

УДК 621.391

О.Г. Жук

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ

## МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО ВИБОРУ КІЛЬКОСТІ КАНАЛІВ В СИСТЕМІ МІМО

В роботі запропоновано методику адаптивного вибору числа каналів системи МІМО при збереженні ймовірності бітової помилки нижче заданої межі. Методика дозволяє працювати при низьких значеннях відношення сигнал/шум в режимах з обмеженою кількістю паралельних каналів передачі.

**Ключові слова:** сигнально-завадова обстановка, швидкість передачі інформації, ймовірність бітової помилки, просторово-часова обробка, система МІМО, паралельні канали.

### Вступ

Однією з технологій, що дозволяють значно збільшити пропускну здатність радіоканалів, є технологія „багато входів – багато виходів” (МІМО – Multiple-Input Multiple-Output), яка дозволяє більш ефективно використовувати потужність передавача і боротися із завмираннями сигналів [1–8].

Підвищення ефективності досягається за рахунок використання методів просторово-часової обробки (STC – Space Time Coding), що забезпечують передачу і приймання паралельних потоків інформації.

Теоретично пропускну здатність системи МІМО 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). Для просторового мультиплексування паралельних потоків в основному використовуються метод просторового мультиплексування через сингулярне розкладання (ПМСР) каналної матриці та алгоритм V-BLAST (Vertical Bell Laboratories Layered Space Time Architecture) [6–15].

Метод ПМСР потребує передачі великого обсягу інформації по каналу зворотного зв'язку, що важко реалізувати для високомобільних абонентів. Ефективність алгоритму V-BLAST, який не використовує сингулярне розкладання, знижується із-за міжканальної інтерференції.

Тому, підвищити спектральну і енергетичну ефективність таких систем можливо за рахунок адаптації числа переданих потоків в каналі зв'язку при просторовому мультиплексуванні.

Тому **метою статті** є розробка методики адаптивного управління кількістю каналів системи МІМО, яка забезпечує задану якість передачі інформації і характеризується помірною обчислювальною складністю.

У загальному випадку структура системи МІМО 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 гаусівського шуму (БГШ) у радіоканалі, надходять в  $M_r$  приймальних трактів.

Структурна схема традиційної системи МІМО з V-BLAST зображена на рис. 1 [6].

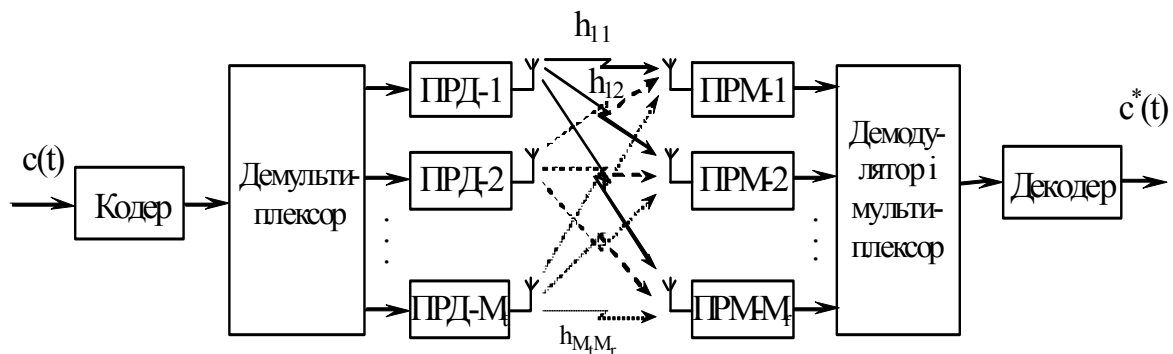


Рис. 1. Структурна схема системи МІМО

Сигнали на вході  $M_r$  приймальних трактів системи МІМО описуються рівнянням [5; 10]:

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

де  $\mathbf{Z}$  – вектор прийнятих комплексних символів;  $\mathbf{H}$  – матриця, кожний елемент якої  $h_{ij}$  – комплексний коефіцієнт передачі тракту поширення сигналу, який випромінюється  $j$ -ю антеною і приймається  $i$ -ю антеною;  $\mathbf{A}$  – вектор переданих символів;  $\mathbf{V}$  – вектор, кожний компонент якого  $b_i$  – відлік суміші гаусівського шуму та завади на  $i$ -му вході демодулятора.

Розглянемо МІМО-канал з однаковою кількістю передавальних та приймальних антен  $M_t = M_r$ .

Сингулярне розкладання матриці  $\mathbf{H}$  має вигляд:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H, \quad (2)$$

де  $\mathbf{U}$  і  $\mathbf{V}$  – унітарні матриці з комплексними елементами; верхній індекс  $H$  означає транспонування матриці та комплексне сполучення її елементів;  $\mathbf{D}$  – діагональна матриця сингулярних чисел  $\lambda$  (коефіцієнтів підсилення по напрямку для власних векторів),

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{\min} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Припустимо, що  $\mathbf{A} = \{a_i\}$  – набір можливих переданих векторів (тобто багатовимірне сузір'я сигналу).

Сигнал, прийнятий без шуму, належить набору  $\mathbf{Y} = \{y_i\}$ , де  $y_i = \mathbf{H}a_i$ . Імовірність помилки залежить від мінімальної евклідової відстані між векторами в наборі  $\mathbf{Y}$ . Приймач максимальної правдоподібності вибирає елемент набору  $\mathbf{Y}$ , що найбільш близький до прийнятого вектора  $\mathbf{Z}$ . Тоді, щоб відбулася символна помилка, необхідне виконання умови, щоб норма шумового вектора  $\mathbf{V}$  була б більше половини мінімальної евклідової відстані  $d_{\min}$ :

$$\|\mathbf{V}\| \geq d_{\min}/2. \quad (4)$$

Мінімальна відстань може бути знайдена як:

$$d_{\min} = \min_{i \neq j} \|y_i - y_j\| = \min_{i \neq j} \|\mathbf{H}(a_i - a_j)\|. \quad (5)$$

З лінійної алгебри відомо [6], що для будь-якого вектора  $\mathbf{s}$  справедлива нерівність:

$$\|\mathbf{H}\mathbf{s}\| \geq \lambda_{\min} \|\mathbf{s}\|.$$

Тоді

$$\|\mathbf{H}(a_i - a_j)\| \geq \lambda_{\min} \|a_i - a_j\|. \quad (6)$$

Отже,

$$d_{\min} \geq \lambda_{\min} \min_{i \neq j} \|a_i - a_j\|. \quad (7)$$

Таким чином, якщо мінімальна евклідова відстань на передачі дорівнює  $d_0$ , то після проходження радіоканалу  $d_{\min}$ :

$$d_{\min} \geq \lambda_{\min} d_0. \quad (8)$$

Це означає, що велике мінімальне сингулярне число гарантує велику мінімальну евклідову від-

стань після проходження радіоканалу та, як наслідок, малу ймовірність бітрової помилки на прийомі.

Використаємо матричне рівняння МІМО-системи (1). Відношення сигнал/шум для  $k$ -го каналу може бути записано як:

$$Q_k^2 = \frac{E_c \left| \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_k \right|^2}{M_r G_0 \|\mathbf{g}_k\|^2 + E_c \sum_{j \neq k} \left| \mathbf{g}_k^H \mathbf{h}_j \right|^2}, \quad (9)$$

де  $E_c$  – енергія сигналу,  $G_0$  – спектральна щільність шуму,  $\mathbf{g}$  – вектор підставки в кореляторі  $k$ -го каналу.

Для спрощеного прийому методом форсування нуля [6; 16] відношення сигнал/шум визначається наступною формулою:

$$Q_k^2 = \frac{E_c}{M_r G_0 (\mathbf{H}^H \mathbf{H})_{kk}^{-1}}. \quad (10)$$

Апроксимація для виразу (10) може бути отримана з використанням теореми Релея-Рітца [15]. Даний результат використовується, щоб обмежити вираз (10):

$$Q_k^2 \geq \lambda_{\min}^2(\mathbf{H}) \frac{E_c}{M_r G_0}. \quad (11)$$

Оскільки відношення сигнал/шум обмежено мінімальним сингулярним числом, то граничне мінімальне сингулярне число дорівнює:

$$\lambda_{\min \text{ гран}}(\mathbf{H}) = \sqrt{Q_{\text{гран}}^2 \frac{M_r G_0}{E_c}}. \quad (12)$$

Запропонована методика вибору числа каналів, схема алгоритму реалізації якої подана на рис. 2, складається з наступних етапів.

*Введення вихідних даних.*

Вводяться параметри системи МІМО і каналу зв'язку  $\Phi = \{\varphi_i\}$ ,  $i = \overline{1, 8}$ , де  $\varphi_1 \dots \varphi_8$  – кількість передавальних та приймальних антен, вид модуляції, розмірність ансамблю сигналів, тривалість кадру на виході демодулятора, тривалість кадру на виході декодера, швидкість коригувального коду, величина кодової відстані.

*Оцінка стану каналу зв'язку.* На даному етапі за допомогою одного з відомих методів [11–14] оцінюється стан багатопроменевого каналу зв'язку та визначається його канална матриця

*Адаптивний вибір кількості каналів системи МІМО.* Проводиться розрахунок сингулярних чисел. Якщо мінімальне сингулярне число більше граничного (блок 4), то такий режим буде задовольняти вимогам до ймовірності бітрової помилки – вихід із циклу. В іншому випадку зменшуємо число каналів на один (блок 5).

Для кожної комбінації каналів, що залишилися, будемо мати по одному мініальному сингулярному числу. Залишимо ті комбінації, у яких мінімальне сингулярне число більше порога.

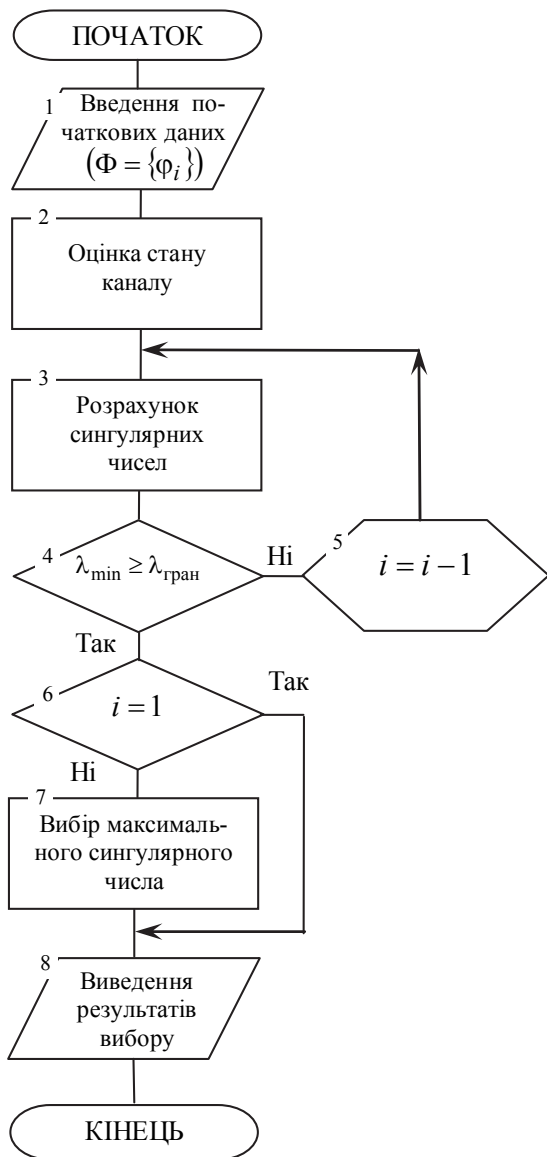


Рис. 2. Схема алгоритму реалізації запропонованої методики

Якщо такі комбінації є, виберемо ту з них, у якій мінімальне сингулярне число є максимальним (блок 7) вихід із циклу. Якщо залишився один канал передачі – вихід із циклу (блок 6).

Запропонований алгоритм дозволяє не тільки визначити максимально припустиме число паралельних каналів для передачі даних, але й вибрати найбільш завадостійкі з них.

Для системи MIMO 4×4 з чотирьохпозиційною квадратурною модуляцією для релеєвського каналу зв'язку було проведено статистичне моделювання в середовищі MATLAB. На рис. 2 подано залежності ймовірності помилкового приймання відношення сигнал-шум, де крива 1 – завадостійкість алгоритму максимізації пропускну здатності, 2 – завадостійкість запропонованого алгоритму адаптивного вибору кількості каналів в системі MIMO, 3 – при використанні чотирьох одночасних просторово мультплексуємих каналів (V-BLAST 4×4), 4 – при використанні одного каналу передачі.

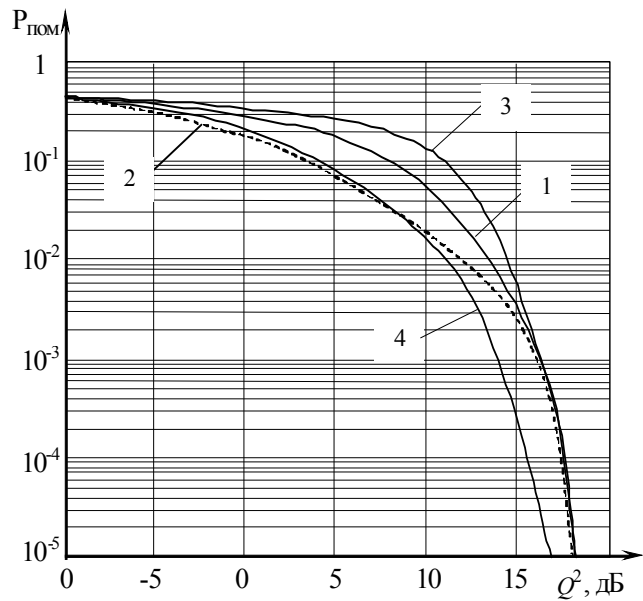


Рис. 3. Графіки залежностей ймовірності помилкового приймання від відношення сигнал/шум

Результати імітаційного моделювання показують, що запропонована методика дозволяє реалізувати адаптивне перемикання числа каналів при збереженні ймовірності бітової помилки нижче заданої межі й працювати при низьких значення відношення сигнал/шум в режимах з обмеженою кількістю паралельних каналів передачі.

Розглянемо практичну значимість отриманих наукових результатів.

Автором статті розроблено структурну схему програмованої радіостанції [17], до складу якої входить блок просторо-часової адаптації. Зазначений блок вирішує завдання вибору параметрів системи MIMO в залежності від сигнально-завадової обстановки.

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок про те, що зазначені дослідження мають як теоретичне так і практичне значення.

### Висновки

1. Розроблено методику адаптивного вибору кількості каналів в системі MIMO. Сутність зазначеної методики полягає у адаптивному виборі кількості каналів системи MIMO, при збереженні ймовірності бітової помилки нижче заданої межі, в залежності від радіоелектронної обстановки. Методика дозволяє працювати при низьких значення відношення сигнал/шум в режимах з обмеженою кількістю паралельних каналів передачі.

Зазначена методика підвищує енергетичну та частотну ефективність системи MIMO.

Використання розробленої методики дозволить підвищити завадозахищеність системи радіозв'язку на 15–18% у порівнянні з відомими, а з у поєднанні з розробленою методикою безеталонної оцінки [14] на 22–25%.

Напрямок подальших досліджень є розробка удосконаленої методики адаптивного управління параметрами системи радіозв'язку спеціального призначення.

## Список літератури

1. Вишневикий В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневикий, 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. Лыченко М.Ю. Телекоммуникаційні системи широкосмугового радіодоступу / М.Ю. Лыченко, С.О. Кравчук. – К.: Наукова думка, 2009. – 312 с.
4. Ильченко М.Е. Информационно-телекоммуникационные системы широкополосного радиодоступа / М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук // 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 пропускної здатності і ймовірності помилки багатоантенної радіосистеми з просторово-часовим кодуванням в каналі із замираннями / С.О. Кравчук, Д.А. Міночкін // 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 / E.G. Larsson, P. Stoica, J. Li // IEEE Trans. Signal Processing. – 2002. – V. 50. – No. 4. – P. 937–944.

11. Tarokh V. Space-time block coding for wireless communication: Performance results / V. Tarokh, H. Jafarkhanii, A.R. Calderbank // 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 / J.G. Andrews // IEEE Wireless Communications Magazine. – 2005. – Vol. 12, № 2. – P. 19–29.

14. Жук О.Г. Методика оцінювання параметрів сигналів з цифровими видами модуляції / О.Г. Жук // Збірник наукових праць Полтавського національного університету імені Юрія Кондратюка “Системи навігації, управління та зв'язку”. – 2015. – №4(36). – С. 137–139.

15. Шишацький А.В. Аналіз існуючих методів оцінки стану каналу зв'язку / А.В. Шишацький, В.В. Лютов // VI Науково-технічна конференція “Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки”: тези доповідей, 15–19 грудня 2015 року. – К.: ЦНДІ ОБТ ЗС України.: – 2015. – С. 398.

16. Hamid Jafarkhani. Space-Time Coding: theory and practice / Hamid Jafarkhani. // Cambridge University Press, 2005. – 302 p.

17. Патент України на корисну модель №106859. МПК Н04В 1/70(2016.01), Н04В 70/00. Програмована радіостанція [Текст] / Шишацький А.В., Кушинов О.В., Жук О.Г., Голуб В.А., Куровська Т.Ю., Башкиров О.М., Лютов В.В. – Заявл. 11.11.2015 року, патент опубл. 10.05.2016 року, Бюл. №9.

Надійшла до редколегії 10.01.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. І.О. Романенко, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ.

## МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО ВИБОРА КОЛИЧЕСТВА КАНАЛОВ В СИСТЕМЕ ММО

А.Г. Жук

В работе предложена методика адаптивного выбора количества каналов системы ММО при сохранении вероятности битовой ошибки ниже заданной границы. Методика позволяет работать при низких значениях отношения сигнал/шум в режимах с ограниченным количеством параллельных каналов передачи.

**Ключевые слова:** сигнально-помеховая обстановка, скорость передачи информации, вероятность битовой ошибки, пространственно-временная обработка, система ММО, параллельные каналы.

## METHOD OF ADAPTIVE CHOOSING NUMBER CHANNELS IN MIMO SYSTEM

A.G. Zhuk

In article offer method of adaptive choosing number channels in mimo system with saving bit error probability under specified border. Method allow to work with small attitude signal/noise in mode with limited number parallel channels transfer.

**Keywords:** signal-jamming environment, speed of information transfer, bit error probability, space-time coding, parallel channels.