

Лукин А.В., Сидорчук В.П., Леншин А.В.
 ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
 г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а
 andrey-lenshin@yandex.ru

Алгоритм формирования сигналов с неортогональным частотным уплотнением на основе обратного быстрого преобразования Фурье

Современные системы высокоскоростной передачи различной информации в цифровой форме создаются, как правило, на основе технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), включающей программную реализацию основных блоков приемных и передающих устройств [1], что легло в основу построения не только гражданских систем беспроводной связи стандартов IEEE802.11 (Wi-Fi) и IEEE802.16 (WiMAX), но и военных систем тактической и оперативно-тактической радиосвязи. В сетях пятого поколения (5G) появилась потребность в увеличении объема трафика и скорости информационного обмена [2]. В качестве альтернативы OFDM-сигналам на настоящий момент рассматриваются спектрально-эффективные сигналы с неортогональным частотным уплотнением (SEFDM – Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing), позволяющие обеспечить увеличение спектральной эффективности в несколько раз. Алгоритмы приема SEFDM-сигналов описываются в работе [3]. Массовое внедрение технологии OFDM [1] в системах связи началось сравнительно недавно благодаря появлению цифровых микросхем, способных эффективно осуществлять быстрое преобразование Фурье (БПФ или FFT – Fast Fourier Transform) [4].

В общем случае передаваемый сигнал OFDM можно записать следующим образом

$$s_{\text{OFDM}}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cos[2\pi(f + k/T)t + \arg(X_k)], \quad (1)$$

где X_k – передаваемые информационные символы; N – количество поднесущих частот; T – длительность OFDM-символа.

Сигнал с неортогональным частотным уплотнением можно представить в виде

$$s_{\text{SEFDM}}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k(t) \exp(j2\pi\Delta f k t), \quad (2)$$

где Δf – разнесение соседних поднесущих частот; $C_k(t)$ – комплексная функция, показывающая комплексные модуляционные символы и огибающую k -ой поднесущей во времени, $C_k(t) = \text{const}(t) = C_N^{(n)}(k)$ при $t \in [(n-1)T; nT]$, $n \in N$; $C_N^{(n)}(k)$ – манипуляционный символ, соответствующий n -ому символу сигнала с частотным мультиплексированием (FDM – Frequency Division Multiplexing); $T = 1/\Delta f_{\text{ORT}}$ – длительность FDM-символа; Δf_{ORT} – разнесение между поднесущими частотами, обеспечивающее их ортогональность.

В целях минимизации искажений в результате фильтрации в системах с частотным мультиплексированием применяются защитные интервалы по частоте

$$C_N^{(n)}(k) = 0, \text{ при } k \in [0; N_L - 1] \text{ и } k \in [N - N_R; N - 1]. \quad (3)$$

Одной из важнейших характеристик сигналов с частотным мультиплексированием является нормированный частотный разнос между сигналами на соседних поднесущих

$$\alpha = \Delta f T = \Delta f / \Delta f_{\text{ORT}}. \quad (4)$$

Величина, обратная α , определяется как коэффициент уплотнения $\beta = 1/\alpha$ [5].

Для формирования SEFDM-сигналов используется обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ) [4]. Формирование SEFDM-сигнала происходит путем отбрасывания временных отсчетов с выхода ОБПФ. На вход модулятора поступают биты передаваемых данных (информационные биты), где они подвергаются модуляции QPSK или QAM-64. С выхода модулятора на вход мультиплексора (MUX) поступают уже комплексные модуляционные символы $C_N^{(n)}(k)$, ($k \in [0; N - 1]$). MUX преобразует последовательный поток модуляционных

символов в параллельный, тем самым обеспечивая работу N -мерного ОБПФ. Перед ОБПФ к полученному сигналу добавляется защитный интервал в виде нулевых отсчетов «справа» и «слева» от массива данных. С выхода ОБПФ происходит операция «урезания» ($N - L$) отсчетов при фиксированной длительности всего символа, что определяет коэффициент уплотнения поднесущих $\alpha = L/N$.

Далее отсчеты сигнала во временной области поступают на демультиплексор (DMUX), который преобразует их в последовательные временные отсчеты. Таким образом, основное отличие в схеме формирования SEFDM-сигналов от OFDM заключается в наличии операции «урезания» потока с выхода ОБПФ до L отсчетов. Структурная схема алгоритма формирования SEFDM-сигналов представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Структурная схема алгоритма формирования SEFDM-сигналов

Информационные биты подвергаются квадратурной фазовой манипуляции (QPSK – Quadrature Phase Shift Keying) или квадратурной амплитудной модуляции QAM-64 (QAM – Quadrature Amplitude Modulation), образуя модуляционные символы (отсчеты). При накоплении требуемого количества отсчетов (N_{iff}) происходит их мультиплексирование (преобразование последовательного потока отсчетов в N_{iff} параллельных потоков). Далее к этому параллельному потоку отсчетов «справа» и «слева» добавляются нулевые отсчеты, представляющие собой защитный интервал в частотной области. Полученный массив отсчетов подвергается ОБПФ, затем происходит отбрасывание крайних $N_{iff} - L$ отсчетов. Оставшийся массив преобразуется в последовательность данных с помощью демультиплексора.

Литература

1. Дядюнов Н.Г., Сенин А.И. Ортогональные и квазиортогональные сигналы. – М.: Связь, 1977. – 224 с.
2. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. – М: Горячая линия–Телеком, 2018. – 280 с.
3. I. Kanaras, A. Chorti, M. Rodrigues, I. Darwazeh. An Investigation of Semidefinite Programming Detection for a non-orthogonal FDM system // 20th Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Conference IEEE – PIMRC' 09. Japan. Tokyo. – September 2009. – P. 2827–2832.
4. Солонина А.И., Арбузов С.М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB // СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.
5. Кислицын А.Б., Рашич А.В. Формирование и прием спектрально-эффективных многочастотных сигналов с неортогональным частотным уплотнением на основе БПФ/ОБПФ уменьшенной размерности // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – № 7. – Т. 19. – С. 46–53.
6. Сидорчук В.П., Зезюлин А.А., Лукин А.В. Формирование и прием сигналов с неортогональным частотным уплотнением на основе дискретного преобразования Фурье // Сборник научных статей по материалам VI Международной НПК «Академические Жуковские чтения». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. – С. 295–300.