

МЕТОД СУМІСНОЇ ДЕМОДУЛЯЦІЇ ТА ДЕКОДУВАННЯ СИГНАЛІВ У СИСТЕМІ МІМО

В роботі запропонований метод обробки сигналів в системах МІМО з просторово-часовою обробкою при об'єднанні процесів демодуляції і декодування. Метод дозволяє значно підвищити завадостійкість системи при помірній обчислювальній складності.

Борисов О.В., Климович С.О., Боголий С.Н. Метод совместной демодуляции и декодирования сигналов в системе МІМО. В работе предложен метод обработки сигналов в системах МІМО с пространственно-временной обработкой при объединении процессов демодуляции и декодирования. Метод позволяет значительно повысить помехоустойчивость системы при умеренной вычислительной сложности.

O. Borisov, S. Klimovich, S. Bogoliy Method of joint demodulation and decoding of signals in the MIMO system. The paper proposes a method for processing signals in systems past with spatio-temporal processing when combining demodulation and decoding processes. The method makes it possible to significantly increase the noise immunity of the system with moderate computational complexity.

Ключові слова: просторово-часова обробка, система МІМО, демодуляція.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Основним фактором, який обмежує збільшення швидкості передачі інформації, є явище багатопроменевості в радіоканалі між мобільним користувачем і базовою станцією. Багатопроменеві канали характеризуються випадковою зміною коефіцієнта передачі, тому параметри сигналів на вході приймача є випадковими й невідомими. Завадостійкість каналів передачі при цьому погіршується, оскільки при прийманні немає можливості використати відомості про дійсні значення параметрів сигналів [1, 2]. Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є застосування методів просторової обробки сигналів у системах радіодоступу, зокрема технології „багато входів – багато виходів” (*Multiple-input multiple-output* – МІМО) [3 – 8]. У технології МІМО поєднані просторово-часові методи приймання з використанням адаптивних антен і методи просторово-часового кодування й просторово-часового розділення сигналів. Підвищення ефективності системи досягається за рахунок використання методів просторово-часової обробки (STC – Space Time Coding), що забезпечують передачу і приймання паралельних потоків інформації.

Аналіз останніх публікацій. Теоретично пропускна 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). Аналіз відомих систем STC [7, 9 – 13] показує, що підвищення спектральної ефективності системи МІМО, як правило, пов'язане з ускладненням демодулятора STC і зі зниженням завадостійкості системи. Для обчислення оцінок переданих символів можуть використовуватися різні методи: метод мінімуму середньоквадратичної помилки, алгоритм V-BLAST (Vertical Bell Laboratories Layered Space Time Architecture), метод максимальної правдоподібності тощо [7, 14]. Аналіз відомих методів демодуляції сигналів в системах МІМО з просторово-часовою обробкою виявив їх основні недоліки [14]. Так одні мають низьку точність, а інші велику обчислювальну складність. Тому метою роботи є розробка методу обробки сигналів на приймальному боці, який забезпечує задану якість передачі інформації і характеризується помірною обчислювальною складністю.

Виклад основного методу. 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 гаусовського шуму (БГШ) у радіоканалі, надходять в M_r приймальних трактів.

У традиційній схемі V-BLAST [6], здійснюється послідовне завадостійке кодування вхідного потоку двійкових сигналів (рис. 1).

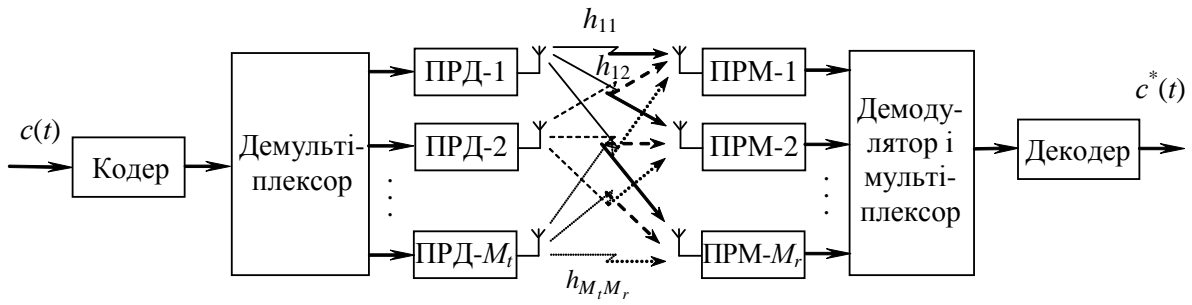


Рис. 1. Структурна схема системи MIMO

Покращити завадостійкість системи V-BLAST можна, об'єднавши в одному циклі виконання процедур демодуляції V-BLAST і завадостійкого декодування при паралельному завадостійкому кодуванні (рис. 2).

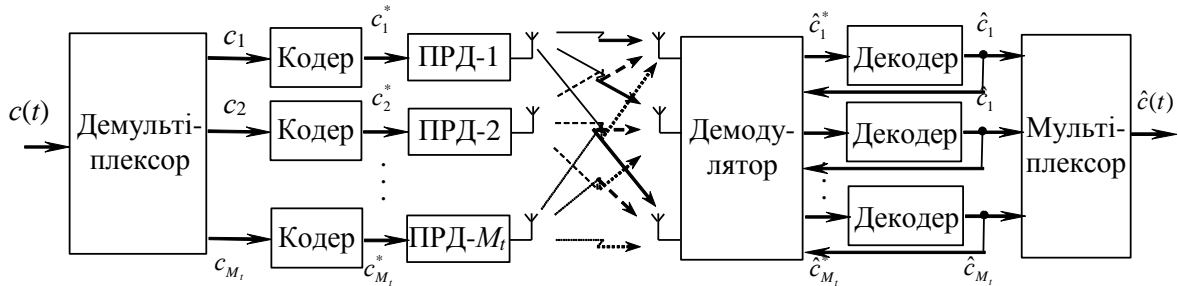


Рис. 2. Структурна схема системи MIMO при об'єднанні процесів демодуляції і декодування

На передавальному боці при паралельному завадостійкому кодуванні, двійковий потік c демультіплексується на M_t бінарних потоків $c_1 \dots c_{M_t}$. Після цього у кожній з M_t передавальних гілок двійкові інформаційні символи c_i поєднуються в кадри довжиною L і кодуються в кодері. На виході кодера отримуємо кадр символів c_i^* довжиною L^* , які модулюються за допомогою квадратурної амплітудної модуляції (КАМ), після чого символи a_i випромінюються через передавальну антену за L^* часових інтервалів.

Метод обробки сигналів в приймальному тракті системи MIMO, схема алгоритму реалізації якої подана на рис. 3, складається з наступних етапів.

Введення вихідних даних. Вводяться параметри передавального пристрою і каналу зв'язку $\Psi = \{\psi_i\}$, $i = \overline{1, 9}$, де $\psi_1 \dots \psi_9$ – кількість передавальних та приймальних антен, кількість ітерацій, розмірність ансамблю сигналів, тривалість кадру на виході демодулятора L^* , тривалість кадру на виході декодера L , швидкість коригувального коду, величина кодової відстані, \mathbf{H} – канална матриця.

Демодуляція сигналу за методом мінімуму середньоквадратичного відхилення (МСКВ). Сигнали на вході M_r приймачних трактів на j -ом часовому інтервалі (тривалість інтервалу дорівнює тривалості одного комплексного символу) описуються рівнянням [7, 9]:

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

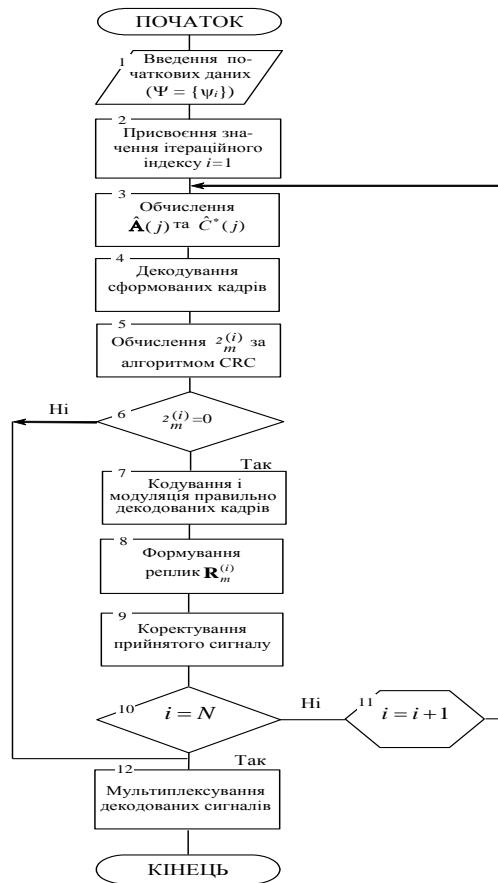


Рис. 3. Схема алгоритму реалізації запропонованого методу обробки сигналів в системі MIMO

де $\mathbf{Z}(j)$ – вектор прийнятих комплексних символів на j -му часовому інтервалі, з $j = \overline{1, L^*}$; \mathbf{H} – матриця, кожний елемент якої h_{ij} – комплексний коефіцієнт передачі тракту поширення сигналу, який випромінюється j -ю антеною і приймається i -ю антеною; $\mathbf{A}(j)$ – вектор переданих символів на j -му часовому інтервалі; \mathbf{V} – вектор, кожний компонент якого b_i – відлік комплексного гаусовського шуму на i -му вході демодулятора STC, що має нульове середнє та дисперсію $2\sigma^2$ з нульовим середнім та кореляційною матрицею $\mathbf{R}_V = 2\sigma^2\mathbf{1}$.

Вектор $\mathbf{Z}^{(i)}(j)$ (тобто прийнятий вектор $\mathbf{Z}(j)$, скоректований на i -ї ітерації) надходить на вхід демодулятора, де вектор $\mathbf{Z}^{(i)}(j)$ демодулюється за методом МСКВ, тобто обчислюється оцінка [6, 7]

$$\hat{\mathbf{A}}(j) = (\mathbf{H}'\mathbf{H} + 2\sigma^2\mathbf{I})^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{Z}(j), \quad (2)$$

де знак ' означає операцію ермитова сполучення.

Потім для обчисленої оцінки комплексного вектора $\hat{\mathbf{A}}(j)$ визначається відповідний вектор символів $\hat{\mathbf{C}}^*(j)$ (виконується операція поелементного відображення комплексних символів КАМ на двійкові символи). На кожній ітерації на виході демодулятора в кожній гілці приймання формуються кадри символів $\hat{\mathbf{C}}_m^{*(i)}$ довжиною L^* , причому $1 \leq m \leq M_t$, на першій ітерації $m = 1 \dots M_t$.

Декодування прийнятого сигналу. Сформовані кадри $\hat{N}_m^{*(i)}$ декодуються, у результаті отримуємо кадр $\hat{\mathbf{C}}_m^{(i)} = [\hat{c}_m^{(i)}(1), \hat{c}_m^{(i)}(2), \dots, \hat{c}_m^{(i)}(L)]$, тобто кадр декодованого бінарного потоку \hat{c}_m довжиною L . Крім того, для кожного кадру обчислюється індикатор якості декодування $z_m^{(i)}$,

наприклад, за алгоритмом CRC – циклічної перевірки з надлишковим кодом (CRC – Cyclical Redundancy Check). Якщо індикатор якості кадру $z_m^{(i)}$ має значення 0, то приймається рішення про приймання кадру без помилок, якщо $z_m^{(i)} = 1$, то вважається, що кадр прийнятий з помилками. *Перевірка якості декодування сигналу.* Перевіряються індикатори якості $z_m^{(i)}$ декодованих на i -й ітерації кадрів. Якщо для деякої кількості гілок приймання індикатори восстановлених кадрів дорівнюють 0, то здійснюється перехід до блоку 5. Якщо всі $z_m^{(i)}$ дорівнюють 1 або 0, то здійснюється перехід до блоку 8.

Повторне кодування і модуляція правильно декодованих кадрів. Правильно декодовані на i -й ітерації кадри в кожній галузі проходять операції кодування і модуляції, аналогічні тим, які виконувалися на передавальному боці. У результаті в кожній гілці одержують $\tilde{a}_m^{(i)} = [\tilde{a}_m^{(i)}(1), \tilde{a}_m^{(i)}(2), \dots, \tilde{a}_m^{(i)}(L^*)]$ – кадр відновлених на i -й ітерації комплексних символів, переданих через антену з номером m .

Коректування прийнятого сигналу. Формуються репліки правильно декодованих символів:

$$\mathbf{R}_m^{(i)} = \mathbf{H}_m \tilde{a}_m^{(i)}, \quad (3)$$

де $\mathbf{R}_m^{(i)} = [\mathbf{r}_m^{(i)}(1), \mathbf{r}_m^{(i)}(2), \dots, \mathbf{r}_m^{(i)}(L^*)]$ – репліки символів відновленого на i -й ітерації кадру, переданих через антену з номером m ; \mathbf{H}_m – m -й стовпець матриці \mathbf{H} . Після цього коректуються вектори прийнятих комплексних отсчетов на тривалості одного кадру:

$$\mathbf{Z}^{(i+1)}(j) = \mathbf{Z}^{(i)}(j) + \sum_{m \in \nu^{(i)}} \mathbf{r}_m^{(i)}(j), \quad (4)$$

де $\mathbf{Z}^{(i)}(j)$ – скоректований вектор прийнятих сигналів на j -му часовому інтервалі i -ї ітерації; $\mathbf{r}_m^{(i)}(j)$ – репліка відновленого символу m -ї гілки на j -му часовому інтервалі i -ї ітерації; $\nu^{(i)}$ – множина номерів гілок приймання, для яких (і) $z_m^{(i)} = 0$. На наступній ітерації $i+1$ демодуляція і декодування виконуються для всіх потоків $m = 1 \dots M_t$, за винятком $\nu^{(i)}$ правильно декодованих потоків.

Об'єднання декодованих кадрів. Після закінчення всіх ітерацій декодовані кадри всіх бінарних потоків $\hat{c}_1 \dots \hat{c}_{M_t}$ мультиплекуються в один бінарний потік \hat{c} .

Висновок: Отже для системи V-BLAST 8x8 з модуляцією КАМ-16 з використанням згорткового кодера зі швидкістю кодування 1/2 і довжиною кодового обмеження 9 було проведено статистичне моделювання в середовищі MATLAB (рис. 4, 5).

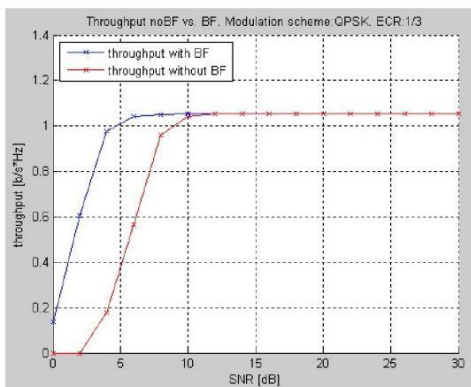


Рис. 4. Системи V-BLAST 8x8 з модуляцією КАМ-16

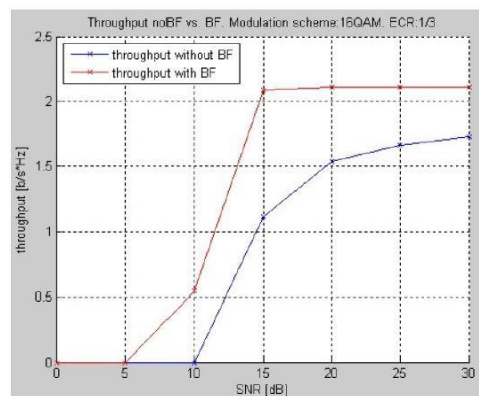


Рис. 5. Запропонований ітераційний метод на базі методу МСКВ

Результати моделювання показують, що запропонований ітераційний метод спільної демодуляції і декодування на базі методу МСКВ дозволяє значно підвищити завадостійкість системи, і при ймовірності помилкового приймання $P_{\text{пом}} = 10^{-5}$ досягти вигащу 2 дБ при значно меншій обчислювальній складності в порівнянні із традиційною схемою V-BLAST з послідовною демодуляцією та декодуванням на базі демодулятора максимальної правдоподібності (рис. 5). Наявність енергетичного вигащу пояснюється тим, що при ітераційній демодуляції-декодуванні враховується додаткова інформація про кореляцію символів усередині кодованого кадру, що не враховується в традиційній схемі з демодулятором максимальної правдоподібності.

Напрямок подальшої роботи є дослідження підвищення завадостійкості системи, і досягнення енергетичного вигащу більше ніж 2 дБ при зменшенні обчислювальної складності в порівнянні із традиційною схемою V-BLAST.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. под общ. ред. А. В. Назаренко. – М.: „Вильямс”, 2003. – 1104 с.
2. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений / Финк Л.М. – М.: Сов. радио, 1970. – 727 с.
3. Кравчук С.О. Аналіз методів обробки сигналів у МІМО-системах / Кравчук С.О., Міночкін Д.А. // Збірник матеріалів ІV-го науково-практичного семінару „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 22 листопада 2007 р., м. Київ. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2007. – С. 32 – 34.
4. Кувшинов О.В. Оцінка ефективності систем радіодоступа з технологією МІМО / Кувшинов О.В., Міночкін Д.А. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2006. – № 1. – С. 55.
5. Вишнеvский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
6. Ільченко М.Ю. Телекомунікаційні системи широкосмугового радіодоступу / Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. – К.: Наукова думка, 2009. – 312 с.
7. Ali M. Massive MIMO for fifth generation wireless system / M. Ali, et al. // B. Sc. Project, University of Ibb. – Yemen, 2014.
8. Слюсар В. Системи МІМО: принципи побудови і обробка сигналів / В. Слюсар // Електроніка: Наука, Технологія, Бізнес. – 2005. – № 8. – С. 52 – 58.
9. Ngo H. Q. Massive MIMO: fundamental and system design / H. Q. Ngo // Dissertation, Linköping University. – Sweden, 2015. – URL: http://liu.se/elliit/artiklar-3/1.681525/MassiveMIMO_FundamentalsandSystemDesigns.pdf. 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. – 2015. – V. 50. – No. 4. – P. 937 – 944.
10. 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.
11. 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.
12. Hamid Jafarkhani. Space-Time Coding: theory and practice // Cambridge University Press, 2005 – 302 p.
13. Борисов О.В., Ольшанський В.В., Уманець Я.І. Аналіз методів оцінки сигналів в системі МІМО. // Труды Університету збірник № 2 (108) ст. 208 – 214, інв.45139.
14. Choi J. Downlink training techniques for FDD massive MIMO systems: Open-loop and closed-loop training with memory / Junil Choi, David J. Love, Patrick Bidigare // IEEE J. Selected Topics Signal Processing. – Oct. 2014. – Vol. 8, No. 5. – P. 802 – 814. – DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2313020.