

## Технология OFDM и помехоустойчивое кодирование в телекоммуникационных системах миллиметрового диапазона волн

Д.А. Корбаков, И.И. Пятков

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
125009, Россия, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7  
korbakov@mail.ru, ivanpyatkov@gmail.com

*Предложено теоретическое описание технологии ортогонального частотного разделения с мультиплексированием совместно с помехоустойчивым канальным кодированием примененное к миллиметровому диапазону длин волн. Выполнено компьютерное моделирование широкополосной наземной телекоммуникационной системы миллиметрового диапазона в условиях многопутевой интерференции.*

*The theoretical description of technology OFDM for a millimeter range is offered. Computer modeling of broadband telecommunication system of a millimeter range in the conditions of a many path interference is executed. The aim of the paper is creation of digital telecommunication system model of a millimeter range, functioning in the conditions of a city.*

### Спектральный метод

Зависимость комплексной амплитуды  $E(x, \rho)$  поля узкого пучка в приближении Френеля было получено как решение волнового уравнения по Релею для углового спектра в виде преобразования Фурье-Бесселя произведения углового спектра  $\dot{E}(u)$  плоских волн, распределения комплексной амплитуды поля  $E(x, 0)$  на апертуре антенны и угловой спектральной характеристики  $K(x, u)$  слоя свободного пространства трассы записываемого в виде:

$$E(x, \rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \dot{E}(u) K(x, u) u J_0(u\rho) du, \quad (1)$$

где  $K(x, u) = \exp\left(\frac{iu^2 x}{2k}\right) \exp(ikx)$ .



Рис. 1. Амплитуда ограниченного гауссова пучка в геометрооптической, френелевской и на начальном участке волновой зоны,  $\lambda = 7.5 \cdot 10^{-3}$  м

Зависимость от расстояния  $x$  нормированной амплитуды  $A(x,0)$  на оси пучка получается из (1) при  $\rho = 0$  как модуль преобразования Френеля углового спектра в виде:

$$A(x,0) = \frac{|E(x,0)|}{E_0} = \frac{1}{2\pi} \left| \int_0^{\infty} E(u) \exp\left(-i \frac{u^2 x}{2k}\right) u du \right| \quad (2)$$

Кривая на рис.1 иллюстрирует границу перехода от осцилляций в зоне Френеля  $0.1 < P \leq 1$  к волновой зоне  $P > 1$ , где зависимость амплитуды на оси пучка обратно пропорциональна расстоянию  $x$ , как у всенаправленной сферической волны [1].

### Ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием

Ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) подобно частотному разделению каналов с мультиплексированием (FDM) за исключением того, что  $N$  поднесущих являются ортогональными между собой в каждом символе длительностью  $T_s$  [2]. Ортогональность несущих означает, что эти частоты удовлетворяют следующему требованию:

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}, k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

OFDM сигнал представляется как сумма  $N$  отдельно модулируемых поднесущих:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} d_{n,k} g_k(t - nT_s), \quad (4)$$

где  $g_k(t), k = 0, 1, \dots, N-1$  представляет собой  $N$  несущих получаемых уравнением:

$$g_k(t) = e^{j2\pi f_k t}, t \in [0, T_s) \quad (5)$$

Сигнал, переданный на  $n$ -ом сигнальном интервале, описывается как  $n$ -ый OFDM фрейм:

$$F_n(t) = \sum_{k=0}^{N-1} d_{n,k} g_k(t - nT_s) \quad (6)$$

Видно, что  $n$ -ый OFDM фрейм  $F_n(t)$  состоит из  $N$  символов, каждый из которых смодулирован на одной из  $N$  ортогональных поднесущих.

### Компьютерное моделирование приемопередающего устройства ММВ с помехозащищенным кодированием

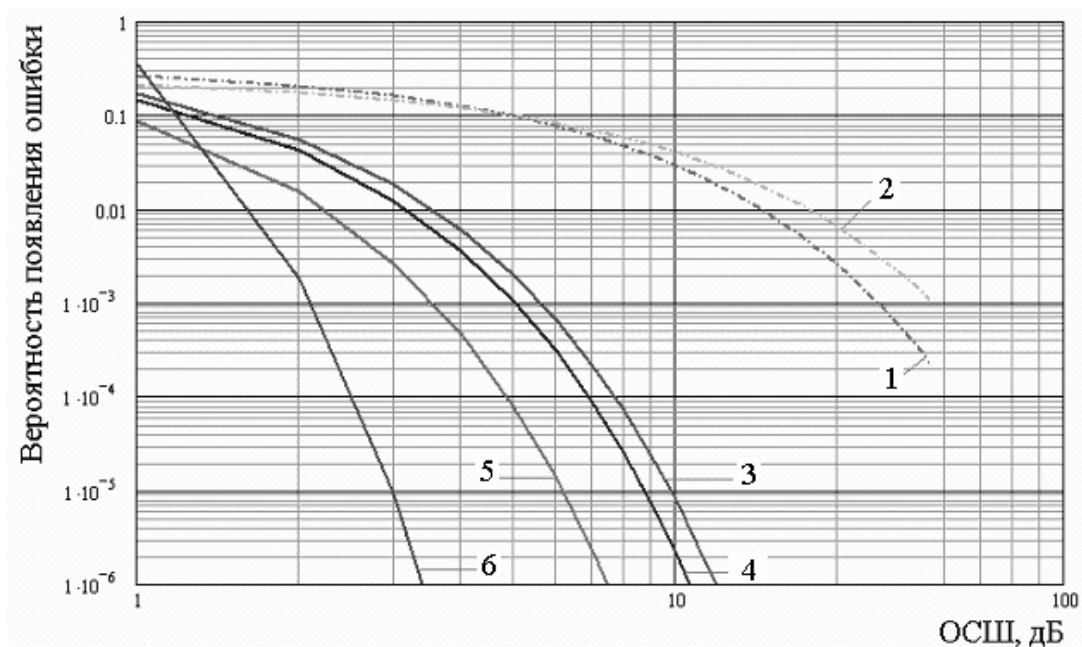
На основе стандарта IEEE 802.16 в среде программирования MATLAB была разработана модель OFDM приемопередатчика миллиметрового диапазона волн. Исследовалась вероятность появления ошибки при окончательном декодировании в приемной части устройства при различных вариантах компоновки модели. Помимо этого исследовалось влияние разности хода лучей при двухпучковой интерференции на длину защитного интервала в OFDM символе.

В исследуемой модели OFDM приемопередатчика выполнялись следующие функции:

- кодирование: Рида-Соломона (RS), сверточное кодирование (Convolutional Encoding, CE), коды с низкой плотностью проверок на чётность (Low Density Parity Code, LDPC) [3];

- модуляция: 2PSK, 4PSK, QPSK;
- обратное БПФ;
- добавление циклического префикса для борьбы с многопутевым распространением.

На рис. 2 приведена зависимость вероятности появления ошибки в зависимости от отношения сигнал-шум при различных видах кодирования и модуляции.



**Рис. 2. Вероятность появления ошибки**  
 1 – 2PSK, 2 – 4PSK, 3 – QPSK, 4 – QPSK + CE, 5 – QPSK + CE + RS, 6 – LDPC

### Заключение

Выполнено компьютерное моделирование широкополосной наземной телекоммуникационной системы миллиметрового диапазона в условиях многопутевой интерференции. Из результатов моделирования видно, что для пакетной передачи данных (64 Кбит, протокол TCP/IP) в миллиметровом диапазоне волн целесообразно использовать коды с низкой плотностью проверок на чётность при скорости кодирования  $1/2$ , вид модуляции QPSK, 256 поднесущих частот с защитным интервалом  $1/4$ . При таких параметрах модель телекоммуникационной системы показала наименьшую вероятность появления ошибки в условиях многопутевой интерференции.

### Литература

1. Андреев Г.А., Корбаков Д.А. // РЭ, 2005, т.50, №5, с. 564
2. Ramjee Prasad, OFDM for Wireless Communications Systems, Artech House Pub., 2004
3. Кларк Дж., Кейн Дж., Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи, М: Радио и связь, 1987