого формата данных параметрах.

ет более открытая eye-диаграмма. Это приводит к сильной зависимости начального Q -фактора системы от $\Delta\nu$. Напомним, что величина Q -фактора характеризует коэффициент ошибки BER в передаче данных, который при $Q_{cr} = 6$ равен 10^{-9} [7]. Эта зависимость для спектрально-плоского формата данных и обычного формата «с возвращением к нулю» представлена на рис.4. Видно, что для обычного формата данных начальное значение Q -фактора оказывается значительно меньше стандартной критической величины $Q_{cr} = 6$. На приемнике использовался фильтр Баттерворта 3-го порядка с шириной полосы пропускания 50 ГГц. Передаточная способность системы определялась как дистанция, для которой $Q \geq 6$, полученная как усредненная длина при распространении двадцати одной псевдослучайной последовательности по $2^7 - 1$ бит в каждой [8]. На рис.5 показано расстояние, на которое распространяется сигнал, как функция сдвига оптического фильтра относительно центра канала. Заметим, что оптимальный сдвиг зависит от формы оптического фильтра. Например, для супергауссова фильтра 6-го порядка он равен -6 ГГц.

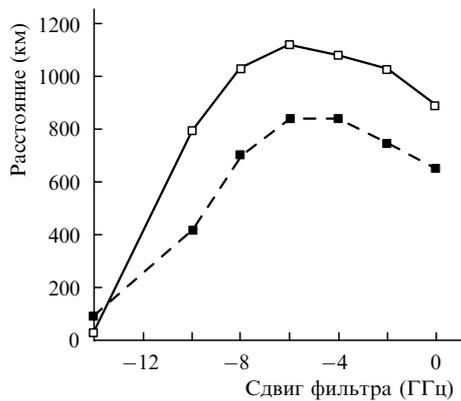


Рис.5. Зависимости расстояния, на которое распространяется сигнал, от сдвига оптического супергауссова фильтра 6-го порядка (сплошная кривая) и от величины сдвига прямоугольного фильтра (штриховая кривая) при оптимальных для каждого формата данных параметрах.

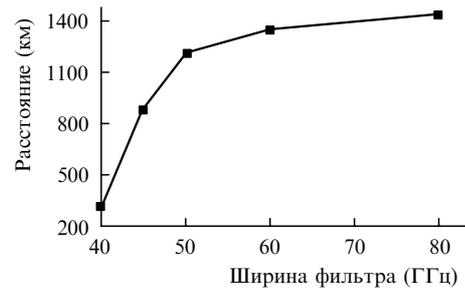
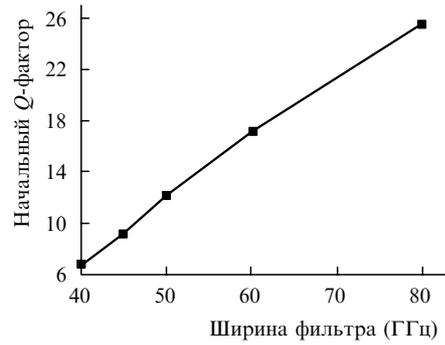


Рис.6. Зависимости начального Q -фактора системы от ширины электрического фильтра при сдвиге супергауссова оптического фильтра $\Delta\nu = -6$ ГГц (а) и расстояния, на которое распространяется сигнал, от ширины электрического фильтра (б).

Была исследована также зависимость дальности передачи информации от ширины электрического фильтра на приемнике (рис.6). Средняя мощность сигнала на входе в линию составляла -5 дБм.

4. Заключение

В работе исследован спектрально-плоский формат данных с sinc-образной формой оптических импульсов. Быстрое затухание спектральной мощности вне полосы сигнала и соответствующее подавление перекрестного взаимодействия между каналами позволяют достичь спектральной эффективности 0.8 бит·с⁻¹·Гц⁻¹ без использования уплотнения каналов по поляризации. Прямое численное моделирование показало возможность передачи данных в системах $N \times 40$ Гбит/с со спектральным уплотнением на расстояния более 1100 км без коррекции данных со спектральной эффективностью 0.8 бит·с⁻¹·Гц⁻¹.

Работа поддержана РФФИ (грант № 03-02-16496а) и Министерством образования РФ (грант № 3Н-080-01).

1. Ito T., Nakanishi Y., Fuji K. *Proc. ECOC'2000* (Munich, 2000, PD1.1).
2. Rasmussen C. et al. *Proc. OFC'2003* (Atlanta, 2003, PD18-1).
3. Bigo S. et al. *Proc. ECOC'2000* (Munich, 2000, Paper PD1.2).
4. Zhu B. et al. *Proc. OFC'2003* (Atlanta, 2003, PD19-1).
5. Morita I. et al. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **20** (12), 2182 (2002).
6. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (New York: Acad. Press, 2001).
7. Agrawal G.P. *Fiber Optic Communication Systems* (New York: John Wiley, Sons Inc., 1997).
8. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *Electron. Lett.*, **19**, 1179 (2001).