

УДК 621.396

ФОРМИРОВАНИЕ ПИЛОТНЫХ КАНАЛОВ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМАХ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПИК-ФАКТОРА В УСЛОВИЯХ ЧАСТОТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Рудько Александр Сергеевич,

канд. техн. наук,

доцент кафедры математики и информатики,

e-mail: Alexrudko84@yandex.ru,

Московский университет им. С.Ю. Витте,

г. Москва

Рассмотрены вопросы максимального использования частотного ресурса сверхширокополосных сигналов с ортогонально-частотным мультиплексированием для последующего резервирования тона и уменьшения пик-фактора сигнала.

Ключевые слова: радиосигнал, пик-фактор сигнала, сверхширокополосный сигнал, ортогонально-частотное мультиплексирование

FORMATION OF PILOT CHANNELS IN ULTRA-WIDEBAND SYSTEMS WITH ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING TO REDUCE THE PEAK FACTOR IN THE CONDITIONS OF FREQUENCY LIMITS

Rudko A.S.,

candidate of technical sciences,

Associate Professor at the department of mathematics and informatics,

e-mail: Alexrudko84@yandex.ru,

Moscow Witte University

The issues of maximum use of the frequency resource of ultra-wideband signals with orthogonally frequency multiplexing for subsequent tone redundancy and reduction of the peak factor of the signal are considered.

Keywords: radio signal, the peak factor of the signal, UWB signal, orthogonal-frequency division multiplexing

DOI 10.21777/2500-2112-2018-2-73-77

В современных цифровых системах радиопередачи данных широко используются сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM), которые позволяют достичь высокой скорости передачи данных, сохраняя высокую помехоустойчивость приёма даже в условиях многолучевого распространения.

В настоящее время мультиплексирование с ортогональным частотным уплотнением каналов – наиболее широко используемая технология в современных широкополосных системах связи. Ортогональное частотное мультиплексирование применяется в таких системах передачи данных как WiFi, WiMAX, LTE, и вещательных системах DVB-T, DVB-T2, ISDB-T, ISDB-S, DTMB, DAB, DRM.

OFDM представляет собой метод передачи данных, при котором поток передаваемых данных распределяется по множеству частотных несущих и передается параллельно (рисунок 1). Каждая несущая может модулироваться независимо от других различными способами. Существенным преимуществом OFDM-сигналов является высокая стойкость к многолучевому распространению. Это обусловлено относительно большими длительностями импульсов в каждом ортогональном частотном канале (ширина отдельного канала уже всей выделенной полосы частот), что позволяет уменьшить потенциальную по-

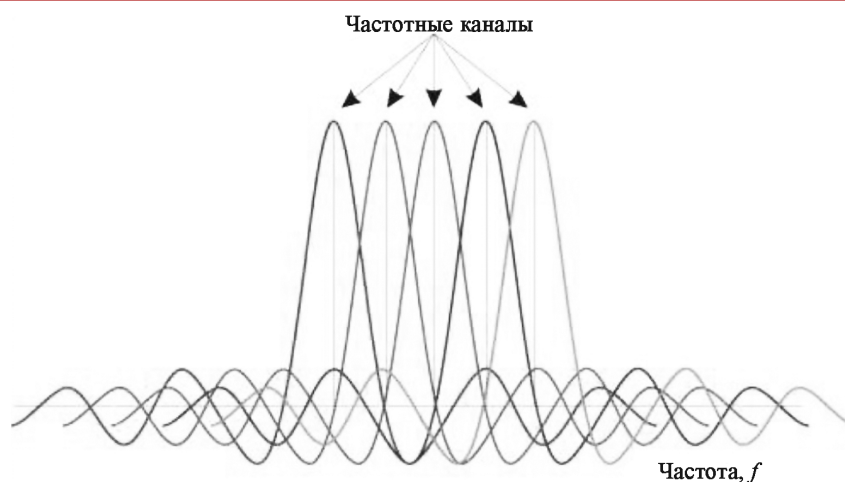


Рисунок 1 – Спектр сигнала с ортогонально-частотным мультиплексированием

лосу когерентности каждого канала, возможностью выделения одного или нескольких пилотных каналов для зондирования задержек и амплитудных ослаблений каждой из ветвей распространения, возможность адаптивно перераспределять информационные потоки между ортогональными несущими, в зависимости от внешних факторов. Применение Rake-приемников для OFDM-сигналов позволяет снизить влияние замираний, которые способны существенно ухудшить качество информационного обмена для подвижных объектов.

Одним из главных недостатков систем передачи данных, основанных на ортогональном частотном мультиплексировании, является высокий пик-фактор OFDM-сигнала. В отличие от систем с одночастотной модуляцией, в системах с ортогональной частотной модуляцией выходной сигнал, поступающий на усилитель мощности, состоит одновременно из многих одночастотных сигналов, передаваемых на ортогональных частотах. В результате в отдельные моменты времени большое количество несущих колебаний может сложиться в фазе, что приведет к большому по амплитуде выбросу сигнала относительно его среднего уровня. Это, в свою очередь, приводит к высоким требованиям к линейности амплитудной характеристики усилителя мощности, необходимости использовать УМ с большим запасом по мощности. Не выполнение этих требований приводит к искажениям и, как следствие, повышению уровня межканальной интерференции.

Известны различные методы снижения пик-фактора, такие как:

- 1) методы, основанные на ограничении амплитуды;
- 2) методы, основанные на кодировании;
- 3) вероятностные методы, в том числе метод селективного отображения;
- 4) метод резервирования тона;
- 5) метод инжектирования тона;
- 6) метод активного расширения созвездия.

Анализ приведенных методов показывает высокую эффективность метода резервирования тона, позволяющего при достаточной частотной избыточности снижать пик-фактор сигнала для требуемого уровня. Суть метода резервирования тона заключается в том, что в полосе сигнала выделяется набор зарезервированных несущих с индексами $j=1,2,\dots,N$, которые не будут использоваться как информационные или служебные. Этот набор несущих должен быть заранее известным приёмнику, который, в сущности, будет игнорировать сигнал на этих частотах.

После того, как сформирован OFDM-символ, формируется корректирующий сигнал, который в частотной области имеет ненулевые составляющие только на резервированных несущих. Корректирующий сигнал формируется итеративно, при этом он добавляется к исходному сигналу, за счет чего происходит снижение пик-фактора. С точки зрения частотного ресурса сигнал, излучаемый в эфир, содержит на резервированных несущих бесполезные для приёмника компоненты. Следовательно, при применении метода резервирования тона происходит размен полосы сигнала на снижение пик-фактора. Также необходимо учитывать, что средняя мощность сигнала после добавления корректирующего сигнала вырастает.

Резервирование частотных составляющих для уменьшения пик-фактора в системах, требующих передачи данных с высокими скоростями и низкой вероятностью ошибки на бит, возможно, в условиях частотной избыточности (часть ортогональных частотно разделенных каналов отводится не для передачи данных, а для корректировки пик-фактора). Один из путей достижения высокой частотной избыточности является применение сверхширокополосных сигналов для систем, передающих данных на небольшие расстояния.

Несмотря на достаточно большой частотный ресурс, решение государственной комиссии по радиочастотам Российской Федерации (ГКРЧ РФ) № 09-05-02 от 19 марта 2009 года разрешает использовать для работы занятые диапазоны частот в сантиметровом диапазоне (рисунок 2). Ограничения на эквивалентную изотропно-излучаемую мощность для сверхширокополосных сигналов достаточно жесткие и для обеспечения требований совместной работы различными радиоустройствами необходим обмен частотного на энергетический ресурс. В этой связи необходимо применять сигналы, которые максимально используют весь выделенный ресурс.

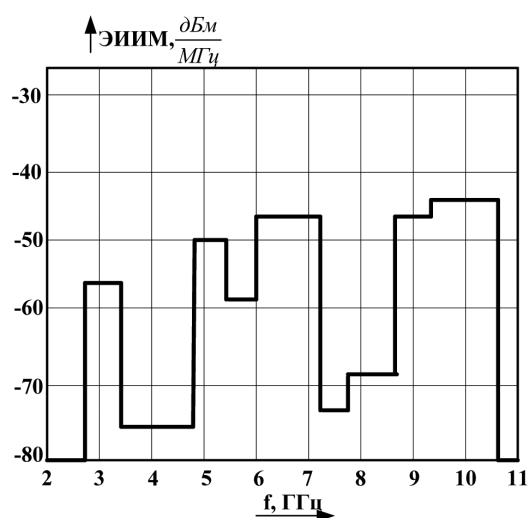


Рисунок 2 – Ограничения на эквивалентную изотропно-излучаемую мощность для сверхширокополосных сигналов

Рассмотрим предельный (идеальный случай), когда каждый из ортогональных сверхширокополосных каналов формируется путем прохождения дельта импульса через идеальный полосовой фильтр (ИПФ).

Поскольку ИПФ является линейной системой, то для него применим принцип суперпозиции сигналов, и эквивалентной схемой такого фильтра будет являться схема, состоящая из двух идеальных фильтров нижних частот (ИФНЧ) и вычитающего устройства (рисунок 3). Выходной сигнал во временной области в этом случае описывается выражением:

$$S(t) = \frac{2f_a \sin(2\pi f_a t)}{2\pi f_a t} - \frac{2f_i \sin(2\pi f_i t)}{2\pi f_i t}, \quad (1)$$

где f_a, f_i – частоты среза ИФНЧ1 и ИФНЧ2 соответственно.

В результате ортогонального комплексирования можно сформировать 14 каналов по 500 МГц каждый, приведённых на рисунке 4.

Отношение частот среза формирующих фильтров каждого канала составляют $1,05 \leq \frac{f_a}{f_i} \leq 1,17$,

примеры двух идеальных ортогональных сверхширокополосных импульсов, полученных при прохождении дельта импульсов через ИПФ с частотами среза 3 ГГц – 3,5 ГГц и 3,5 ГГц – 4 ГГц (рисунок 5).

Анализ положений нулей предложенных ортогональных сигналов позволяет сделать вывод, что классические методы формирования и передачи сигналов, сформулированные В. Котельниковым и Г. Найквистом, не позволят достичь высокой скорости передачи информационных посылок в усло-

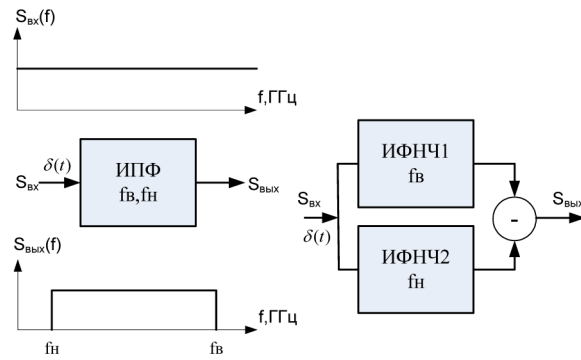


Рисунок 3 – Эквивалентная схема идеального полосового фильтра

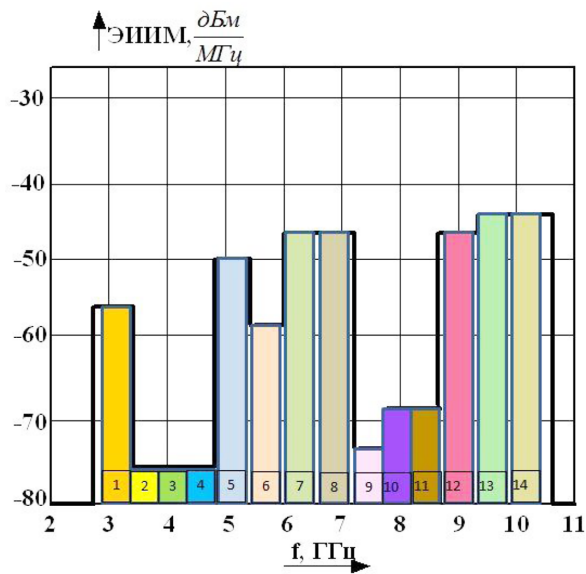


Рисунок 4 – Частотное распределение сверхширокополосных каналов

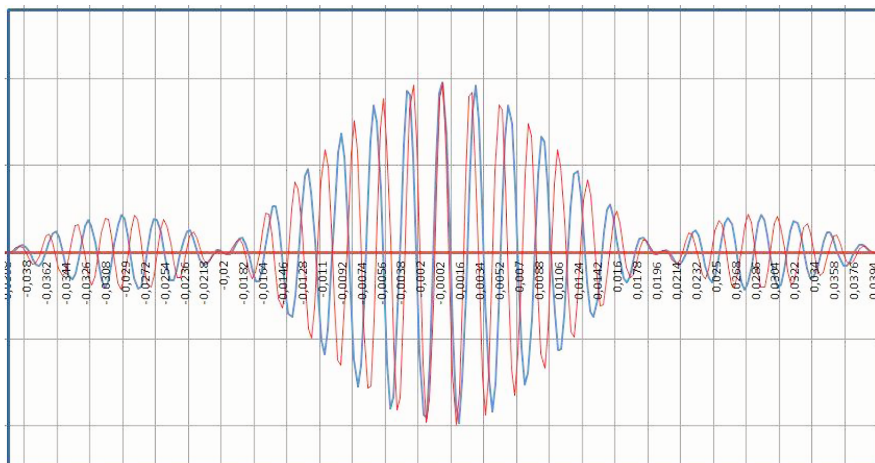


Рисунок 5 – Ортогональные сверхширокополосные импульсы

вии отсутствия межсимвольной интерференции. Аналитическое моделирование показало возможность передачи информационных посылок при помощи квазипериодической передачи, при этом освободившийся время-частотный ресурс можно использовать для формирования пилотных каналов.

Выводы

1. В настоящее время широкое применение в радиосвязи получили сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием.

2. Для эффективного снижения пик-фактора сигнала с ортогональным частотным мультиплексированием необходимо применять метод резервирования тона.
3. Сверхширокополосные сигналы могут применяться для расширения время-частотного ресурса, необходимого для резервирования тона.
4. Метод резервирования тона может применяться для формирования пилотных каналов дополнительной синхронизации сигналов.
5. Классические методы формирования и передачи сигналов не позволят достичь максимума скорости передачи информационных посылок в условии отсутствия межсимвольной интерференции.

Список литературы

1. *Левченко А.С., Митягин К.С.* Модифицированный метод резервирования тона для OFDM сигнала с малым числом несущих [Электронный ресурс] // Журнал Радиоэлектроники. – М.: 2017. – 6. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/9/text.pdf>.
2. *Рудько А.С., Мацькин С.В., Осипов В.В.* Особенности работы сверхширокополосных систем информационного обмена в арктических районах Российской Федерации // Современные проблемы управления природными ресурсами и развитием социально-экономических систем: материалы XII международной научной конференции; в 4-х ч. – М.: изд. ЧОУВО «МУ им. С.Ю. Витте», 2016. – Ч. 1.
3. *Рудько А.С., Филатов В.И., Немчанинов А.С.* Способ передачи данных по радиоканалу сверхширокополосным импульсным сигналом в космических системах связи // T-Comm Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – т. 11. – № 2. – С. 4–9.

References

1. *Levchenko A.S., Mityagin K.S.* Modificirovannyj metod rezervirovaniya tona dlya OFDM signala s malym chislom nesushchih // Zhurnal Radioehlektroniki [ehlektronnyj resurs] – М.: 2017. – V. 6. – Rezhim dostupa: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/9/text.pdf>.
2. *Rud'ko A.S., Masykin S.V., Osipov V.V.* Osobennosti raboty sverhshirokopolosnyh sistem informacionnogo obmena v arkticheskikh rajonah Rossijskoj Federacii // Sovremennyye problemy upravleniya prirodnyimi resursami i razvitiem social'no-ehkonomicheskikh sistem: materialy XII mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii; v 4-h ch. – М.: изд. CHOUVO «MU im. S.Yu. Vitte», 2016. – Ch. 1.
3. *Rud'ko A.S., Filatov V.I., Nemchaninov A.S.* Sposob peredachi dannyh po radiokanalul sverhshirokopolosnym impul'snym signalom v kosmicheskikh sistemah svyazi // T-Comm Telekomunikacii i transport. – 2017. – t. 11. – № 2. – s. 4–9.