

УДК 621.391

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ

Фещенко М.Ю.

Науковий керівник – к.т.н., доц. Горелов Д.Ю.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
каф. МІРЕС, м. Харків, Україна

тел. +38 (057) 70-21-587, e-mail: maksym.feshchenko@nure.ua

The spectral efficiency and interference immunity of OFDM, SEFDM, CMT and SMT signals were investigated. In the studies of spectral efficiency, the frequency band, the level of sidelobes. In immunity studies, the required signal-to-noise ratio was estimated to ensure a BER of 0.000001.

Наразі базовою технологією побудови мереж широкопasmового радіодоступу є OFDM. Проте для перспективних мереж сигнали OFDM використовувати не перспективно. По-перше, сигнали з OFDM є високочутливими до розстроювання частоти і фазового шуму. Також у разі появи значного доплерівського ефекту в OFDM сигналі відбувається зміна значення центральної носійної частоти, що призводить до порушення ортогональності його носієвих частот. По-друге, при значній кількості носійних високі значення пікової потужності при порівняно низькому рівні середньої потужності негативно позначаються на роботі підсилювачів. По-третє, високий рівень позасмугових випромінювань сигналів, отже, сигнал на одній носійній може бути прийнятий в суміжних каналах.

В роботі наведено результати дослідження перспективних технологій формування багаточастотних сигналів, що побудовані на OFDM модуляції.

Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing (SEFDM) – це технологія, в якій для підвищення спектральної ефективності при незмінній швидкості передачі символів скорочуються частотний інтервал між носійними. Технічно SEFDM система може бути побудована з окремих OFDM систем. На рис. 1 великі вертикальні подвійні стрілки відображають носійні OFDM системи з символічним періодом T і частотним інтервалом F . Маленькі одиночні стрілки відповідають частотам SEFDM системи з тим ж символічним періодом і частотним інтервалом $0.75F$. SEFDM частоти, позначені цифрами 1 на горизонтальній вісі, точно узгоджуються з OFDM частотами, розділеними інтервалом $3F$.

Filter Bank Multicarrier (FBMC) є одним із найвідоміших методів модуляції з розширенням спектру. Дана модуляція забезпечує значну перевагу у формуванні кожної носійної та полегшує гнучке використання спектрального ресурсу, дозволяє задовольнити різним системним вимогам, таким як низька затримка, множинний доступ та інші.

Серед FBMC методів в першу чергу використовуваних для підвищення спектральної ефективності багаточастотних сигналів можна виділити

косинус-модульовані багаточастотні сигнали (СМТ – cosine modulated multitone) та багаточастотні сигнали зі зсувом квадратурних компонент (SMT – staggered multitone).

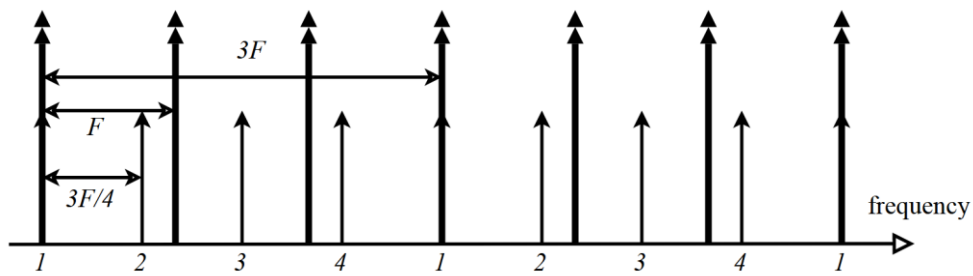


Рисунок 1

Для СМТ сигналів (рис. 2) імпульсна характеристика формуючого фільтру є добутком (произведением) функції косинус та імпульсної характеристики НЧ фільтру прототипу, наприклад, *sinc* у разі ідеального ФНЧ.

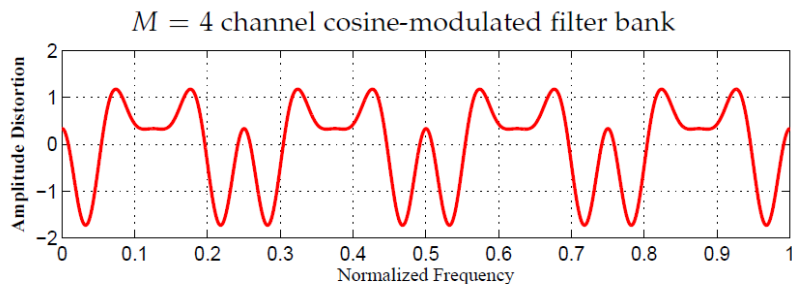


Рисунок 2

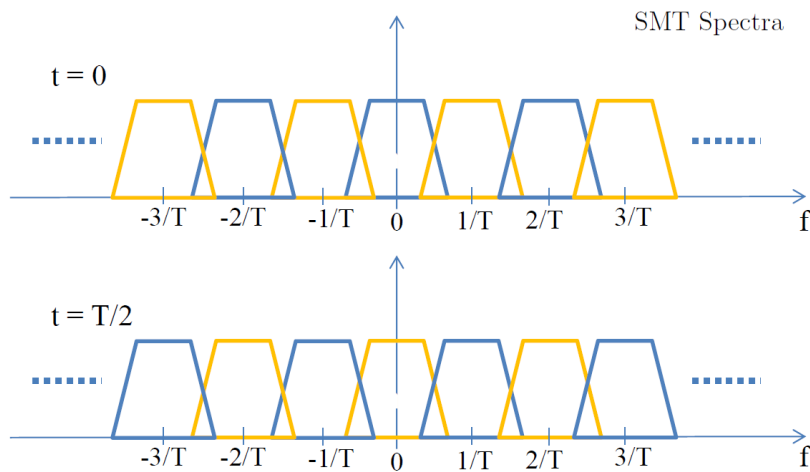


Рисунок 3

На рис. 3 наведено приклад спектрів SMT компонент. Сині спектри позначають носійні, які мають фазовий зсув із парним коефіцієнтом $\pi/2$, тоді як помаранчеві спектри відповідають носійним з фазовим зсувом із непарним коефіцієнтом $\pi/2$. Через кожний інтервал часу $T/2$ фазовий зсув $\pi/2$ застосовується до сусідніх носійних, ніби змінюючи в часі. Таким чи-

ном, ефективність пропускної здатності підвищується в 2 рази.

Імітаційне моделювання дослідних видів модуляції проводилось в MatLab. Тривалість символів OFDM було обрано рівною 12.8 мкс. Використовувався циклічний префікс, який становив 25 % тривалості OFDM сигналу. Оскільки в CMT, SMT та SEFDM сигналах циклічний префікс не використовується, то тривалість символів було обрано рівною 16 мкс. В такому разі при різній сигнальній швидкості швидкість передачі інформації для усіх дослідних систем зв'язку буде однаковою.

Для методів CMT, SMT і SEFDM алгоритм формування спектру наступний: 200 смуг по $1/16$ мкс=62.5 кГц, тобто 12.5 МГц, та 2 захисних інтервали по $28/16=1.75$ МГц. Отже, загальна ширина спектру сигналу для CMT, SMT і SEFDM склала 16 МГц.

Результати оцінки рівня бічних пелюсток у спектрах сигналів наведено в табл. 1, стовпчики «ширина смуги за рівнем -35 дБ», «спектральна ефективність біт/с/Гц». Результати оцінки спектральної ефективності сигналів, з позиції кількості носійних шириною 78.125 кГц, що можна передати в смузі 20 МГц та рівнем бічних пелюсток -35дБ наведено в табл. 1, стовпчик «Кількість носійних». Результати оцінки завадостійкості прийому сигналів з OFDM, CMT, SMT і SEFDM, як значення ймовірності помилок прийому 10^6 біт інформаційної послідовності наведено на рис. 4. Тип використовуваної модуляції – QAM-16. Сигнал передавався по гаусівському каналу зв'язку.

Таблиця 1

Сигнал	Ширина смуги за рівнем -35 дБ	Спектральна ефективність біт/с/Гц	Кількість носійних
OFDM	20.7	2.26	194
SMT	17.2	2.91	232
CMT	16.3	3.07	240
SEFDM	15.9	3.14	248

Як можна бачити з табл.1 та рис. 4, сигнал з SEFDM у дослідженнях спектральної ефективності показав найкращі результати, поступившись лише 0.5 дБ за значенням завадостійкості OFDM сигналу. З незначним відставанням відносно сигналів з SEFDM розташувались сигнали, засновані на баках фільтрів FBMC: CMT та SMT. Дані сигнали показали приблизно рівні результати спектральної ефективності та завадостійкості. Також варто зазначити, що сигнали з CMT були завжди трохи кращими за сигнали з SMT, але не більше ніж на 10%.

Отже, сигнали з SEFDM і CMT найкраще підходять для формування сигналу в системах широкосмугового радіо доступу.

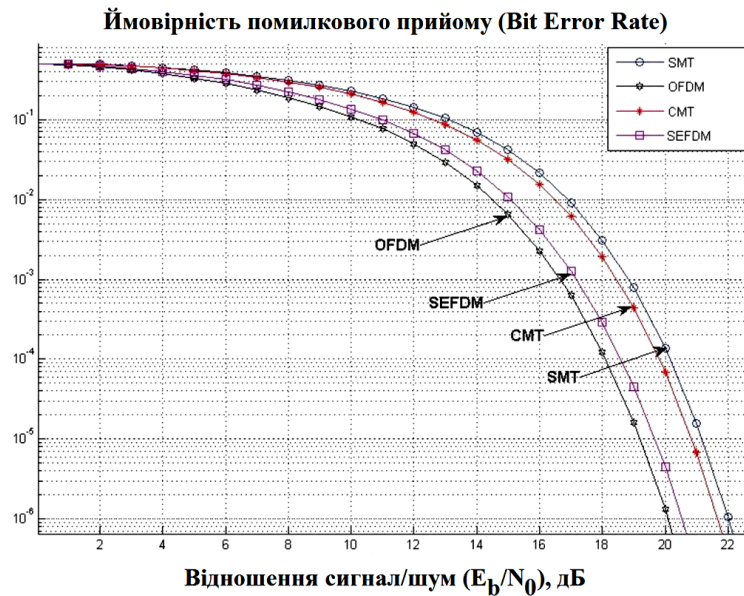


Рисунок 4

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ:

1. L. Lin and B. Farhang – Boroujenu. Cosine modulated multitone modulation for very high – speed digital subscriber lines // EURASIP J. Appl. Signal Processing, – 2006.
2. Ghannam H., Darwazeh I. SEFDM: Spectral efficiency upper bound and interference distribution. 2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), 2018, Pp. 1–6.
3. Behrouz Farhang – Boroujenu. Signal Processing Techniques for Software Radios// Lulu publishing house, 2010.
4. B. Farhang – Boroujenu. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier // IEEE Signal Processing Magazine, – 2011, – Vol. 28, № 3, – P. 92 – 112.
5. Обладнання радіодоступу (радіоінтерфейс передачі даних з використанням шумоподібних сигналів за стандартами IEEE Std IEEE 802.11a/b/g (IEEE Std IEEE 802.11-2007)). Додаток 3 до рішення НКРЗ від 23.10.2008 р. No 1174.
6. H. Liu. OFDM – Based Broadband Wireless Networks: Design and Optimization / Hui Liu, Guoqing Li – John Wiley & Sons Ltd., 2005 – 250 p.