

11

О прохождении фрактального импульса в зашумленном волоконно-оптическом канале

© Г.С. Малышев, А.С. Раевский

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), Нижний Новгород
E-mail: raevsky@nntu.nnov.ru

Поступило в Редакцию 6 февраля 2013 г.

Рассмотрен результат численного эксперимента по исследованию прохождения фрактального импульса через одномодовый волоконный световод (ВС) с учетом хроматической дисперсии. Наряду с полезным сигналом передавался маскирующий шумовой сигнал. Показано, что для эффективной очистки фрактального сигнала от шума на выходе волоконно-оптической линии связи необходимо наряду с кодом фрактального сигнала знать коэффициент дисперсии волоконного световода.

В настоящее время разработаны специальные средства незаметного считывания информации с волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). В связи с этим необходимо применять специальные методы защиты передаваемой по ВС информации. Одним из эффективных методов предотвращения несанкционированного доступа к информации является криптографическое шифрование данных. Однако при таком подходе подразумевается, что факт наличия в канале связи передаваемого сообщения заранее известен злоумышленнику. В результате вопрос защиты информации сводится к выбору криптостойкого шифрования, что само по себе является сложной задачей. В то же время можно пойти по другому пути, а именно: скрыть от злоумышленника сам факт передачи информации. Для этого можно использовать сигналы, имеющие шумоподобный характер. Одним из подходов к решению данной задачи является применение для модуляции оптической несущей фрактальных сигналов [1], имеющих шумоподобную структуру. Благодаря такой структуре [2] они незаметны на фоне шумов, что делает невозможным детектирование информационной посылки по максимуму интенсивно-

сти импульса. Для генерирования фрактальных сигналов используются программируемые генераторы [3]. Для маскировки информационного сигнала необходимо обеспечить искусственное зашумление передаваемых данных и передавать поляризованный отвлекающий сигнал высокой интенсивности, который на приемном конце ВОЛС может быть удален при помощи анализатора. Для выделения фрактальных импульсов из маскирующего шумового сигнала необходимо применять цифровые методы очистки от шума [4]. Однако эффективно продетектировать очищенный импульс можно лишь в том случае, если априори известна структура самого фрактального сигнала. Именно эти преимущества фракталов обеспечивают высокую скрытность передаваемой информации. В работе [5] рассмотрена реализация канала передачи данных фрактальными сигналами между двумя компьютерами по эфиру и коаксиальному кабелю. Однако в ВС существенную роль будет играть эффект дисперсии [6], что требует внесения специальных корректировок в алгоритм выделения информационных импульсов из шума.

Возьмем за основу фрактальный импульс $\psi(t)$, который определяется следующим образом [4,7]:

$$\psi(t) = \frac{1}{c_\psi} \left| F U W B \left(\frac{t-b}{T_0} \right) \right|, \quad (1)$$

где c_ψ — нормировочный коэффициент, T_0 — полная длительность фрактального импульса, b — смещение центра симметрии сигнала по оси абсцисс;

$$F U W B(t) = \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n \cos(3\beta^n(2t-1)) \right] \text{sign}(2t-1)\Theta(t);$$

$$\text{sign}(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t = 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases}, \quad \Theta(t) = \eta(t) - \eta(t-1), \quad \eta(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases}$$

На рис. 1, a, b показаны соответственно временная реализация квадрата амплитуды фрактального импульса (1) и его амплитудный спектр.

В данной статье будем рассматривать ВОЛС с модуляцией оптической несущей по интенсивности. Везде в дальнейшем мы будем

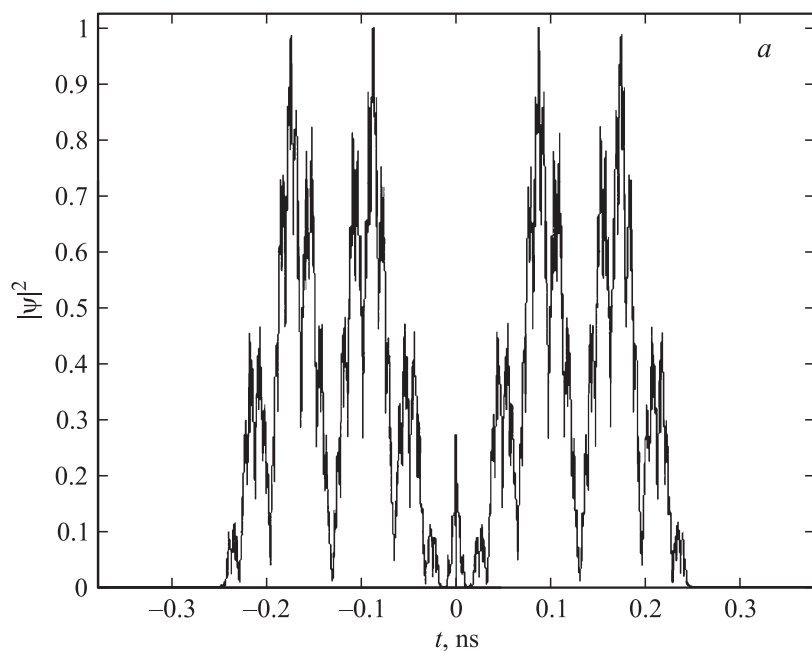


Рис. 1. Характеристики фрактального импульса (I), построенные для значений $T_0 = 0.5$ ns, $b = -T_0/2$, $\alpha = 0.7$, $\beta = 2$. a — временная реализация квадрата амплитуды фрактального импульса; b — амплитудный спектр фрактального импульса.

понимать под спектром сигнала спектр огибающей. Для построения спектра (рис. 1, b) использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье. По оси ординат откладываются абсолютные значения интеграла Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt.$$

В работах [4,8] показано, что для эффективной фильтрации таких сигналов можно использовать метод быстрого дискретного вейвлет-преобразования, так как он является одним из самых чувствительных за счет свойства масштабирования вейвлетов [9]. Этот метод отличается

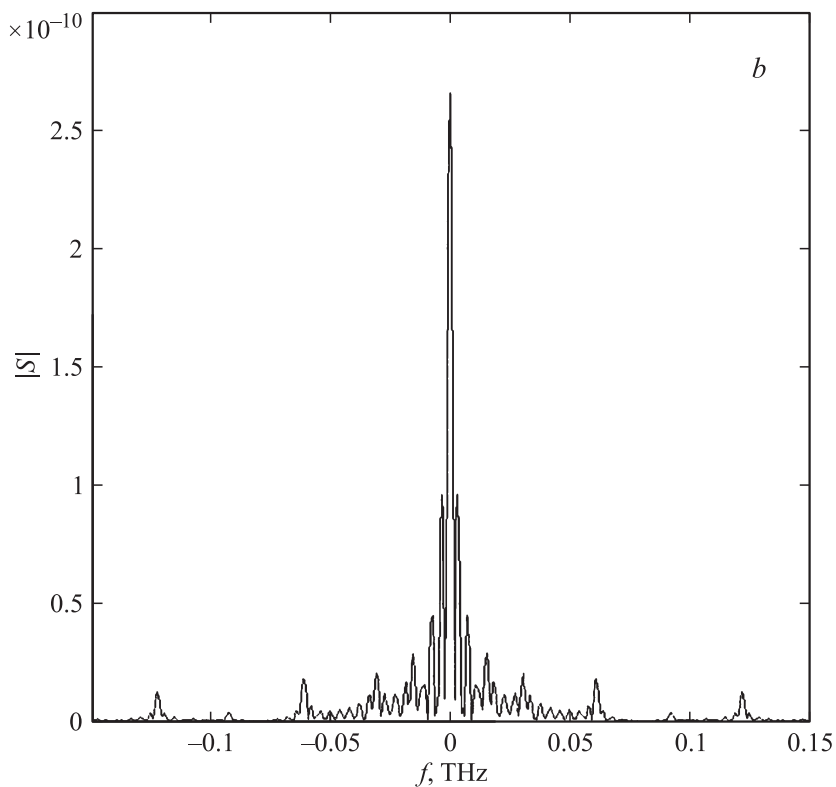


Рис. 1 (продолжение).

высоким быстродействием, так как основан на вычислении линейных сверток с фильтрами вейвлетов [10]. Поскольку не существует универсальной методики, позволяющей определить тип того вейвлета, фильтр которого производил бы наилучшую очистку сигнала от шума, для каждого конкретного вида сигналов необходимо подбирать какой-то один из существующих вейвлетов. Для очистки от шума были проверены четыре типа вейвлетов — вейвлеты Добеши, койфлеты, симлеты и биортогональные вейвлеты. Путем численного эксперимента было установлено, что для очистки сигнала (1) больше всего подходят

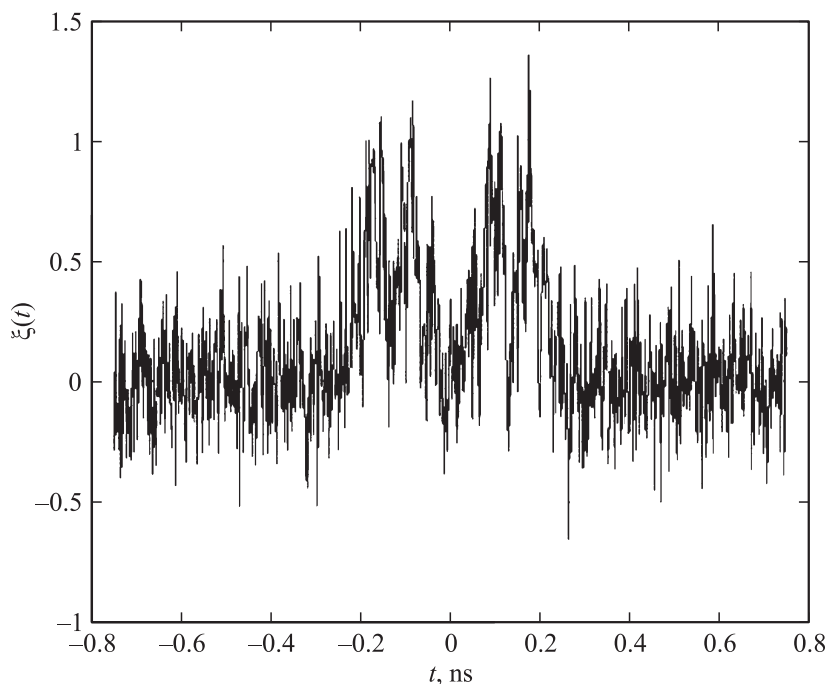


Рис. 2. Зашумленный фрактальный сигнал.

вейвлеты Добеши. В частности, использовался вейвлет Добеши 8 (*db8*), фильтры которого содержат по 16 элементов. Везде далее под фильтрами мы будем понимать фильтры вейвлетов.

В качестве модели шума использовался дискретный белый гауссов шум (БГШ) с фактически нулевым математическим ожиданием и конечным числом отсчетов. В отличие от своего непрерывного аналога, дискретный БГШ имеет конечную дисперсию [10]. Для моделирования массива дискретного БГШ необходимо использовать генератор случайных чисел, распределенных по нормальному закону.

В данной работе при моделировании зашумленного сигнала на выходе приемника полагалось, что дискретный БГШ является аддитивным шумом, т.е. суммируется с основным сигналом. В результате мы получаем реализацию $\xi(t)$, образец которой показан на рис. 2.

Численно реализация $\xi(t)$ представляется как сумма двух массивов, первый из которых состоит из дискретных отсчетов незашумленного сигнала $P(t) = |\psi(t)|^2$, а второй представляет собой дискретный БГШ. Функция $\psi(t)$ определяется с помощью выражения (1). Для зашумления сигнала генерировался дискретный БГШ с выборочной дисперсией 0.04 и соответствующим стандартным отклонением 0.2. Идея очистки состоит в том, чтобы выделить высокочастотную структуру оцифрованного зашумленного сигнала путем свертки с дискретным фильтром верхних частот.

После проведения очистки принятого сигнала можно переходить непосредственно к восстановлению самого информационного сообщения. Будем полагать, что наличие сверхширокополосного сигнала на отведенной позиции означает символ „1“, а отсутствие — символ „0“. Для фиксирования фрактального импульса понадобится вычисление следующих функционалов [4]:

$$B = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P(t)P_0(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} P_0^2(t)dt}, \quad D = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P^2(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} P_0^2(t)dt}. \quad (2)$$

Эти функционалы определяют меру схожести фрактального сигнала, имеющего мощность $P_0(t)$ на входе в линию, и восстановленного сигнала, имеющего мощность $P(t)$. Чем ближе функционалы (2) к единице, тем выше вероятность того, что принятый сигнал является фрактальным импульсом, который соответствует логической единице. Фрактальный импульс имеет сложную временную реализацию, поэтому при численных расчетах от выражений (2) перешли к их дискретным аналогам.

Фрактальный импульс имеет компактный носитель, длина которого в выражении (1) задается параметром T_0 . Из рис. 1 видно, что вне интервала $[-T_0/2, T_0/2]$ импульс обращается в ноль, поэтому функционал B будет близок к единице в том случае, когда очистка от шума произведена успешно в пределах этого интервала.

Ставилась задача определить, каким образом эффекты дисперсии повлияют на качество приема информации. Для моделирования эффекта дисперсии использовались следующие выражения. Спектр произвольного импульса на длине z световода, характеризуемого коэффициентом

дисперсии β_2 , определяется по формуле [6]:

$$\tilde{U}(z, \omega) = \tilde{U}(0, \omega) \exp \left[-\frac{i}{2} z \omega^2 \beta_2 \right].$$

Здесь $\tilde{U}(0, \omega)$ — спектр импульса на входе в световод:

$$\tilde{U}(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(0, T) e^{-i\omega T} dT.$$

Под импульсом $U(0, T)$ мы в данном случае понимаем сигнал (1). Временная реализация импульса на длине z световода находится с помощью обратного преобразования Фурье

$$U(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}(z, \omega) e^{i\omega T} d\omega.$$

Для расчетов полагали, что длина линии составляет 50 km. Значение коэффициента дисперсии полагалось равным $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$, что характерно для ВС из кварцевого стекла со стандартным профилем показателя преломления на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ [6]. Временная реализация квадрата амплитуды диспергировавшего фрактального импульса приведена на рис. 3.

После того как была рассчитана временная реализация импульса на выходе ВС с дисперсией, производилось искусственное зашумление полученного сигнала. Всего было произведено 15 численных экспериментов с зашумлением диспергировавшего фрактального сигнала и последующей его фильтрацией. В ходе каждого эксперимента был произведен расчет по формулам (2). Далее производилось усреднение полученных значений. В результате для рассматриваемого импульса были получены следующие данные: $B_1^d = 0.729$, $D_1^d = 0.723$. Видно, что наличие дисперсии привело к значительному отличию функционалов схожести от 1. Можно сделать вывод: для того чтобы организовать успешный прием, необходимо заранее определить коэффициент дисперсии в волоконном сетоводе и скорректировать выражение для $P_0(t)$ с учетом эффекта дисперсии.

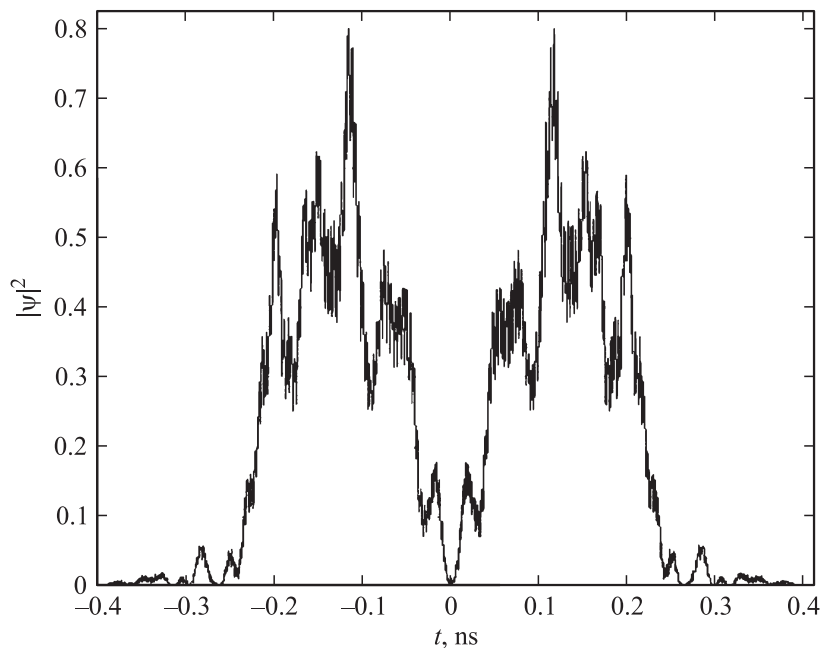


Рис. 3. Временная реализация квадрата амплитуды диспергировавшего фрактального импульса (I), построенная для значений $T_0 = 0.5 \text{ ns}$, $b = -T_0/2$, $\alpha = 0.7$, $\beta = 2$, $L = 50 \text{ km}$, $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$.

Таким образом, эффект дисперсионного уширения фрактального импульса может быть использован для обеспечения дополнительной защиты передаваемой информации. В волоконный тракт также могут искусственно вноситься элементы, обеспечивающие дополнительное дисперсионное уширение. Без знания коэффициента дисперсии канала связи злоумышленнику не удастся организовать эффективное считывание данных. В то же время сами получатели секретной информации смогут восстановить первоначальную форму сигнала при помощи компенсатора дисперсии.

Список литературы

- [1] *Захаров К.А., Мейланов Р.П.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44. № 8. С. 709–711.
- [2] *Massopust P.* Fractal function, fractal surfaces, and wavelets. Academic Press, 1994. 383 p.
- [3] *Болотов В.Н., Ткач Ю.В.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 4. С. 91–98.
- [4] *Сухарев Е.М.* Информационная безопасность: методы шифрования. М.: Радиотехника, 2011. 208 с.
- [5] *Болотов В.Н., Ткач Ю.В.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 9. С. 91–95.
- [6] *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
- [7] *Holschneider M.* Wavelets: An Analysis Tool. Oxford: Calderon Press, 1995. 423 p.
- [8] *Chernogor L.F., Lazorenko O.V., Lazorenko S.V.* // Radio Physics & Radio Astronomy. 2002. V. 7. № 4. P. 471–474.
- [9] *Штарк Г.* Применение вейвлетов для ЦОС. М.: Техносфера, 2007. 192 с.
- [10] *Смоленцев Н.К.* Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. В.: ДМК Пресс, 2008. 448 с.