

1. Ильченко М.Е. Информационно-телекоммуникационные системы широкополосного радиодоступа / Ильченко М.Е., Кравчук С.А. // Проблемы управления и информатики. – 2006. – № 1–2. – С. 285–293.
2. Волков Л.Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учебное пособие / Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
3. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит. – М.: Техносфера, 2011 – 904 с.
4. Слюсар В. Системы МІМО: принципы построения и обработка сигналов / В. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 8. – С. 52–58.
5. Веселовский К. Системы подвижной радиосвязи / К. Веселовский; пер. с польск. И.Д. Рудинского; под ред. А.И. Ледовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 536 с.
6. Кравчук С.О. Моделі ергодичної пропускнуої здатності і імовірності помилки багатоантенної радіосистеми з просторово-часовим кодуванням в каналі із завмираннями / Кравчук С.О., Міночкін Д.А. // Збірник наукових праць ВІКНУ ім. Тараса Шевченка. – 2009. – № 20. – С. 63–71.
7. Larsson E.G. On maximum-likelihood detection and decoding for space-time coding systems / Larsson E.G., Stoica P., Li J. // IEEE Trans. Signal Processing. – 2002. – V. 50. – No. 4. – P. 937–944.
8. Tarokh V. Space-time block coding for wireless communication: Performance results / Tarokh V., Jafarkhanii H., Calderbank A. R. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – March 2005. – V. 17. – P. 451–460.
9. Capacity limits of MIMO channels / A.J. Goldsmith, S.A. Jafar, N. Jindal, S. Vishwanath // IEEE J. Select. Areas Commun. – 2003. – Vol. 21, № 6. – P. 684–702.
10. Andrews J.G. Inteference cancellation for cellular systems: A contemporary overview / Andrews J.G. // IEEE Wireless Communications Magazine. – 2005. – vol. 12, № 2. – P. 19–29.
11. Черников В.А. Сферический детектор для канала МІМО 2x2 в приемниках абонентских станций стандарта 802.16e // Матер. наук.-техн. конф. «Проблеми телекомунікацій», м. Київ, 25–27 квітня 2007 р. / В.А. Черников. – К.: НТУУ „КПІ”, 2007. – С. 94–95.

УДК 621.391.82

**Побивайло В. В., Артеменко Т.М., Мойсеєнко О.М. (ВІПІ НТУУ «КПІ»)**

### **МЕТОДИКА ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ БЕЗПРОВІДНОГО ДОСТУПУ**

**Побивайло В.В., Артеменко Т.М., Мойсеєнко О.М. Методика оцінки характеристик сигналів у системах безпроводного доступу.** В статті запропонована методика оцінки характеристик багатопозиційних сигналів в системах багатоабонентського безпроводного доступу на основі показників енергетичної і частотної ефективності.

**Ключові слова:** БАГАТОПОЗИЦІЙНІ СИГНАЛИ, МОДУЛЯЦІЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ

**Побивайло В.В., Артеменко Т.Н., Мойсеєнко О.Н. Методика оценки характеристик сигналов в системах беспроводного доступа.** В статье предложена методика оценки характеристик многопозиционных сигналов в системах много абонентские беспроводного доступа на основе показателей энергетической и частотной эффективности.

**Ключевые слова:** МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ СИГНАЛЫ, МОДУЛЯЦИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ

**Pobuyailo V.V., Artemenko T.M, Moiseienko O.M. Methodology to evaluate the characteristics of signals in wireless.** The paper proposes a method of estimating the characteristics of multi-position signals in many wireless subscriber, based on indicators of energy and frequency performance.

**Keywords:** MULTI-POSITION SIGNALS, MODULATION, EFFICIENCY

Одним із методів підвищення ефективності сучасних систем безпроводного доступу є застосування сигналів з багатопозиційною модуляцією, що дозволяє підвищити швидкість передачі інформації без розширення смуги частот каналу зв'язку, або покращити завадостійкість приймання сигналів у телекомунікаційній системі [1...4].

При великому обсязі алфавіту сигналів кожний переданий символ може переносити набагато більше інформації. Зокрема, алфавіт з  $M$  символів ( $M$  різноманітних сигналів) дозволяє передавати  $\log_2 M$  двійкових одиниць (біт) інформації на кожний переданий символ. Відповідно величину швидкості передачі інформації можна збільшити в  $\log_2 M$  разів, застосовуючи багатопозиційні ( $M$ -ічні) сигнали [4]. Але не всі види багатопозиційних сигналів, які використовують в сучасних телекомунікаційних системах, можуть бути застосовані в радіоінтерфейсі систем безпроводного доступу.

Тому метою роботи є визначення вимог до сигналів перспективних систем безпроводного доступу і розробка методики, яка дозволить здійснювати оцінку характеристик багатопозиційних сигналів в таких системах.

### Постановка задачі.

*Задано:* параметри модему та каналу зв'язку  $\Phi = \{\varphi_i\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ , де  $\varphi_1 \dots \varphi_m$  – вид модуляції, потужність корисного сигналу, швидкість передачі, розмірність алфавіту сигналу, смуга пропускання каналу зв'язку, відношення сигнал/шум.

*Необхідно:* розрахувати кількісні показники багатопозиційних сигналів в системах безпроводного доступу з врахуванням рівня завадозахищеності.

*Обмеження:* коефіцієнт використання потужності сигналу  $\beta_E \leq 1,44$ ; коефіцієнт використання смуги частот каналу  $\beta_F \geq 0$ ; ймовірність помилкового приймання  $P_{\text{пом}} \leq 10^{-2}$ .

**Методика.** Розглянемо основні етапи реалізації методики оцінки характеристик багатопозиційних сигналів в системах безпроводного доступу.

**1. Розрахунок коефіцієнта використання потужності сигналу  $\beta_E$ .** Енергетична ефективність системи безпроводного доступу може бути оцінена коефіцієнтом використання потужності сигналу [1, 6]:

$$\beta_E = \frac{\nu}{P_c/G_0}, \quad (1)$$

де  $\nu$  – швидкість передачі інформації;  $P_c$  – потужність сигналу;  $G_0$  – спектральна щільність потужності завади (шуму).

Розрахунок енергетичної ефективності пов'язаний з визначенням відношення сигнал/шум і, відповідно, ймовірності помилкового приймання сигналу (ймовірності помилки).

Для сигналів з багатопозиційною фазовою модуляцією [7] ймовірність помилки при великих значеннях відношення сигнал/шум можна розрахувати за формулою

$$P_{\text{пом}} \approx 1 - \Phi \left[ \sin \left( \frac{\pi}{M} \sqrt{\frac{E_c \log_2 M}{G_0}} \right) \right], \quad (2)$$

де  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – функція Крампа [7];  $E_c$  – енергія сигналу.

Завадостійкість приймання сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією [1, 7] при великих значеннях відношення сигнал/шум можна оцінити виразом

$$P_{\text{пом}} \approx \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^M \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{d_{ki}^2}{2G_0}} \right) \right], \quad (3)$$

де  $d_{ki}$  – відстань між сигналами з номерами  $k$  та  $i$ .

При прийманні багатопозиційних ортогональних сигналів [8]

$$P_{\text{пом}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{8\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [1 + \Phi(x)]^{M-1} \cdot e^{-\left(x - \sqrt{\frac{2E_c}{G_0}}\right)^2} dx. \quad (4)$$

**2. Розрахунок коефіцієнта використання смуги частот каналу  $\beta_F$  (частотної ефективності).** Частотна ефективність систем безпроводного доступу оцінюється [1, 6] коефіцієнтом використання смуги частот каналу

$$\beta_F = \frac{\nu}{\Delta F}, \quad (5)$$

де  $\Delta F$  – ширина смуги пропускання каналу.

**3. Розрахунок рівня паразитної амплітудної модуляції.** Багатопозиційний сигнал повинен мати малий пік-фактор (відношення максимальної потужності сигналу до середньої)  $\Pi = P_{\max}/P_{\text{сеп}}$ .

**4. Розрахунок завадостійкості при прийманні сигналів в умовах багатопроменевості.** Канали з завмираннями характеризуються випадковою зміною коефіцієнта передачі, тому параметри сигналів на вході приймача є випадковими і невідомими [7]. Завадостійкість каналів передачі при цьому погіршується, оскільки при прийманні немає можливості використовувати дані про дійсні значення параметрів сигналів. На даному етапі розраховується імовірність помилкового приймання сигналу при його передачі каналом зв'язку із завмираннями

$$P_{\text{пом}_\mu} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\alpha \frac{\mu^2 E}{G_0}} \right) \right], \quad (6)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт передачі.

**5. Оцінка вартості та складності технічної реалізації модему.** На даному етапі оцінюється вплив розмірності алфавіту сигналу  $M$  на вартість та складність технічної реалізації модему.

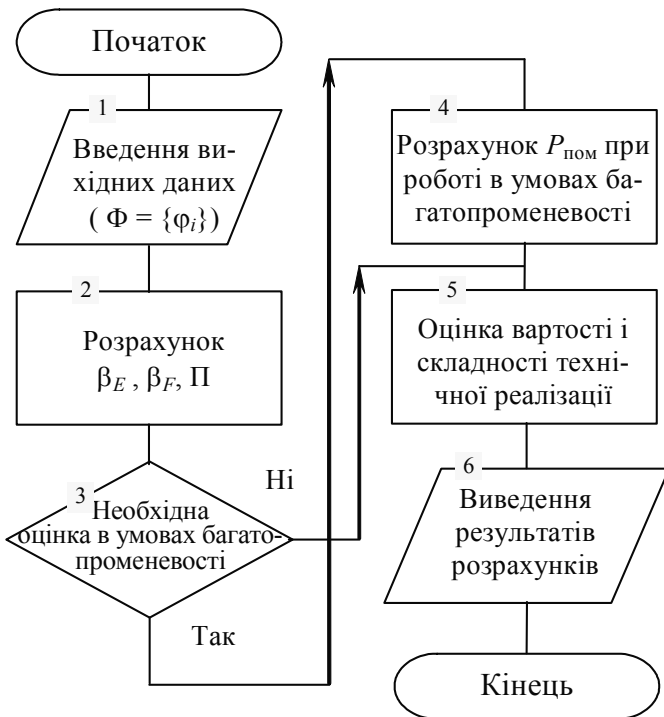


Рис. 1. Схема-алгоритм оцінки характеристик сигналів у системі безпроводного доступу

Таким чином, запропонована методика дозволяє комплексно оцінити характеристики багатопозиційних сигналів і визначити можливість їх застосування в радіоінтерфейсі системи безпроводного доступу.

Схема-алгоритм оцінки характеристик сигналів у системах безпроводного доступу, який реалізує запропоновану методику, поданий на рис. 1.

Оцінимо за допомогою запропонованої методики деякі види багатопозиційної модуляції відносно їх застосування у системах безпроводного доступу.

**Багатопозиційна квадратурна амплітудна модуляція (КАМ-М).** КАМ (стандарти IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, Нігер LAN 2) при високих показниках частотної ефективності, має високий рівень паразитної амплітудної модуляції (великий пік-фактор) [3, 4]. Крім того, сигнали з КАМ є досить чутливими до спотворень і не можуть використовуватись без спеціальних еквалайзерів, що значно збільшує вартість приймального обладнання. При великих

значеннях основи алфавіту  $M$  не можуть бути застосовані в радіоканалі із-за нестійкості характеристик в умовах багатопроменевості.

**Ортогональна частотна модуляція (OFDM).** Сигнали з OFDM (стандарти IEEE 802.11a, Hiper LAN 2) дозволяють боротися з міжсимвольною інтерференцією і є альтернативою еквалайзера. При OFDM модуляції спектр сигналу розділяється на  $N$  частотних ортогональних підканалів, в кожному з яких здійснюється фазова маніпуляція. Вибором кількості підканалів можна досягти мінімальної різниці фаз між променями в каналі і максимально зменшити вплив завмирань на якість приймання сигналів. Сигнали з OFDM характеризуються високою енергетичною і частотною ефективністю, але збільшення кількості незалежних ортогональних каналів призводить до зростання паразитної амплітудної модуляції [3, 5]. Тому системи з OFDM потребують підсилювачі потужності з дуже високою лінійністю характеристики. Для обробки сигналів з OFDM необхідні значні обчислювальні затрати. Вартість приймально-передавального обладнання та енергоспоживання досить високі.

**Ортогональна багатокодова модуляція (OCDM).** Найбільш розповсюджений метод, який використовується в системах без провідного доступу для підвищення швидкості передачі. Якщо абонентові необхідно збільшити швидкість передачі інформації в  $N$  раз, йому виділяють  $N$  кодових каналів ( $N$  різних ортогональних кодових послідовностей) на одній частоті. OCDM має досить високу енергетичну ефективність. Цей метод являє собою обмін пропускної здатності системи на швидкість передачі даних для привілейованої групи абонентів. Крім того, OCDM має високий рівень паразитної амплітудної модуляції, оскільки груповий сигнал утвориться підсумовуванням безлічі незалежних ортогональних кодів.

**$M$ -ічна ортогональна модуляція ( $M$ -ary Orthogonal Keying – MOK).** Алфавіт сигналів є сукупністю взаємоортогональних кодових послідовностей. Найчастіше це набір послідовностей Уолша, кожній з яких відповідає один із символів  $M$ -ічного алфавіту. Сигнали MOK мають високу енергетичну ефективність і стійкість до багатопроневості. Спектр сигналів такий же, як у сигналів з прямим розширенням спектра стандарту IEEE 802.11 [9]. Недоліками MOK є необхідність когерентної обробки і потреба в модуляції додатковою послідовністю для розділення абонентів. Спектральні властивості сигналів і апаратна складність модему аналогічні OCDM. У цілому технічна реалізація модему MOK характеризується середнім ступенем складності.

**Маніпуляція циклічним зсувом (Cyclic Code Shift Keying – CSSK)** (стандарти IEEE 802.11b, Hiper LAN 2). Алфавіт сигналів формується циклічними зсувами однієї вихідної кодової послідовності довжини  $N$ , унаслідок чого на прийомному боці відбувається відповідний часовий зсув піка кореляційної функції, який фіксується узгодженим фільтром “подвійної” довжини (кількість відводів  $2N - 1$  у порівнянні з  $N$  для звичайного фільтра) [3]. Символ має  $\log_2 N$  біт інформації. Завадостійкість  $M$ -альтернативного розрізнення сигналів у загальному випадку визначається матрицею їх взаємних кореляцій. Символи CSSK не є взаємоортогональними навіть у межах одного каналу зв'язку, що є найбільш істотним недоліком методу. Таким чином, схема CSSK уступає MOK у завадостійкості, але є більш економічною з погляду простоти її технічної реалізації.

Результати оцінки характеристик розглянутих сигналів подано в табл. 1. Значення коефіцієнта використання потужності сигналу  $\beta_E$  розраховані для величини ймовірності помилкового приймання  $P_{\text{пом}} = 10^{-5}$  при відсутності завмирань. Як видно з таблиці, завадостійкість приймання в умовах багатопроневості значно погіршується, особливо для сигналів КАМ.

Проведений аналіз показує, що найкращі характеристики з погляду побудови високоефективних систем безпровідного доступу мають сигнали MOK і CSSK. Їх легко порівнювати між собою, оскільки обидві формують алфавіт сигналів обсягу  $M = N$  (кількість взаємоортогональних послідовностей довжини  $N$  дорівнює кількості різних циклічних зсувів  $N$ ). Основний недолік методу MOK полягає в тому, що в загальному випадку  $M$ -альтернативного розрізнення приймач повинний мати в своєму складі  $M$  узгоджених

фільтрів (кореляторів) для прийнятого сигналу, через що з ростом  $M$  швидко досягається гранично допустимий обсяг обладнання.

Табл. 1

Вид модуляції $i$	$\beta_E$ , дБ	$\beta_F$ , дБ	Рівень паразитної амплітудної модуляції	Стійкість в умовах багатопроменевості ( $P_{\text{пом}}$ )	Складність і вартість реалізації
КАМ-16	-13,82	6,02	високий	$2,31 \cdot 10^{-3}$	висока
КАМ-32	-18,5	7,78	високий	$4,07 \cdot 10^{-3}$	висока
КАМ-64	-20,9	8,45	високий	$5,86 \cdot 10^{-3}$	висока
OFDM	-9,59	3,01	середній	$3,82 \cdot 10^{-4}$	висока
ОСДМ	-9,8	4,24	високий	$4,12 \cdot 10^{-4}$	середня
МОК	-9,4	4,24	низький	$3,41 \cdot 10^{-4}$	середня
СССК	-10,2	4,24	низький	$4,29 \cdot 10^{-4}$	низька

Поліпшення якості зв'язку при перевищенні деякого значення  $M$  у порівнянні з апаратними витратами є відносно невеликим. Технічна реалізація приймача істотно спрощується в схемі СССК, де алфавіт символів являє собою сукупність циклічних зсувів однієї кодової послідовності довжини  $N = M$ . При цьому на приймальному боці досить мати один узгоджений фільтр. Складність і вартість приймача при СССК мінімальні. Тому пошук методу модуляції, що дозволяє одержати ортогональний алфавіт з циклічною структурою, має велике практичне значення.

### Література

1. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / под ред. А. Г. Зюко. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
2. Зяблов В. В., Коробков Д. Л., Портной С. Л. Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах / В.В. Зяблов, Д.Л. Коробков, С.Л. Портной. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
3. Гепко И. А. Перспективные схемы М-ичной модуляции в системах беспроводного доступа / И.А. Гепко // Зв'язок. – 2001. – № 4. – С. 38-41.
4. Модульовані сигнали : навчальний посібник / В.Д. Бабич, О.В. Кувшинов, С.П. Лівенцев, О.П. Лежнюк. – К.: КВІУЗ, 2001. – 185 с.
5. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев. – М.: Око-Трендз, 2005. – 384 с.
6. Кувшинов О.В. Основы теории завадостійкого кодування : навчальний посібник / О.В. Кувшинов, О.П. Лежнюк, С.П. Лівенцев. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2001. – 72 с.
7. Завадостійкість каналів зв'язку : навчальний посібник / В.Д. Бабич, О.В. Кувшинов, О.П. Лежнюк, С.П. Лівенцев. – К.: КВІУЗ, 2001. – 150 с.
8. Кувшинов О.В. Оцінка ефективності сигнально-кодових конструкцій з багатопозиційною частотною маніпуляцією / О.В. Кувшинов // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2002. – Вип. 4. – С. 138-144.
9. Коротыгин С. Стандарт IEEE 802.11 и его расширения // Сети и телекоммуникации / С. Коротыгин, А. Нежуренко. – 2002. – № 6. – С. 20-29.