

## Специализированные методы обработки сигнала в современных волоконно-оптических линиях связи

Скидин А.С.<sup>1,2,\*</sup>, Федорук М.П.<sup>1,2</sup>, Турицын С.К.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

<sup>2</sup> Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

<sup>3</sup> Университет Астона, г. Бирмингем, Великобритания

\*E-mail: ask@skidin.org

Современные волоконно-оптические системы связи способны передавать сигнал со скоростями порядка 10 Тбит/с и выше. Одним из перспективных методов модуляции сигнала, позволяющих достичь такую скорость, является оптическая ортогональная частотная модуляция (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [1-4], в которой каждый из частотных каналов использует множество несущих частот (подканалов), способных передавать свои собственные информационные потоки; в этом контексте каждый канал, содержащий множество несущих частот, иногда называется суперканалом.

Одной из главных проблем применения OFDM является высокий уровень флуктуаций мощности – высокое отношение пиковой мощности к средней (PAPR – Peak-to-Average Power Ratio), возникающее из-за интерференции разных частот в суперканале. Проблема возникает при усилении сигнала с большим PAPR, поскольку коэффициент усиления начинает зависеть от входной мощности сигнала, что крайне нежелательно в сложных информационных сетях.

Данная проблема достаточно давно изучается в контексте радиосвязи. Предложено множество методов, сочетающих в себе использование пустых последовательностей в передаваемом потоке, технику частичной передачи информации по дополнительным каналам (подканалам), технику избирательного отображения (SLM – Selective Mapping Method) и других [5-8]. Так, метод отображения генерирует несколько последовательностей, из которых «на выход» (то есть на вход генератора сигнала) идёт лишь одна, с минимальным PAPR. В настоящий момент наиболее эффективным методом снижения PAPR является метод вставки состояний (tone injection), при котором увеличивается количество состояний модуляции, таким образом каждый символ из базового набора может быть представлен несколькими способами, выбираемыми исходя из минимизации PAPR.

Ниже предлагается метод по снижению PAPR для OFDM-сигнала, основанный на выделении специальных частот, передающих «компенсирующий» сигнал.

Математически OFDM-сигнал может быть представлен в следующем виде:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=0}^{N-1} c_{k,l} \cdot \mu(t - k \cdot T_s) \cdot e^{i \frac{2\pi l}{T_s} t},$$

где  $T_s$  – длительность символа,  $c_{k,l}$  – представление  $k$ -го символа на  $l$ -м подканале,  $\mu(t)$  – оптический несущий сигнал, имеющий прямоугольную форму на промежутке  $0 < t \leq T_s$  (такая форма несущего импульса необходима для сохранения ортогональности между подканалами). Рассмотрим отдельный символ OFDM:

$$s(t) = \sum_{l=0}^{N-1} c_{0,l} \cdot e^{i \frac{2\pi l}{T_s} t}, 0 < t \leq T_s.$$

Отношение пиковой мощности к средней тесно связано с пиковым значением функции  $s(t)$ . В свою очередь, данное пиковое значение определяется совокупностью значений  $c_{0,l}$ . При большом количестве подканалов (больше 64) реальная и мнимая части данной функции могут рассматриваться в силу большого количества случайных факторов как случайные величины с гауссовым распределением.

Для компенсации PAPR разделим подканалы на информационные и «компенсационные». Пусть первых будет  $N-2K$ , вторых –  $2K$ . В этом случае сигнал будет

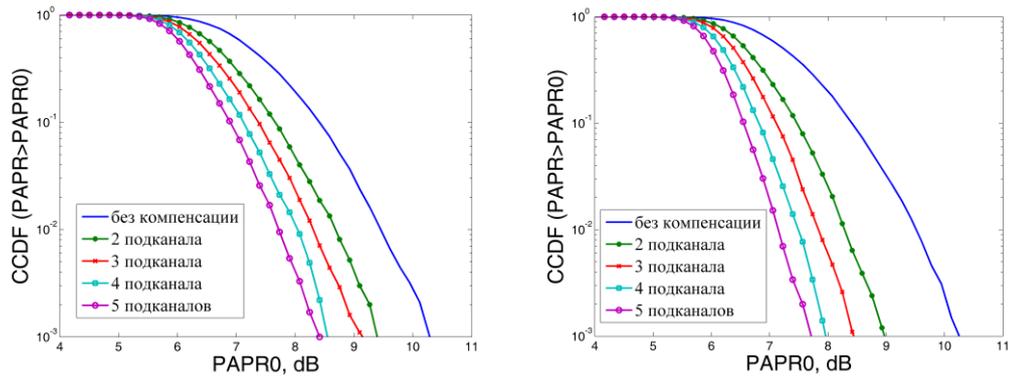


Рис. 1. Дополнительные интегральные функции распределения PAPR для OFDM-системы со 100 подканалами и различным количеством «компенсирующих» подканалов (формат модуляции QPSK). Слева – удвоенная мощность компенсирующих подканалов, справа – утроенная.

иметь вид (для  $K=1$ ):

$$s(t) = \sum_{l=0}^{N-3} c_{0,l} \cdot e^{i \frac{2\pi l}{T_s} t} + d_{0,1} \cdot e^{i \frac{2\pi(N-2)}{T_s} t} + d_{0,2} \cdot e^{i \frac{2\pi(N-1)}{T_s} t}, 0 < t \leq T_s.$$

Здесь подканалы  $N-2$  и  $N-1$  модулируются форматами BPSK и  $\pi/2$ -BPSK с пиковой мощностью  $s$ . BPSK порождает точки  $d_{k,1} \in \{(\sqrt{s}, 0); (-\sqrt{s}, 0)\}$ , сигнал  $\pi/2$ -BPSK представляется на фазовой плоскости точками  $d_{k,2} \in \{(0, \sqrt{s}); (0, -\sqrt{s})\}$  (это BPSK, точки которого повернуты на  $\pi/2$  относительно «классического» BPSK). Принцип действия такой схемы простой: чётные «компенсирующие» частоты компенсируют пики в действительной части суммы  $s(t)$ , нечётные – в мнимой части.

На рисунке 1 показаны результаты применения описанного метода к OFDM-системе, состоящей из 100 подканалов на одном канале шириной 25 ГГц. Формат модуляции, который был использован для демонстрации метода, – QPSK, как популярный формат модуляции, активно используемый в реально действующих линиях связи. Этот формат позволяет передавать сигнал на много тысяч километров без использования сложной цифровой обработки сигналов [9]. Были также проведены эксперименты для 16-QAM, 256-QAM. Установлено, что показатели по оптимизации мало отличаются от достигнутых на QPSK формате. Это связано с тем, что при наличии большого количества подканалов каждый отдельно взятый подканал вносит очень небольшой вклад в общее значение PAPR.

Предложенная схема формирования сигнала позволяет снизить уровень отношения пиковой мощности к средней до 7 дБ с использованием 2-5 подканалов с целью компенсации. Схема может быть настроена для любой конкретной OFDM-системы с разным количеством подканалов и частотным расстоянием между ними.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки (договор №14.В25.31.0003), а также РФФИ (проект №14-01-31160).

## Литература

- [1] L.E. Du et al., *OSA'2013*, **OW3B.5** (2013).
- [2] A.J. Lowery et al. *Opt. Fiber Tech. spec. edition*, **17**, **421** (2011).
- [3] R. Dischler et al. *ECOC'2010* (2010).
- [4] Z. Dong et al. *OFC'2011* (2011).
- [5] H.-G. Ruy et al., *IEEE Trans. Cons. Electronics*, **50**, **89** (2003).
- [6] J.-K. Hyung et al., *Proc. IEEE 58th Vehicular Technology Conference*, **3**, **1478** (2003).
- [7] C.-L. Wang et al., *IEEE J. Sel. Topics in Signal Processing*, **4(3)**, **637**, (2010).
- [8] C. Tuna et al., *Proc. IEEE Conf. on Signal Processing*, (2010).
- [9] Наний О.Е. и др., *Фотон-экспресс*, **3** (2012).