

**Висновки.** Використання систем розпізнавання зображень дозволяє підсилити систему автопілота шляхом додаткової навігаційної інформації або розширення області застосування безпілотних літальних апаратів.

1. Виходячи з проведених досліджень виявлено, що використання повнокольорових зображень вимагає значних часових та апаратних витрат. Для зменшення об'ємів масивів необхідно використовувати один з трьох кольорів, що переважає на сцені, н-д, зелений.

2. Прийняття рішення повинно бути не жорстким, а мати деякий допуск. Експериментальним шляхом визначено, що це 20 (значення змінюються від 0 до 255).

3. Враховуючи, що для тесту було вибрано зображення високої роздільної здатності, то аналіз займає більше часу і не є ефективним у зв'язку зі схожими сусідніми результати. Тому під час пошуку за зразком обираємо крок пошуку рівний 1/10 від довжини зразка.

4. Пониження чутливості дає хибні спрацьовування. При використанні даних методів для попередньої обробки даних необхідно понизити чутливість, щоб не пропустити важливих зразків. Об'єм вихідних даних зростає на 10-15%, що не створить великого перевантаження на наступні системи обробки задач.

5. Проста нейромережа дозволить докомплектувати дані методи при створенні завершеного комплексу автопілота безпілотного літального апарату.

### Література

1. Айзерман М.А. Метод потенциальных функций в теории обучения машин / М.А. Айзерман, Э.М. Браверман, Л.И. Розоноэр. М.: Наука, 1990.

2. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. М.: Физматгиз, 1993.

3. Фисенко В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений : учебное пособие / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. – С.Пб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.

УДК 621.391

Громов В.І., Борисов О.В. (ВІТІ НТУУ «КПІ»)

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ З ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЮ ОБРОБКОЮ

**Громов В.І., Борисов О.В.** Аналіз методів оцінки сигналів в системах з просторово-часовою обробкою. Проаналізовані основні методи аналізу сигналів в системах з просторово-часовою обробкою. Показані напрями підвищення спектральної і енергетичної ефективності сучасних систем радіодоступу.

**Ключові слова:** РАДІОДОСТУП, КОД V-BLAST, ТЕХНОЛОГІЯ МІМО

**Громов В.І., Борисов О.В.** Анализ методов оценки сигналов в системах с пространственно-временной обработкой. В работе проанализированы основные методы анализа сигналов в системах с пространственно-временной обработкой. Показаны направления повышения спектральной и энергетической эффективности современных систем радиодоступа.

**Ключевые слова:** РАДІОДОСТУП, КОД V-BLAST, ТЕХНОЛОГІЯ МІМО.

**Hromov V.I., Borysov O.V.** An analysis of methods of estimation of signals is in systems with spatio-temporal treatment. The basic methods of signals analysis in the spatio-temporal treatment systems are analysed. Directions of increase spectral and power efficiency of the modern systems of radioaccess are outlined.

**Keywords:** RADIOACCESS, CODE V-BLAST, TECHNOLOGY MIMO

Одним із головних напрямків розвитку сучасних телекомунікацій є удосконалення існуючих і створення нових систем широкосмугового радіодоступу (СШР) [1...5].

Однією із вимог до сучасних СШР є забезпечення високої швидкості передачі даних (пропускної здатності системи). Задача підвищення пропускної здатності є особливо актуальною для мобільних (стільникових) систем зв'язку та високошвидкісних комп'ютерних мереж, які функціонують в складних умовах багатопроменевого

розповсюдження радіохвиль. Причому, на сучасному етапі розвитку телекомунікацій задачу підвищення пропускної здатності СШР необхідно вирішувати в умовах жорстких обмежень на частотну смугу сигналів та потужність передавальних пристроїв.

Як показує проведений аналіз, пропускну здатність та якість передачі інформації в СШР можна значно підвищити за рахунок використання технології „багато входів – багато виходів” (MIMO – Multiple-Input Multiple-Output), яка дозволяє більш ефективно використовувати потужність передавача і боротися із завмираннями сигналів [1, 4, 6...9]. Підвищення ефективності досягається за рахунок використання методів просторово-часової обробки (STC – Space Time Coding), що забезпечують передачу і приймання паралельних потоків інформації.

Теоретично пропускна здатність системи MIMO з STC може бути збільшена пропорційно кількості антен на передавальному боці (за умови, що кількість приймальних антен не менша ніж кількість передавальних антен) у порівнянні з традиційними системами радіозв'язку з однією передавальною антеною (SISO – Single-Input Single-Output). Аналіз відомих систем STC [6, 10...13] показує, що підвищення спектральної ефективності системи MIMO, як правило, пов'язане з ускладненням демодулятора STC і зниженням завадостійкості системи. Тому важливою задачею є вибір методу обробки сигналів на приймальній стороні, який забезпечує задану якість передачі інформації і характеризується помірною обчислювальною складністю.

Метою роботи є порівняльний аналіз методів демодуляції сигналів в системі MIMO з STC з погляду їх ефективності та обчислювальної складності.

У загальному випадку структура системи MIMO має в своєму складі  $M_t$  передавачів (передавальних антен) і  $M_r$  приймачів (приймальних антен) (рис. 1). Передані сигнали після впливу релеєвських завмирань і білого гаусовського шуму (БГШ) у радіоканалі, надходять в  $M_r$  приймальних трактів.

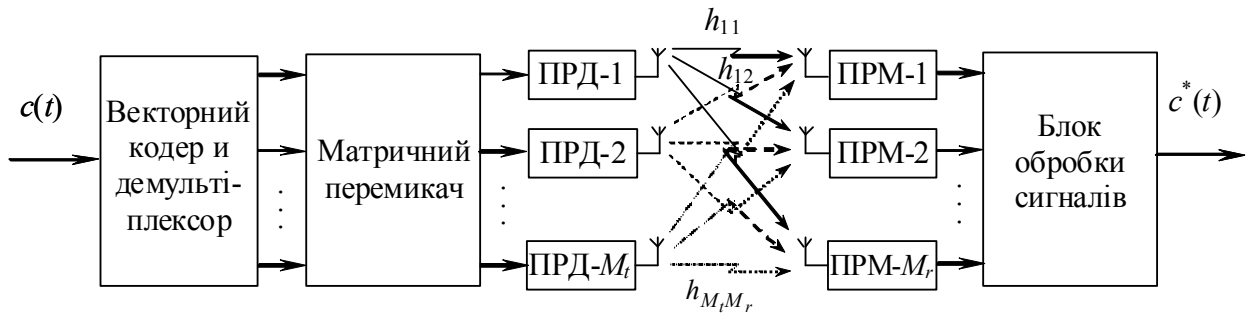


Рис. 1. Структурна схема системи MIMO

Відліки комплексних обвідних на виході  $M_r$  приймачів на одному інтервалі можна описати векторно-матричним рівнянням [6, 9]:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{A} + \mathbf{B}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{Z}$  – вектор, кожний компонент якого  $z_i$ ,  $i = \overline{1, M_r}$ , являє собою відлік комплексної обвідної на  $i$ -му вході демодулятора STC;  $\mathbf{A}$  – вектор, кожний компонент якого  $a_j$ ,  $j = \overline{1, M_t}$  – переданий комплексний інформаційний символ, що належить множині  $\{a^{(1)}, \dots, a^{(K)}\}$ ,  $K$  – кратність квадратурної амплітудної модуляції (КАМ);  $\mathbf{H}$  – матриця, кожний елемент якої  $h_{ij}$  – комплексний коефіцієнт передачі тракту поширення сигналу, який випромінюється  $j$ -ю антеною і приймається  $i$ -ю антеною;  $\mathbf{B}$  – вектор, кожний компонент якого  $b_i$  – відлік комплексного гаусовського шуму на  $i$ -му вході демодулятора STC, що має нульове середнє та дисперсію  $2\sigma^2$ .

На передавальному боці інформаційні символи  $a_i$  розділяються на блоки з  $L$  символів, відповідним чином обробляються і випромінюються через  $M_t$  передавальних антен за задану кількість часових інтервалів  $K_{\text{зад}}$ . Просторово-часовий код можна подати у вигляді

породжувальної матриці, у якій рядки відповідають передавальним антенам, а стовпці – часовим інтервалам передачі символів:

$$\begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1K_{\text{зад}}} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2K_{\text{зад}}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{M,1} & s_{M,2} & \dots & s_{M,K_{\text{зад}}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $s_{jk}$ ,  $j = \overline{1, M_t}$ ,  $k = \overline{1, K_{\text{зад}}}$  – функція від комплексних інформаційних символів  $a_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , яка випромінюється  $j$ -ю антеною на  $k$ -му часовому інтервалі.

Символьна швидкість системи MIMO визначається як відношення довжини блоку інформаційних символів  $L$  до кількості необхідних для передачі цього блоку часових інтервалів  $K_{\text{зад}}$ :  $R_{\text{STC}} = L/K_{\text{зад}}$ . Чим вища символьна швидкість  $R_{\text{STC}}$  просторово-часового коду, тим вища ефективність використання частотних ресурсів безпроводового каналу зв'язку.

Просторово-часові коди розділяють на два класи: ортогональні й неортогональні. Серед ортогональних кодів варто виділити код Аламоуті, породжувальна матриця якого має вигляд [7]:

$$G = \begin{pmatrix} a_1 & -a'_2 \\ a_2 & a'_1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Символьна швидкість коду Аламоуті  $R_{\text{STC}}=1$ . У матриці (3) рядки ортогональні один одному, те ж справедливо і для її стовпців. Завдяки цій властивості на приймальному боці стає можливим обчислення оцінок максимальної правдоподібності (МП) переданих символів з використанням алгоритму вагового додавання прийнятих сигналів. Енергетичний вигравш від застосування схеми Аламоуті з двома передавальними і однією приймальною антенами в порівнянні зі звичайною системою SISO дорівнює 7 дБ для ймовірності помилкового приймання  $P_{\text{пом}} = 10^{-2}$  при використанні чотирьохкратної фазової модуляції (ФМ-4).

На жаль, для систем з кількістю передавальних антен більше двох при використанні КАМ не існує ортогональних кодів зі швидкістю  $R_{\text{STC}} = 1$ . При переході до більшої кількості передавальних антен, наприклад, 3 і 4, символьна швидкість відповідних ортогональних кодів не перевищує 3/4. Символьна швидкість кодів для п'яти й більше передавальних антен не перевищує 1/2.

Підвищити пропускну здатність каналів зв'язку можна за допомогою неортогональних просторово-часових кодів. Символьна швидкість при неортогональному кодуванні може досягати величини, що відповідає кількості передавальних антен  $M_t$ , тобто за  $K_{\text{зад}}$  часових інтервалів можна передати блок з  $L = K_{\text{зад}} M_t$  інформаційних символів. Цій умові задовольняє код V-BLAST (від англ. Vertical Bell Labs Layered Space Time) [6, 7]. Іншим прикладом неортогонального коду є подвійний код Аламоуті.

На рис. 2 наведені характеристики демодуляції за методом максимальної правдоподібності для систем з 4 передавальними та 4 приймальними антенами, що використовують код V-BLAST (крива 2) і подвійний код Аламоуті (крива 1) для модуляції ФМ-4. Для демодуляції коду V-BLAST із символьною швидкістю 4 потрібне відношення сигнал/шум  $Q^2$  на 5 дБ вище (при  $P_{\text{пом}} = 10^{-2}$ ), чим для демодуляції подвійного коду Аламоуті із символьною швидкістю 2. Підвищення спектральної ефективності в системі MIMO за рахунок використання просторово-часового коду з більш високою символьною швидкістю при заданій кількості передавальних і приймальних антен призводить до зниження енергетичної ефективності системи.

Процес демодуляції STC зводиться до розв'язання рівняння (1) щодо невідомого  $a$ , але оскільки в рівнянні присутній випадковий компонент у вигляді гауссовського шуму  $\mathbf{V}$ , традиційні методи рішення лінійних рівнянь не забезпечують необхідної точності. Для обчислення оцінок переданих символів можуть використовуватися різні методи: метод обнуління (ZF – Zero Forcing), метод мінімуму середньоквадратичного відхилення (МСКВ), метод послідовного виключення демодульованих компонент (SIC – Successive Interference

Cancellation), метод максимальної правдоподібності (МП), метод сферичного декодування (СД) тощо [6].

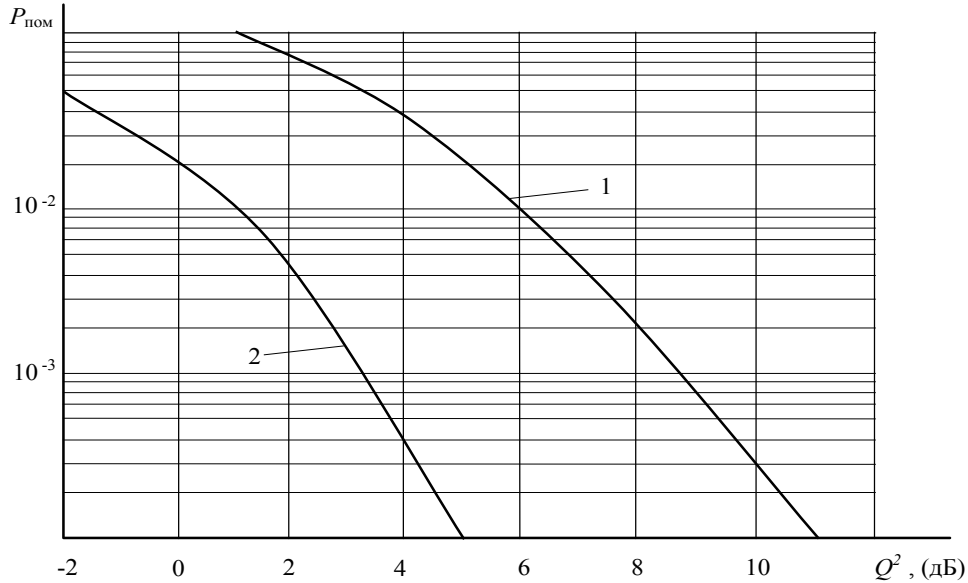


Рис. 2. Залежності ймовірності помилкового приймання від відношення сигнал/шум

Оцінки переданих символів за методом ZF обчислюються таким чином:

$$\hat{\theta} = (\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}'\mathbf{Y} . \quad (4)$$

Вираз для обчислення оцінки МСКВ має вигляд:

$$\hat{\theta} = (\mathbf{H}'\mathbf{H} + 2\sigma^2\mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}'\mathbf{Y} . \quad (5)$$

Метод МСКВ дозволяє врахувати наявність шуму й забезпечує більше високу завадостійкість у порівнянні з ZF. Обчислювальна складність обох методів пропорційна  $M_t^3$ .

Істотно кращі характеристики в порівнянні з методами ZF і МСКВ має алгоритм SIC, що зводиться до послідовного виключення демодульованих компонент з прийнятого сигналу. На кожній ітерації цього алгоритму за методом МСКВ обчислюється жорстка оцінка однієї з компонент, переданої  $i$ -ю антеною, репліка якої потім віднімається з прийнятого сигналу. Метод SIC має істотний недолік – ефект "розмноження помилок". Кількість арифметичних операцій у цьому методі пропорційно  $M_t^4$ .

Найкращі характеристики серед відомих методів демодуляції має метод МП. Оцінка інформаційних символів за методом МП здійснюється за допомогою перебору всіх комбінацій вектора  $\theta$  з множини можливих значень вектора символів КАМ  $\Theta = \left\{ \theta^{(1)}, \dots, \theta^{(K_{\text{зад}}^{M_t})} \right\}$ :

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \|\mathbf{Y} - \mathbf{H}\theta\|^2 . \quad (6)$$

Обчислювальна складність цього алгоритму експоненціально зростає в міру збільшення кількості передавальних антен  $M$  і пропорційна величині  $K_{\text{зад}}^{M_t}$ . Реалізувати цей алгоритм у реальному часі для системи V-BLAST, наприклад, при  $M_t = 4$  і використанні модуляції КАМ-16, досить проблематично. У цьому випадку на інтервалі тривалості одного інформаційного символу необхідно здійснити перебір  $16^4 = 65536$  комбінацій символів.

У сферичному декодері на відміну від алгоритму МП здійснюється скорочений перебір комбінацій шляхом обмеження їх деякою підмножиною комбінацій  $\Theta^d \in \Theta$  [14]. У межах підмножини  $\Theta^d$  відстань Хеммінга від кожної з комбінацій до деякої початкової оцінки вектора  $\theta$  не перевищує величини  $d$  – радіуса "сфери пошуку". Якість демодуляції  $\theta$  залежить від радіуса  $d$ . Чим більше радіус, тим вища достовірність оцінки, обчисленої за цим методом. Однак, при збільшенні  $d$  збільшується розмір підмножини векторів  $\Theta^d$ , яка перевіряється, і обчислювальна складність алгоритму СД. Недоліком цього алгоритму є

випадкова обчислювальна складність, що залежить від відношення сигнал/шум. При невисокій середній обчислювальній складності алгоритму СД її максимальна величина може збігатися з обчислювальною складністю алгоритму МП. Цей факт ускладнює апаратну реалізацію СД, оскільки обмеження обчислювальної складності в апаратних засобах призводить до деградації характеристик алгоритму.

В табл. 1 та на рис. 3 наведені характеристики описаних вище методів демодуляції для системи V-BLAST з 4 передавальними та 4 приймальними антенами при модуляції КАМ-16,

де крива 1 – завадостійкість методу ZF, 2 – методу МКСВ, 3 – методу SIC, 4 – методу МП. Характеристики демодуляції за методом СД збігаються з характеристиками методу МП при необмеженій кількості кроків. Отримані залежності ймовірності помилки від відношення сигнал/шум  $Q^2$  показують, що відомі алгоритми з прийнятною обчислювальною складністю значно поступаються за характеристиками завадостійкості алгоритму МП.

Метод демодуляції	Відношення сигнал/шум $Q^2$ (дБ) при $P_{\text{пом}} = 10^{-2}$	Обчислювальна складність
ZF	25	$M_t^3$
МКСВ	22,5	$M_t^3$
SIC	17,2	$M_t^4$
МП	14	$K_{\text{зад}}^{M_t}$
СД	14	залежить від відношення сигнал/шум

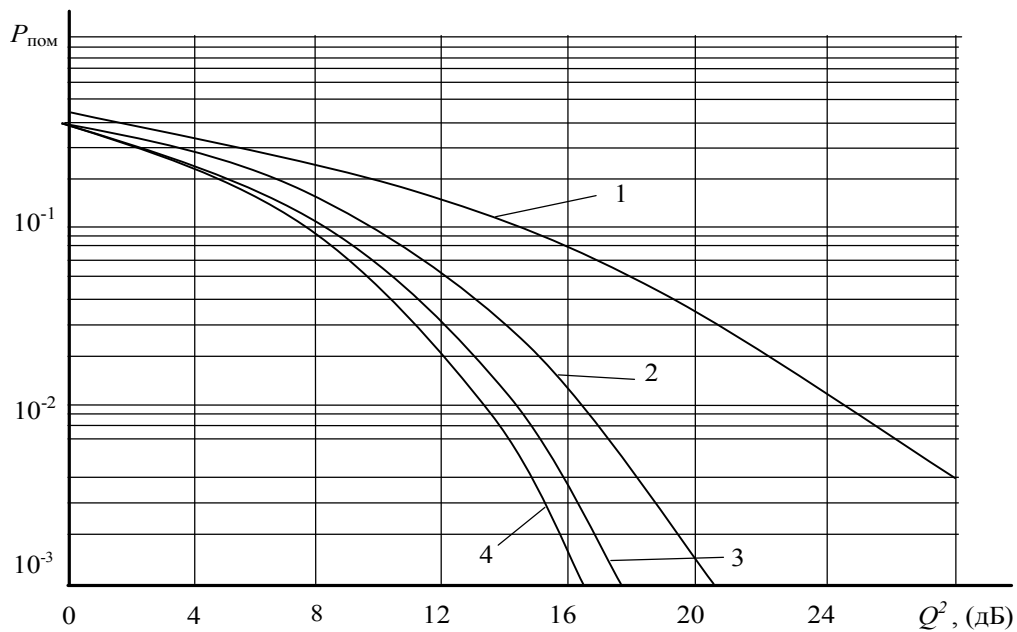


Рис. 3. Характеристики різних методів демодуляції

Проведений аналіз дозволяє зробити **наступні висновки**.

Найкращу завадостійкість серед відомих методів демодуляції має метод максимальної правдоподібності. Перспективним напрямком подальших досліджень для підвищення спектральної та енергетичної ефективності систем МІМО є розробка ефективних алгоритмів демодуляції сигналів з характеристиками, що наближаються до характеристик методу максимальної правдоподібності з прийнятною обчислювальною складністю.

### Література

1. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / [В.М. Вишнеvский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович]. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко., Ю.А. Распаев. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.
3. Ільченко М.Ю. Телекомунікаційні системи широкосмугового радіодоступу / Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. – К.: Наукова думка, 2009. – 312 с.

4. Ильченко М.Е. Информационно-телекоммуникационные системы широкополосного радиодоступа / Ильченко М.Е., Кравчук С.А. // Проблемы управления и информатики. – 2006. – № 1–2. – С. 285–293.
5. 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.
6. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит. – М.: Техносфера, 2011 – 904 с.
7. Слюсар В. Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов / В. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 8. – С. 52–58.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Черников В.А. Сферический детектор для канала ММО 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].