

УДК 001.57

В.Ю. Соколов

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

## ПОРІВНЯННЯ МАТЕМАТИЧНИХ І ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ З ОРТОГОНАЛЬНИМ ЧАСТОТНИМ РОЗДІЛЕННЯМ

Зроблено спробу виявити відповідність різних моделей широкосмугових сигналів для вирішення різних задач. Показана відповідність моделей до матеріальних об'єктів. Розглянуто варіанти функціональних і математичної моделей.

**Ключові слова:** модель, широкосмуговий сигнал, ортогональне частотне розділення

### Постановка проблеми

Стрімкий розвиток каналів зв'язку призводить до збільшення кількості бездротових пристроїв, які працюють в одному просторі і на спільній смузі частот. Така ситуація з часом лише погіршується.

Ортогональне частотне розділення каналів з мультиплексуванням — OFDM (від англ. orthogonal frequency division multiplexing) застосовується для максимального використання частотного діапазону. За рахунок використання набору підканалів з їх частковим перекриттям досягається п'ятикратне збільшення швидкості передачі інформації у порівнянні з іншими видами модуляції.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спирається автор

У [1] показано застосування структурної моделі для OFDM, але не показано відношення до реальних об'єктів. Автор [2] розглядає моделювання для розширення спектру пристроїв 802.11b стандарту. В [3] зроблено спробу моделювати заваду для пристроїв за стандартом 802.11b/g від 802.15.1.

З розглянутого видно, що моделювання і реальні об'єкти не співставляються, або співствляються не адекватно.

### Формулювання мети статті

Дослідити можливість використання моделей для опису сигналів з ортогональним частотним розділенням. Виявити особливості різних видів моделей.

### Виклад основного матеріалу дослідження

При дослідженні використовувався 6-й канал з переліку рекомендованих (1-й, 6-й і 11-й) з серединою на частоті 2,437 ГГц. Для отримання даних використовувався аналізатор спектру Ubiquiti

AirView2 на мікроконтролері Chipcon CC2511-F32 з частотою дискретизації 500 кГц з програмним забезпеченням Sun Java 6 JRE (32-біт) на ОС Linux Ubuntu 10.04 [4]. Для візуалізації результатів застосований PHP-скрипт (версія інтерпретатора 5.3.3) і бібліотека Open Flash Chart (версія 2) [5].

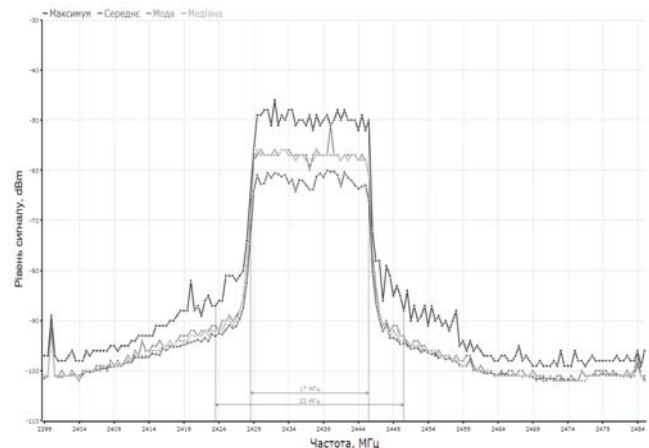


Рис. 1. Розподілення частот для швидкості 12 Мбіт/с

При аналізі спектру сигналу каналу з максимальним заповненням видно, що форма сигналу добре повторюється для середнього арифметичного значення, а також моди і медіани (рис. 1) [6]. Найкраще форму спектру передають максимальне значення і медіана (так як сума модулів відхилень значень від медіани мінімальна). Але при зменшенні кількості інформації, що передається в каналі (менше 50% заповнення каналу), різко погіршується форма спектру, отриманого з максимальних значень, а середнє, мода і медіана не перевищують рівня шуму (рис. 2). Таким чином, можна визначити, що присутній сигнал з OFDM-кодування, але важко проводити аналіз інших характеристик сигналу.

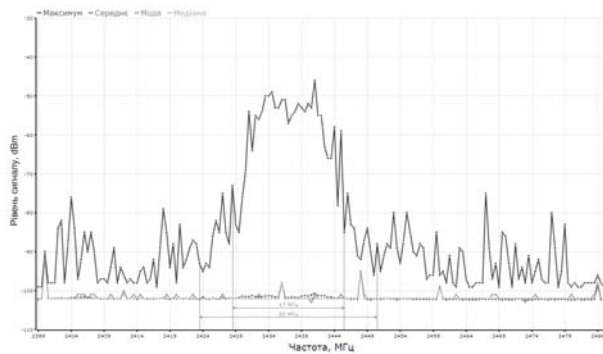


Рис. 2. Розподілення частот слабкого сигналу для швидкості 12 Мбіт/с

При малому рівні сигналів за спектром важко визначити тип модуляції: так, на рис. 4 другий канал працює з OFDM (802.11g), а одинадцятий з ССК (802.11b). Перекривання спектрів цих двох каналів відсутнє. На рис. 3 добре видно короткий імпульс перешкоди з шириною спектру ( $2 \div 2,5$ ) МГц, який відповідає перешкоді від верхньої гармоніки стільникового телефону або ZigBee-пристрою (802.15.4-2003).

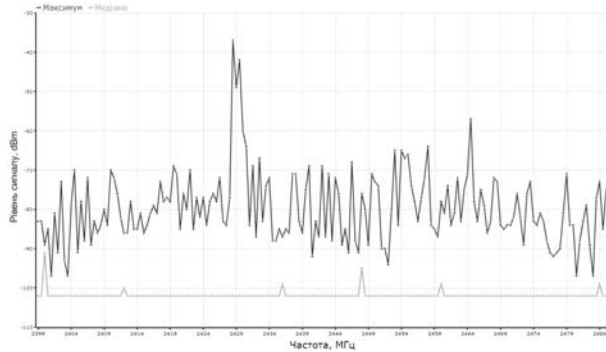


Рис. 3. Розподілення частот для двох каналів зі слабкими сигналами

### Аналіз спектру

Аналізатори спектру у діапазоні ( $2,4000 \div 2,4835$ ) ГГц можна умовно поділити на чотири класи:

- програмні за допомогою сканування каналів точками бездротового доступу або клієнтським обладнанням: 14 точок;
- програмні за допомогою сканування каналів Bluetooth-пристроями: 79 точок;
- низької вартості (low cost) за \$80-200: (170÷180) точок;
- саморобні на мікросхемах типу CC25xx до \$100: (170÷2100) точок;
- середньої вартості за \$3-10 тис.: 280 тис. точок;
- високої точності і широкого діапазону за \$50-100 тис.: до 83,5 мільйонів точок.

Крім того, у кожного аналізатора спектру є максимальна помилка розрахунку амплітуди, яка виникає через дискретизацію точок вимірювання.

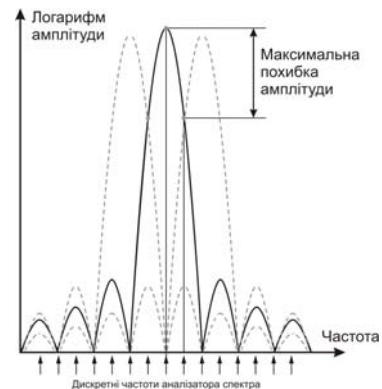


Рис. 4. Виникнення максимальної похибки при вимірюванні

У випадку сумірних – ширини підканалу (в нашому випадку: 312,5 кГц) і частоти дискретизації аналізатора спектру (500 кГц), ці точки можуть не співпадати як показано на рис. 5. З'являється похибка амплітуди, яку можна виміряти, порівнявши точки співпадіння (аналогічно до ефекту биття при накладенні двох коливань близької частоти) максимальних і мінімальних частот. На рисунку показані точки співпадіння: максимального сигналу догори і мінімального – вниз. З графіка видно, що максимальне значення становить  $-46$  dBm, а мінімальне –  $52$  dBm. Тобто абсолютна похибка вимірювання складає 6 dBm, а відносна – 11,5%.

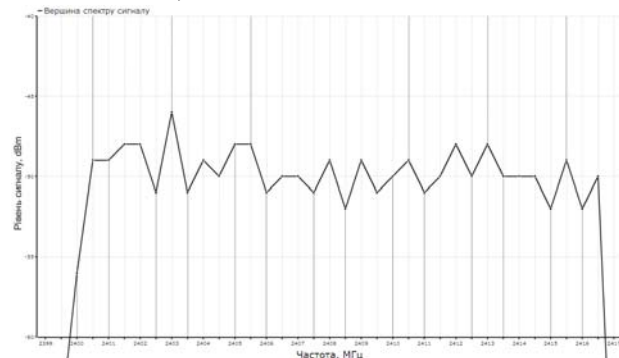


Рис. 5. Максимуми і мінімуми, які співпадають з точками аналізатора спектра

### Моделювання

Моделювання проводилося двома методами:

- за допомогою функціональної схеми, яка показана на рис. 6 (САПР LabVIEW);
- за допомогою математичного опису сигналів (САПР OCG/Signals Analyzer і MatLAB).

Моделі передавача (рис. 6) і приймача (рис. 7) у різних моделюючих САПР будуть виглядати майже однаково. У моделі OFDM-передавача в якості даних можна використовувати генератор випадкових даних (наприклад, генерувати цілі числа в заданому діапазоні з наступним представленням у двійковій формі). Формування і модулювання каналів проводиться окремо для кожного слова. Залежно від типу модуляції використовуються

формувачі векторів з різною логікою, а кількість модуляторів каналів з даними завжди дорівнює 48, крім яких формуються 4 службові підканали.

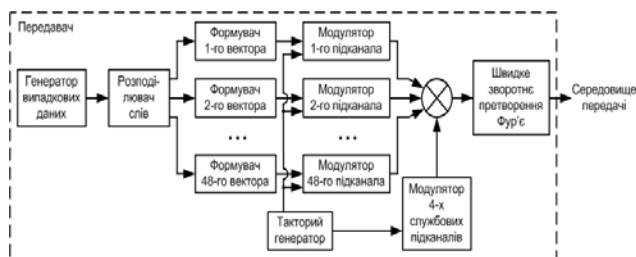


Рис. 6. Блок-схема моделі OFDM-передавача

Дана модель не включає згортальне кодування, оскільки воно застосовується до розподільника слів, і в даному випадку входить до генератора випадкових даних.

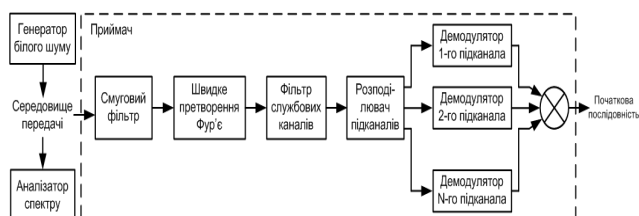


Рис. 7. Блок-схема моделі OFDM-приймача

Моделювання розподілення каналів у часі проводилося за допомогою OCG (версія 1209) і Signals Analyzer (версія free), як показано на рисунку 8, для приклада вище показана спектрограма сигналу в тому самому діапазоні [7]. Хоча в програмі і не присутні n-QAM модуляції, але програму можна використовувати для наочного отримання спектральної завантаженості каналів у часі, використовуючи PSK-модуляцію сигналу. Діаграма виконана у відтінках сірого: чим ближче до чорного кольору, тим більша амплітуда сигналу. З обох боків спектру видно різке зменшення амплітуди, яке відповідає неосновним коливанням крайніх каналів.

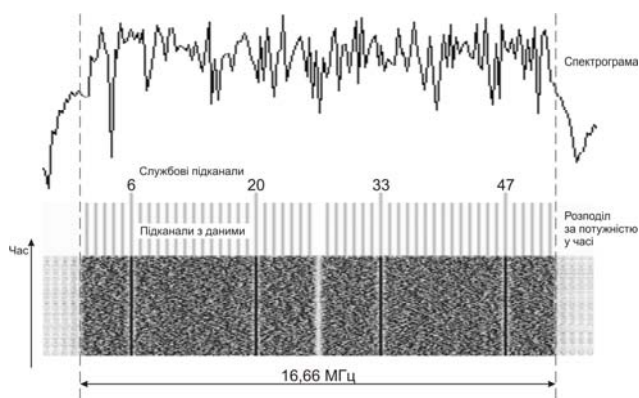


Рис. 8. Моделювання завантаженості каналів

Моделювання проводилося за допомогою Modulation Toolkit OFDM із пакета прикладних програм LabVIEW Professional Development System 10.0 [8].

Для перевірки результатів моделювання використовувався зазначений вище аналізатор спектру і у схемі, показаній на рисунку 9. Відстань між точкою бездротового доступу і клієнтом становить 2 м, а посередині розташований аналізатор спектру.

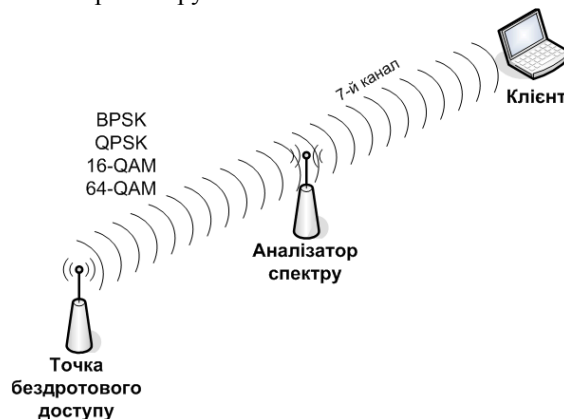


Рис. 9. Схема експерименту

Для експерименту був обраний 7-й канал з серединою на частоті 2,442 ГГц, так як він знаходиться саме в середині діапазону і можна отримати чіткий вид затухання спектру. Для різних швидкостей передачі у стандарті 802.11g (точніше 802.11a) використовуються різні типи модуляції:

- для 6 і 9 Мбіт/с — двопозиційна фазова модуляція або BPSK (від англ. binary phase-shift keying);
- для 12 і 18 Мбіт/с — чотирьопозиційна фазова модуляція або QPSK (4-PSK, від англ. quadrature phase-shift keying);
- для 24 і 36 Мбіт/с — шістнадцятирівнева квадратурна амплітудна модуляція або 16-QAM (quadrature amplitude modulation, хоча точніше було б назвати QASK від англ. quadrature amplitude-shift keying);
- для 48 і 54 Мбіт/с — шестидесятичотирьорівнева квадратурна амплітудна модуляція або 64-QAM.

При погіршені умов прийому точка бездротового доступу може перемикатися на нижчу швидкість, так як при зменшенні типу модуляції збільшується стабільність роботи через меншу кількість бітів інформації, які приходяться на один підканал (BPSK — 1 біт/такт, QPSK — 2 біт/такт, 16-QAM — 4 біт/такт і 64-QAM — 6 біт/такт).

На рисунках 10-13 показані різні типи модуляції: ліворуч LabVIEW-модель і праворуч сигнал знятий з аналізатора спектру. Швидкість передачі залежить від швидкості згортального кодування.

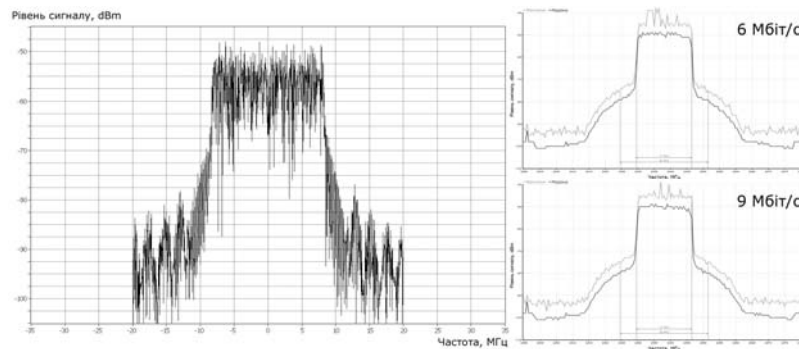


Рис. 10. Результат моделювання для BPSK

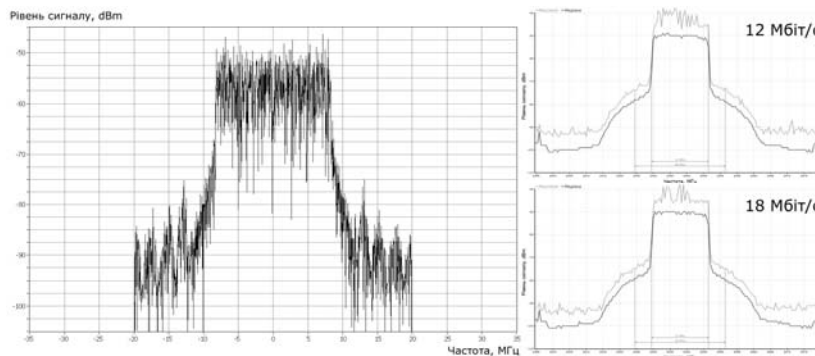


Рис. 11. Результат моделювання для QPSK

Треба зауважити, що обов'язковими для стандарту 802.11a є тільки швидкості передавання 6, 12 і 24 Мбіт/с, які відповідають швидкості згортального кодування  $\frac{1}{2}$ . З розглянутого видно, що швидкість згортального кодування важлива тільки для точності отримання повідомлень і ніяким чином не впливає на вид спектру. В стандартній моделі при погіршенні умов прийому здійснюється автоматичний перехід на меншу швидкість згортального кодування, а також вид модуляції з

меншою кількістю вектора сигналів (тобто з більшою похибкою при демодуляції).

В усіх випадках передавалася одна й та сама кількість інформації (5,2 кБ з урахуванням службових каналів). Всі 52 канали: з них 48 з даними (Data Tones) і 4 службових (Pilot Tones) — були завантажені рівномірно.

Піки з обох кінців спектрального діапазону виникають через розрив при передаванні двох послідовних OFDM-символів.

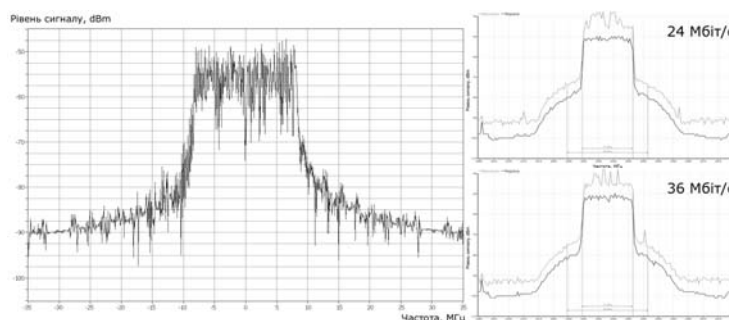


Рис. 12. Результат моделювання для 16-QAM

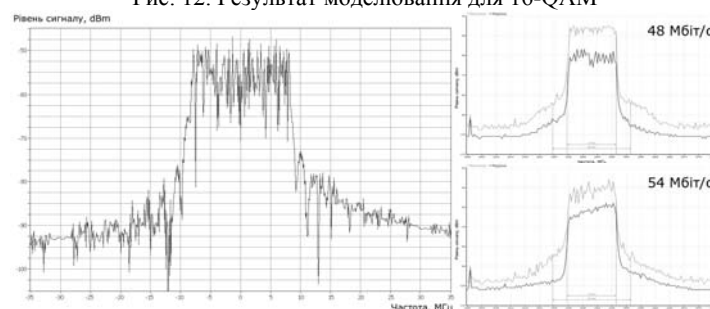


Рис. 13. Результат моделювання для 64-QAM

З іншого боку можна моделювати сигнали за допомогою математичного представлення сигналів у програмному комплексі MatLAB 7.8/Simulink 7.3 [9]. У скрипті задаються параметри: кількість підканалів, симетричність сигналу відносно середнього підканалу, розмір пакета даних (рівний 5,2 кБ, як у попередньому моделюванні), ширина каналу передачі, точність (кількість точок вимірювання), після чого генеруються послідовності для кожного типу модуляції. Згенерована послідовність розподіляється за підканалами і подається на вхід функції Уолша `rwelch()`, після чого проводиться швидке перетворення Фур'є для сигналів з нульовим середнім каналом `fftshift()`. За результатами побудовані спектри сигналів, приклад для BPSK показаний на рис. 14. Крім основних підканалів були розраховані спади рівня сигналу на кінцях спектрів, розраховані з 16-ти крайніх підканалів.

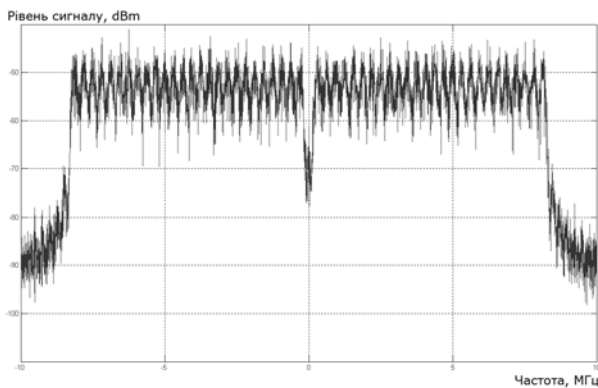


Рис. 14. Математичне моделювання для BPSK

У моделі не врахована нерівномірна інтенсивність завантаження службових каналів по відношенню до каналів з даними, тому спектр наближується до ідеального вигляду. Для різних видів модуляції спектр дещо відрізняється потужністю і швидкістю затухання на кінцях, але формою всі спектри майже не відрізняються.

## Висновки

Із дослідження видно, що для аналізу радіофіру широкосмугових сигналів достатньо мати аналізатор спектру з роздільною здатністю зіставленою з шириною підканалів.

Час збору інформації залежить від задачі. Для дослідження певного(-их) каналу(-ів) достатньо збирати дані не більше 1 хв. При перевірці завантаження спектру виникають два варіанти: перевірка у певний момент часу для короткочасного сеансу або вибір частоти стаціонарної точки бездротового доступу. У випадку короткочасної передачі достатньо перевірити радіофір протягом декількох секунд і миттєво розпочинати передачу (наприклад, методи описані у стандартах 802.15.2 [10] і 802.19 [11]).

В різних випадках можуть бути використані різні моделі OFDM-сигналу, які характеризуються інтегральною потужністю, врахуванням додаткових вузлів передавача, середовища і приймача або математичним описом. Вибір моделі залежить від мети її застосування. Порівняння моделей можна проводити лише для конкретних випадків.

Окремо треба зазначити, що 14-й канал дозволений для використання лише в Японії і тільки для 802.11b, тобто з OFDM він не використовується [12]. До того ж з [13] широкосмуговий радіодоступ для 802.11 обмежується частотою 2,4835 ГГц, а середина 14-го каналу приходить на частоту 2,484 ГГц, тобто більша частина спектру каналу знаходиться за межею діапазону.

## Список літератури

1. Ларин В. Ю., Хандильды А. В., Купцов В. И. Исследование модели генератора группового спектра сигнала. Вісник інженерної академії України. — № 3-4. — К., 2008. — С. 115-119.
2. Banitsas K. A., Song Y. H., Owens T. OFDM over IEEE 802.11b hardware for telemedical applications. — 200x Inderscience Enterprises. — 2004. — 18 p.
3. Selby S., Amini A., Edelman C. Simulating Interference Issues between Bluetooth PANs and 802.11b and 802.11g WLANs. — Agilent Technologies. — 2008. — 15 p.
4. <http://www.ubnt.com/airview>
5. <http://teethgrinder.co.uk/open-flash-chart-2/>
6. Статистика: Підручник / С. С. Герасименко, А. В. Головач, А. М. Єріна та ін.; за наук. ред. д. е. н. С. С. Герасименка. — 2-ге вид., перероб. і доп. — К.: КНЕУ, 2000. — 467 с.
7. <http://www.radioscanner.ru/info/article220/>
8. <http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/3456>
9. <http://www.dsplg.com/2008/02/03/understanding-an-ofdm-transmission/>
10. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG2.html>
11. <http://www.ieee802.org/19/>
12. IEEE 802.11-2007 §19.4.2
13. Постанова №815 «Про затвердження Плану використання радіочастотного ресурсу України» від 9 червня 2006 р. (<http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=815-2006-%EF>).

Стаття надійшла до редколегії : 30.11.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Власов О.М., Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ.