

# АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ І ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ OFDM

**А. А. Астраханцев**

Доцент\*

Контактний тел.: (057) 702-14-29

E-mail: astrahkture@mail.ru

**А. А. Войтюк\***

\*Кафедра “Мережі зв’язку”

Харківський національний університет радіоелектроніки  
пр. Леніна, 14, м. Харків, 61166

*В статті розглядаються питання вибору оптимального за критеріями частотної та енергетичної ефективності підканального алгоритму модуляції та згорткового кодування в технології OFDM*

*Ключові слова: алгоритм OFDM, DMT, ефективність, завадостійкість, згортковий код*

---

*В статье анализируются вопросы выбора оптимального по критериям частотной и энергетической эффективности подканального алгоритма модуляции и типа сверточного кодирования в технологии OFDM*

*Ключевые слова: алгоритм OFDM, DMT, эффективность, помехоустойчивость, сверточный код*

---

*In paper the questions of choice optimum by criteria of frequency and power efficiency sub-channel algorithm of modulation and such as convolution encoding in technology OFDM are parsed*

*Keywords: an algorithm for OFDM, DMT, efficiency, noise immunity, a convolutional code*

## Вступ

За останні роки розвиток цифрової передачі даних, а в особливості бездротового стандарту 802.11a став дуже стрімким. У стандарті 802.11a немає чітких рекомендацій з використання конкретного виду алгоритму модуляції в каналі чи підканалі передачі, а також типу згорткового коду, тому розв’язання завдань, пов’язаних з вибором оптимальних рішень для забезпечення максимальної якості передачі та збільшенням завадостійкості мережі, є одними з найбільш важливих в теорії й практиці бездротових мереж.

## 1. Мета роботи

Дослідження характеристик завадозахищеності та ефективності алгоритму модуляції OFDM у бездротових мережах стандарту IEEE 802.11a.

## 2. Постановка задачі

Для того, щоб скласти гідну конкуренцію безлічі мереж передачі даних, бездротові мережі повинні постійно вдосконалюватися. Тому для бездротових мереж в наш час актуальною є задача забезпечення, по-перше, якнайбільшої швидкості передачі, по-друге – високої якості передачі і по-третє – мінімальної вартості. Підвищення швидкості призводить до погіршення якості сигналу, що приймається та підвищенню рівня міжканальних завад.

У зв’язку з цим виникає необхідність знаходження оптимального рішення задачі, зв’язаної з підвищенням завадостійкості за рахунок вибору підканальних алгоритмів модуляції (BPSK, QPSK, QAM-16 чи QAM-64) та дозволених стандартом типів згорткового кодування (1/2 або 3/4) з найбільшою ефективністю.

Аналіз підканальних алгоритмів технології OFDM дозволить порівняти кожний з цих алгоритмів за показниками частотної та енергетичної ефективності, що дозволить обґрунтовано обрати алгоритм обробки сигналу.

## 3. Алгоритм OFDM

Метод OFDM-модуляції (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ортогональний частотний розподіл з мультиплексуванням) є спрощеним варіантом алгоритму DMT і заснований на поділі потоку вхідних даних на множину паралельних потоків, кожний з яких передається на своїй (ортогональній) частоті носія.

Це забезпечує високу швидкість і завадостійкість передачі інформації, зокрема, стосовно провалів у спектрі переданих сигналів, тому що вузькосмугове загасання може виключити тільки одну або кілька частот-носіїв з їхнього великого числа (сотні – тисячі). Оскільки модуляція OFDM використовує для передачі ортогональні носійні коливання, то можлива демодуляція модульованих сигналів навіть в умовах часткового перекриття смуг окремих носіїв.

OFDM становить великий інтерес для наукових досліджень. Технологія використовується в системах цифрового телебачення, системах стільникового зв'язку WiMAX, MobileWiMAX, MBWA, автоматизованих системах контролю й обліку електроенергії, системах типу «інтелектуальний будинок» та ін. На ній базуються стандарти бездротового зв'язку Інституту інженерів по електротехніці й електроніці (IEEE) 802.11a, e, g, n; 802.16a, d, e; 802.20.

OFDM може бути також розглянутий як спосіб модуляції або мультиплексування. Одна з головних причин використання OFDM полягає в тому, щоб збільшити завадостійкість при постійно мінливій частоті або при вузькій смузі пропускання.

При бездротовій передачі сигналів той самий сигнал у результаті багаторазового відбиття може приходити в приймач різними шляхами. Тому в точці приймання результуючий сигнал являє собою суперпозицію (інтерференцію) багатьох сигналів з різними амплітудами й початковими фазами. Багатопроменева інтерференція властива будь-якому типу сигналів, але особливо негативно вона позначається на широкосмугових сигналах. При використанні широкосмугового сигналу в результаті інтерференції одні частоти складаються синфазно, що приводить до збільшення сигналу, а інші, навпаки, протифазно, викликаючи ослаблення сигналу на даній частоті. Тому одним з основних елементів OFDM-модуляторів є блок додавання циклічного префікса. Принцип його формування показаний на рис. 1.



Рис. 1. Додавання циклічного префікса

Останні відліки CP беруться з кінця блоку й дублюються на початку його, після чого сигнал стає схожим на періодичний. Очевидно, що в часовій області створюється захисний інтервал між сусідніми переданими символами. Це дозволяє ефективно боротися з міжсимвольною інтерференцією у часовій області, концентруючи її в циклічному префіксі, який відкидається на приймальному боці. Використання ЦП також полегшує синхронізацію і її відновлення, але додавання ЦП має й інший бік: зменшується відношення сигнал/шум, оскільки витрачається енергія на передачу надлишкового змісту.

Не менш важливим компонентом схем OFDM-модуляторів є блок згорткового кодування. Суть згорткового кодування полягає у тому, що до послідовності переданих бітів додаються службові біти, значення яких залежить від декількох попередніх переданих біт. Використання згорткового кодування дозволяє не тільки виявити, але і в більшості випадків виправити помилки передачі на прийомній стороні.

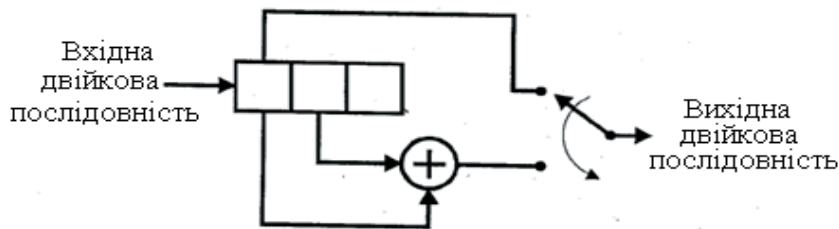


Рис. 2. Схема утворення коду

#### 4. Дослідження завадостійкості

В каналах зв'язку постійно виникають завади, які негативно впливають на якість інформації, що приймається. Найпоширенішою завадою, що діє в каналах зв'язку є білий гаусівський шум. За допомогою Matlab для алгоритму модуляції OFDM побудована залежність коефіцієнту BER (Bit Error Rate) від стану каналу, моделюючи канал з частотно-незалежним загасанням – загасанням, яке послаблює сигнал в каналі поступово та однаково по всій довжині лінії передачі (Flat fading). В досліджуваній моделі Flat fading є аналогом білого гаусівського шуму.

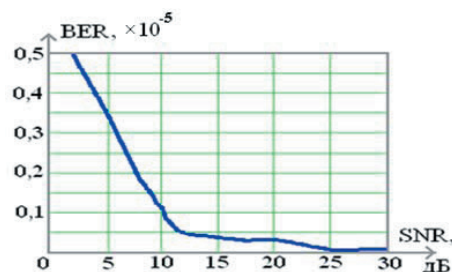


Рис. 3. Залежність коефіцієнта бітових помилок (BER) від відношення сигнал/шум (Signal Noise Rate - SNR) для досліджуваного режиму загасання Flat fading

З графіку видно, що тільки при відношенні сигнал/шум (SNR), що дорівнює 25-30 дБ коефіцієнт бітових помилок (BER) прагне до нуля. Такі характеристики систем з OFDM модуляцією вже не задовольняють сучасним умовам завадостійкості бездротових мереж, тому однією з задач наукового дослідження було виявлення найбільш ефективних методів підканальної модуляції та найбільш ефективного типу згорткового коду для забезпечення оптимальної завадостійкості мережі.

#### 5. Дослідження ефективності

Для оцінки ефективності систем зв'язку використовуються коефіцієнт використання каналу по частоті  $\gamma$  (частотна ефективність) і коефіцієнт використання каналу по потужності  $\beta$  (енергетична ефективність).

Коефіцієнт використання каналу по частоті (частотна ефективність) визначається виразом:

$$\gamma = \frac{R}{F}$$

де R – швидкість передачі інформації з каналу;  
F - ширина смуги частот, що займається сигналом.

Коефіцієнт використання каналу по потужності  $\beta$  (енергетична ефективність) визначається за формулою:

$$\beta = \frac{R}{\rho_0}$$

де  $\rho_0 = P_s / N_0$  – відношення потужності сигналу до спектральної щільності потужності шумів.

Результати досліджень частотної та енергетичної ефективності у каналі та підканалі передачі даних зведені в табл. 1-4.

Таблиця 1

Частотна ефективність у підканалі

Тип модуляції	Швидкість згорткового кодування		$R_{\text{підканалу}}$
	1/2	3/4	
	Частотна ефективність		
BPSK	- 4 дБ	- 2,2 дБ	250 кбіт/с
QPSK	- 1,0 дБ	0,8 дБ	500 кбіт/с
QAM-16	2,1 дБ	3,8 дБ	1000 кбіт/с
QAM-64	5,1 дБ	5,6 дБ	1500 кбіт/с

Таблиця 2

Енергетична ефективність у підканалі

Тип модуляції	Швидкість згорткового кодування		Енергетична ефективність
	1/2	3/4	
	Енергетична ефективність		
BPSK	- 13,5 дБ	- 11,7 дБ	
QPSK	- 11,2 дБ	- 10,3 дБ	
QAM-16	- 9,4 дБ	- 7,7 дБ	
QAM-64	- 26 дБ	- 23,5 дБ	

Таблиця 3

Енергетична ефективність у каналі

Тип модуляції	Швидкість згорткового кодування		$R_{\text{каналу}}$
	1/2	3/4	
	Частотна ефективність		
BPSK	- 6,2 дБ	- 4,4 дБ	12 Мбіт/с
QPSK	- 3,2 дБ	- 1,4 дБ	24 Мбіт/с
QAM-16	- 0,2 дБ	1,6 дБ	48 Мбіт/с
QAM-64	2,8 дБ	3,3 дБ	72 Мбіт/с

Таблиця 4

Енергетична ефективність у каналі

Тип модуляції	Швидкість згорткового кодування		Енергетична ефективність
	1/2	3/4	
	Енергетична ефективність		
BPSK	- 13,8 дБ	- 12,1 дБ	
QPSK	- 12,4 дБ	-10,7 дБ	
QAM-16	- 9,9 дБ	-8 дБ	
QAM-64	-26,4 дБ	-23,7 дБ	

Графічні розраховані характеристики зручно зобразити у вигляді точок на площині з границею Шеннона, по мірі близькості точок до якої можна оцінити ефективність досліджуваних алгоритмів.

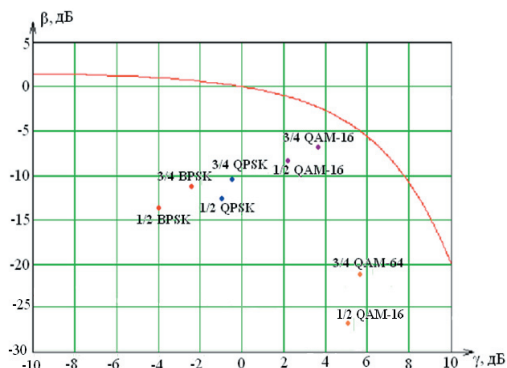


Рис. 4. Ефективність алгоритмів модуляції для підканалу

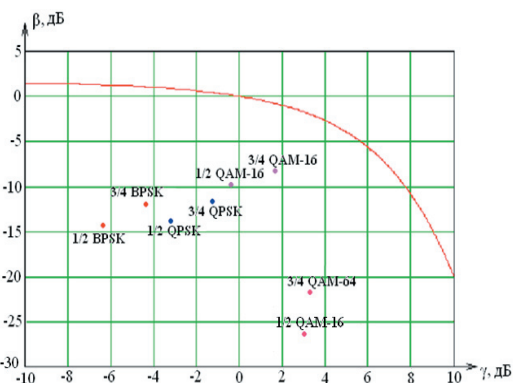


Рис. 5. Ефективність алгоритмів модуляції для всієї системи OFDM

В результаті дослідження ефективності виявили, що у підканалі:

- найвищу компактність спектру забезпечує алгоритм модуляції QAM-64 з надмірністю згорткового коду 3/4 ( $\gamma = 5,6\text{дБ}$ );
- найвищу завадостійкість - алгоритм QAM-16 з надмірністю згорткового коду 3/4 ( $\beta = - 7,7$  дБ).

У каналі:

- найвищу компактність спектру забезпечує алгоритм модуляції QAM-64 з надмірністю згорткового коду 3/4 ( $\gamma = 3,3\text{дБ}$ );
- найвищу завадостійкість – алгоритм QAM-16 з надмірністю згорткового коду 3/4 ( $\beta = - 8$  дБ).

### Висновки

Практичну значимість проведених досліджень обумовлюють сформовані рекомендації по досягненню найбільшої ефективності за рахунок використання алгоритму QAM-16 з надмірністю згорткового коду 3/4.

До наукової новизни можна віднести дослідження підканалних методів модуляції алгоритму OFDM з різними типами згорткового кодування на тлі адитивних завад, імпульсних шумів та завад, зосереджених у спектрі.

## Література

1. Прокис, Дж. Цифровая связь [Текст] / Прокис Дж. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
2. Гепко, И. А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития [Текст] / И. А. Гепко, В. Ф. Олейник. – К.: «ЕКМО», 2009. – 672 с.
3. Ramirez-Mireles F. The benefits of DMT modulation for VDSL systems [Text] / F. Ramirez-Mireles, Q. Albrudi, S. Heidari, P. Sevalia. – Ikanos: Communications, 2002.

*У статті наведено основні вимоги до систем електронного голосування. Запропоновано архітектура та структурна схема системи електронного голосування*

*Ключові слова: системи електронного голосування, вибори, структура*

*В статье приведены основные требования, предъявляемые к системам электронного голосования. Предложена архитектура и структурная схема системы электронного голосования*

*Ключевые слова: системы электронного голосования, выборы, структура*

*In the article main requests to e-voting systems were provided. The architecture and structure were proposed*

*Keywords: electronic voting, election, structure*

УДК 681.176

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ГОЛОСОВАНИЯ

С. П. Новоселов

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: (057) 702-14-86

E-mail: nsoft72@mail.ru

Ю. И. Богдан\*

Контактный тел.: 097-377-33-57

E-mail: dancelusinda@gmail.com

О. О. Веселая\*

Контактный тел.: (057) 702-14-86

E-mail: olga.veselaya@gmail.com

Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

### 1. Введение

Автоматизация процессов является важной составляющей развития современного общества, охватывающий все сферы его деятельности. Современные технологии позволяют автоматизировать множество задач в различных отраслях, где традиционно человек играл важную роль.

Человеческий фактор, пожалуй, один из главных факторов, оказывающий как положительное, так и отрицательное влияние на процесс производства. И чем ответственнее его роль, тем выше цена ошибки. Ярким примером этой закономерности может служить процесс выборов в правительственные органы.

Одним из перспективных направлений применения новых технологий является автоматизация процесса голосования. В ряде стран за последние десятилетия были разработаны и внедрены различные модификации системы электронного голосования (СЭГ). Это объясняется тем, что, в первую очередь, при использовании СЭГ существенно снижаются временные затра-

ты на обработку результатов, а также снижается роль влияния человеческого фактора на процесс и результат подсчета голосов. Кроме того, СЭГ позволяет учесть потребности людей с ограниченными возможностями.

Уровень автоматизации различных социальных процессов в стране, отражает общий уровень развития технологий и требует значительных капиталовложений. Это является одной из причин, почему на сегодняшний день в Украине не было попыток внедрения данных систем.

Опыт использования систем электронного голосования в различных странах показал, насколько высоки требования, которым они должны соответствовать для обеспечения честных и открытых выборов.

Выделим главные требования, предъявляемые к системе электронного голосования:

- 1) обеспечение анонимности голосования;
- 2) исключение фальсификаций;
- 3) точность подсчета;
- 4) высокая надежность программного и аппаратного обеспечения;