

**МЕТОДИ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО БЛОЧНОГО
КОДУВАННЯ З ІНДЕКСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ПІДНЕСУЧИХ
OFDM ДЛЯ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНИХ ТА НЕСТАЦІОНАРНИХ
КАНАЛІВ БЕЗПРОВОДОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

Солодовник В.І., Науменко М.І.

*Військовий інститут телекомунікацій та
інформатизації ім. Героїв Крут, Київ, Україна
E-mail: teenex@ukr.net*

Запропоновано нову спектральну та енергоефективну сигнально-кодovu конструкцію (СКК) із об'єднаною ортогонально-частотно-індексною модуляцією та просторово-часовим блочним кодуванням, а також її завадостійку версію в умовах фазової нестаціонарності з оператором компенсації міжканальних завад, вкладеним у структуру кодера Аламоуті, та оператором (Уолша-Адамара) посиленого частотного рознесення сигналів.

**Methods of space-time block coding with
OFDM subcarrier index modulation for frequency-selective and
time varying wireless communication channels**

New spectrally and energy-efficient signal-code construction with joint orthogonal-frequency-index modulation and space-time block coding, and also its noise-immune version in phase instability conditions with inter-channel interference compensation operator, built into Alamouti's coder structure, and increasing signals frequency diversity operator (Walsh-Hadamard) are proposed.

Сучасні системи безпроводового зв'язку спеціального призначення (СБЗСП) повинні забезпечувати високі показники завадостійкості, швидкості передачі інформації та якісну реалізацію об'ємних інформаційних мультимедійних додатків. На теперішній час найбільш продуктивним методом для забезпечення високої інформаційної, енергетичної (ЕЕ) та спектральної (СЕ) ефективності СБЗСП є технологія сумісного застосування багатоелементних антен (*Multiple Input-Multiple Output, MIMO*) та ортогонального частотного мультиплексування (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*). Технологія *MIMO* базується на методах ортогонального, квазіортогонального та неортогонального просторово-часового кодування сигналів і суттєво підвищує ЕЕ та / або СЕ. Технологія *OFDM* характеризується підвищеною стійкістю до багатопроменевого поширення сигналу та забезпечує низький рівень міжсимвольної інтерференції (*Inter-Symbol Interference, ISI*). Однак недоліком *OFDM* є чутливість до фазової нестаціонарності сигналу, оскільки через порушення ортогональності піднесучих внаслідок доплерівського зсуву частот та інших випадкових фазових флуктуацій виникає

міжканальна інтерференція (*Inter-Channel Interference, ICI*).

Технологія *MIMO-OFDM* є невід'ємною частиною практично всіх стандартів безпроводового зв'язку: *LTE*, *WiMAX* та *WiFi* [1]. Найбільш широкого застосування знайшов метод ортогонального просторово-часового блочного кодування (*Orthogonal Space-Time Block Coding, OSTBC*) для двох передавальних антен, відомий як схема Аламоуті [2]. *STBC-OFDM* є стійким до частотної селективності каналу, однак у нестационарних умовах із-за доплерівського зсуву частот (ДЗЧ) його ефективність суттєво знижується. Ефективним способом зменшення негативного впливу ДЗЧ є алгоритм його комплексної спряженої компенсації *CC (Complex Conjugate)* [3]. У [4] метод *STBC-CC-OFDM* отримав подальше удосконалення шляхом оптимального обмеження кількості піднесучих та одночасного посилення рознесення інформаційної послідовності сигналів за рахунок ортонормованого перетворення Уолша-Адамара (*Walsh-Hadamard, WH*). Результуючий метод *WHSTBC-CC-OFDM* має значний енергетичний вигравш (ЕВ) від рознесення в нестационарному частотно-селективному каналі зв'язку. Однак цей метод, як і класичний *STBC-OFDM*, потребує удосконалення як в частині підвищення СЕ, так і ЕЕ, насамперед, при низьких співвідношеннях сигнал/шум (*Signal-to-Noise Ratio, SNR*), що мають місце при роботі засобів радіоелектронного подавлення (РЕП). За умов впливу навмисних завад, на вході приймача СБЗСП створюється неприпустимо низьке для її нормального функціонування *SNR* та значення ймовірності бітової помилки $P_{\text{пом}} > 10^{-3} - 10^{-2}$, при якому завадостійке кодування втрачає ефективність, а надійна робота систем автоматичного засекречування не гарантується.

Традиційні шляхи підвищення СЕ вичерпали себе через частотно-енергетичну та просторову обмеженість безпроводового каналу зв'язку. Для класу релеївських частотно-селективних нестационарних каналів найбільш привабливими є методи індексних просторової (*Spatial Modulation, SM*) та частотної модуляції (*OFDM-IM*), що дозволяють одночасно підвищити надійність та швидкість передачі інформації за рахунок додаткового введення просторового та частотного вимірів. Методи *SM* та *OFDM-IM* належать до широкого класу схем з *IM (Index Modulation)* [5]. Ефективність схем *STBC-SM* та *SM-OFDM* є достатньо високою, проте сумісне застосування *STBC*, *SM* та *OFDM-IM* в рамках єдиної СКК не дозволяє істотно підвищити показники СЕ та є проблемним через обмеження на складність реалізації.

Розроблено нову спектрально та енергоефективну СКК з об'єднаною індексною модуляцією піднесучих *OFDM* та просторово-часовим блочним кодуванням *STBC-OFDM-IM*, а також її завадостійку версію для нестационарних каналів *WHSTBC-CC-OFDM-IM* з операторами комплексної спряженої компенсації *ICI* та Уолша-Адамара (*WH*) для посилення частотного рознесення модуляційних символів.

Оцінку завадостійкості базової структури *STBC-OFDM*, нової СКК *STBC-OFDM-IM* та її удосконаленої версії *WHSTBC-CC-OFDM-IM* проведено за допомогою імітаційного моделювання в середовищі *MATLAB*.

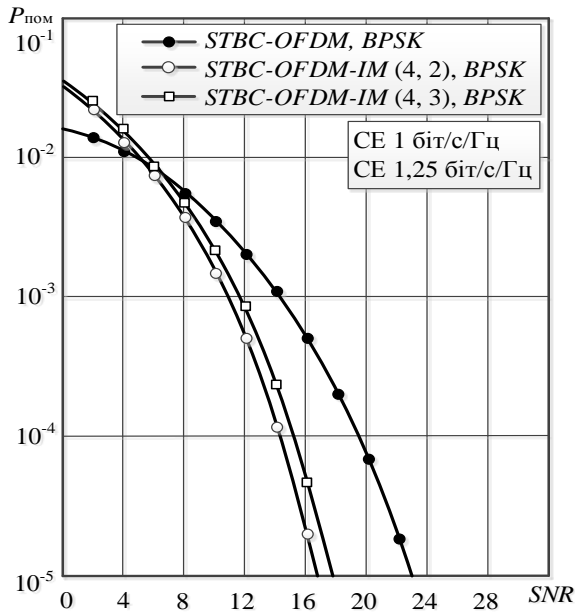


Рис. 1. Завадостійкість *STBC-OFDM*, *STBC-OFDM-IM* (4, 2) та *STBC-OFDM-IM* (4, 3), *BPSK* 2×1 , вікно *IFFT* (ЗШПФ) $N = 512$

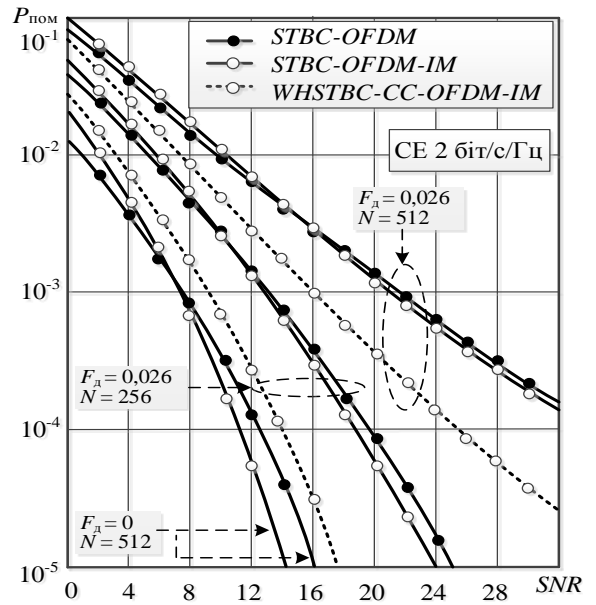


Рис. 2. Завадостійкість *STBC-OFDM*, *STBC-OFDM-IM* (4, 3), *WHSTBC-CC-OFDM-IM* (4, 3) *QPSK* 2×2 , $F_d = 0; 0,026$ з $N = 256; 512$

У релієвському каналі з частотно-селективними завмираннями ЕВ методу *STBC-OFDM-IM* порівняно з класичним *STBC-OFDM* складає 6 дБ, $P_{\text{пом}} = 10^{-5}$ при використанні *BPSK* та експоненційно спадає при подальшому збільшенні розміру ансамблю сигналів (2 дБ – *QPSK*, 1 дБ – 16-*QAM*). Деактивація певної частини піднесучих у субблоці (рис. 1) додатково до незначно зменшеного ЕВ (на 0,3 – 1,1 дБ) дає вигоду у СЕ: 12,5% ($n = 8, k = 7, QPSK$) або 25% ((4, 3), *BPSK*). Метод *WHSTBC-CC-OFDM-IM* (рис. 2) не є критичним до рівня фазової нестаціонарності каналу (фіксоване нормоване значення ДЗЧ $F_d = 0,026$, що відповідає швидкості руху мобільної станції 112,5 км/год при роботі в діапазоні частот $F_c = 2,4$ ГГц). Загальний ЕВ удосконаленої версії нової СКК в умовах $F_d \neq 0$ порівняно з класичним *STBC-OFDM* складає 4 – 10 дБ ($P_{\text{пом}} = 10^{-3} - 10^{-4}$).

Метод *WHSTBC-CC-OFDM-IM* може бути застосований для систем 5G, а також у СБЗСП, які переважно працюють у складній завадовій обстановці.

Література

1. Hanzo L., Akhtman Y.(J.), Wang L., Jiang M. MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMax. Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo-transceivers. – UK: J.W.S. 2011. – 658 с.
2. Alamouti S. A simple transmit diversity technique for wireless communications. IEEE Journal on Select Areas in Communications, vol. 16, no. 8, pp. 1451–58, 1998.
3. Yeh H., Chang Y., Hassibi B. A scheme for canceling intercarrier interference through conjugate transmission for multicarrier communication systems. IEEE Tr.W.C. 2007. v. 6, p. 3 – 7.
4. Науменко М.І., Погребняк Л.М. Удосконалений метод просторово-часового блочного кодування для частотно-селективних нестаціонарних каналів систем військового радіозв'язку. Збірник наукових праць ВІТІ № 1, с. 81 – 86. 2017.
5. Basar E., Wen M., Mesleh R., Renzo M., Xiao Y., Haas H. Index Modulation Techniques for Next-Generation Wireless Networks. Special section on index modulation techniques for next-generation wireless networks. IEEE Access, vol. 5, pp. 16693 – 16746. 2017.