

# Теоретический анализ качества передачи сигнала в волоконно-оптических линиях связи

А.С. Скидин\*, О.С. Сидельников, М.П. Федорук

Новосибирский государственный университет

\*E-mail: [ask@skidin.org](mailto:ask@skidin.org)

DOI: 10.31868/RFL2020.179-180

В современных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) с целью преодоления ограничений, накладываемых нелинейностью в волокне, используется множество специализированных методов обработки сигнала [1], таких как обратное распространение, адаптивная модуляция, машинное обучение. Оптимизация данных техник требует простых методов оценки качества выходного сигнала. В ходе исследования нами был предложен метод оценки качества нелинейной ВОЛС с использованием только начального сигнала. Для верификации результатов был использован сигнал на основе 16-QAM-OFDM с 1024 подканалами.

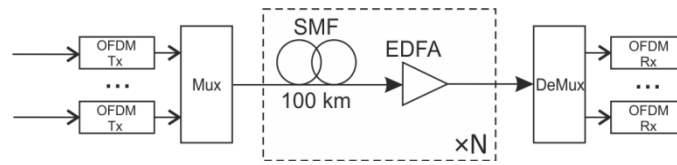


Рис. 1. Схема передачи сигнала.

Передача сигнала по волокну в схеме 1 описывается широко известным нелинейным уравнением Шредингера:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i \gamma |A|^2 A. \quad (1)$$

Здесь  $A(z, t)$  – медленно меняющаяся огибающая сигнала, потери в волокне  $\alpha=0.2$  дБ/км, хроматическая дисперсия  $\beta_2=25$  пс<sup>2</sup>/км, коэффициент нелинейности  $\gamma=1.4$  1/Вт·км. Введем следующие обозначения:  $x = z \cdot \alpha/2$ ,  $\tau = t \sqrt{\alpha/\beta_2}$ ,  $u(x, \tau) = A(z, t) \cdot \alpha/2$ . Тогда можно преобразовать уравнение (1) в следующую форму:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -u - i \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + i |u|^2 u K, \quad (2)$$

где  $K = 8\gamma/\alpha^3$ . Если  $u(x, \tau) = \sqrt{p(x, \tau)} \cdot \exp(i\rho(x, \tau))$ , можно записать следующие уравнения на эволюцию фазы и мощности:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -2p + 2 \frac{\partial}{\partial \tau} \left( p \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \right), \quad \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{1}{4p^2} \left( \frac{\partial p}{\partial \tau} \right)^2 - \frac{1}{2p} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} + \left( \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \right)^2 + pK \quad (3)$$

Рассмотрим начальную функцию  $u(x=0; t)$ . Будем предполагать, что  $u(x=0; t)$  соответствует OFDM-сигналу с  $M$  подканалами ( $M$  принимает значения порядка нескольких сотен). Также будем предполагать, что мощность сигнала достаточно велика, чтобы передача сигнала была нелинейной. При этих допущениях рассмотрим мгновенные значения члена  $\frac{\partial}{\partial \tau} \left( p(x=0, \tau) \cdot \frac{\partial \rho(x=0, \tau)}{\partial \tau} \right)$  как случайную переменную  $\xi$ .

Из системы (3) можно видеть, что эволюция мощности сигнала ( $\partial p/\partial x$ ) зависит от стандартных потерь сигнала (детерминированная часть) и от  $x$  (стохастическая часть). С целью улучшения качества сигнала необходимо

минимизировать влияние на сигнал члена  $\xi = \frac{\partial}{\partial \tau} \left( p \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \right)$ . С точки зрения статистики можно показать, что, если число OFDM-подканалов в начальном сигнале большое, то  $E[\partial^n \rho / \partial \tau^n] = 0$  для любого  $n > 0$  ( $E[x]$  – математическое ожидание случайной величины  $x$ ). Тогда  $E[\xi] = 0$ . Обозначим за  $\sigma_\xi = \sqrt{E[\xi^2]}$  среднеквадратичное отклонение  $\xi$ . Можно видеть, что  $\sigma_\xi$  пропорционально мощности сигнала. Также  $\sigma_\xi$  зависит от пиков мощности, поскольку в пиковых точках производные сигнала велики. При оптимизации передачи сигнала (например, при адаптивной модуляции 256-QAM и 1024-QAM сигналов)  $\sigma_\xi$  можно рассматривать как индикатор, способный усовершенствовать процесс оптимизации: достаточно только построить начальные сигналы и сравнить их по величине  $\sigma_\xi$  с целью определения, какой из них имеет минимальную  $\sigma_\xi$ .

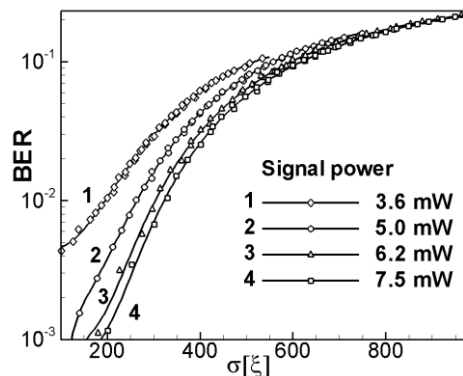


Рис. 2. Зависимость BER от среднеквадратичного отклонения  $\xi$ .

Были проведены численные расчеты передачи 16-QAM-OFDM сигнала с 1024 подканалами по линии, состоящей из 10 периодических секций (рис. 1) длиной 100 км каждая. На рис. 2 показана зависимость частоты битовых ошибок после 1000 км от  $\sigma_\xi$  для различных начальных сигналов. Можно легко заметить, что BER растет экспоненциально с ростом  $\sigma_\xi$ . Для оптимизации свойств ВОЛС при помощи адаптивной модуляции [3] и предложенного в ходе данного исследования метода достаточно получить начальный сигнал при помощи одного из методов адаптивной модуляции, а затем оценить  $\sqrt{E[\xi^2]}$  для наборов вероятностей, дающих желаемую избыточность выходного кода, и выбрать набор с наименьшим  $\sqrt{E[\xi^2]}$ .

Работа Скидина А.С. (теоретический анализ) была выполнена при поддержке проекта РФФИ №18-31-20027. Работа Сидельникова О.С. была поддержана государственным заданием на проведение фундаментальных исследований №FSUS-2020-0034.

## Литература

- [1] J.C.Cartledge, F.P.Guioimar, et al. *Opt. Express* **25**, 1916–1936 (2017).
- [2] A. Skidin, O. S. Sidelnikov, et al. *Opt. Express* **24**, 30296–30308 (2016).
- [3] J.Cho, P.J. Winzer, *J. Lightwave Technol.* **37**, 1590–1607 (2019).