

**СИНТЕЗ СПЕКТРАЛЬНО ТА ЕНЕРГЕТИЧНО-ЕФЕКТИВНИХ
СИГНАЛЬНО-КODOVИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ СИСТЕМ МІМО З
ПРОСТОРОВИМ КОДУВАННЯМ СИГНАЛІВ**

Солодовник В.І., Науменко М.І.

*Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут,
01011, Україна, м. Київ, вул. Московська, 45/1.
teenex@ukr.net*

**СИНТЕЗ СПЕКТРАЛЬНО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ-ЭФФЕКТИВНЫХ
СИГНАЛЬНО-КОДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ СИСТЕМ МІМО
С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ КОДИРОВАНИЕМ СИГНАЛОВ**

Солодовник В.И., Науменко Н.И.

*Военный институт телекоммуникаций и информатизации имени Героев Крут,
01011, Украина, г. Киев, ул. Московская, 45/1.
teenex@ukr.net*

**SYNTHESIS OF SPECTRALLY AND ENERGY-EFFICIENT SIGNAL-CODE
CONSTRUCTIONS FOR MIMO SYSTEMS WITH SIGNALS SPATIAL CODING**

Solodovnyk V.I., Naumenko M.I.

*Military Institute of Telecommunications and Information Technologies named after the Heroes of Kruty,
45/1 Moskovska St., 01011, Ukraine, Kyiv.
teenex@ukr.net*

Анотація. Розглядаються системи безпроводного зв'язку, головним завданням яких є підвищення їх спектральної (СЕ) та енергетичної ефективностей (ЕЕ) в умовах обмеження частотно-енергетичного ресурсу. Додаткове використання просторового ресурсу на базі гнучких та універсальних методів просторово-часового кодування сигналів STC (Space-Time Coding) у багатоантенних системах МІМО (Multiple Input – Multiple Output) дозволяє суттєво підвищити показники СЕ і ЕЕ, а також значно покращити можливості та умови обміну ЕЕ на СЕ. Показано переваги та недоліки ортогонального (Orthogonal Space-Time Block Coding, OSTBC) та неортогонального блочного STC (Non-Orthogonal STBC, NOSTBC). Продемонстровано два основних способи синтезу спектрально та енергетично-ефективних методів передачі інформації. Перший спосіб реалізується шляхом створення досконалих Perfect-кодів, що дозволяють одночасно досягти максимальних вирашів рознесення та мультиплексування. Експоненційна обчислювальна складність декодування таких кодів унеможлиблює їх практичну реалізацію у мобільних терміналах на сучасному етапі розвитку схемотехніки. Другий спосіб синтезу полягає в удосконаленні простих базових методів STC у частині підвищення СЕ та ЕЕ шляхом створення сигнально-кодівих конструкцій (СКК), що мають переваги базових методів STC та позбавлені недоліків, властивих Perfect-кодам. Запропоновано методику синтезу СКК, сутність якої полягає у визначенні пріоритетних областей (за значенням показника співвідношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR)) використання STC та відповідних їм ансамблів сигналів, що забезпечують максимальну СЕ при гарантованій ймовірності бітової помилки (Bit Error Rate, BER). Встановлено, що МІМО 2 x 2 з OSTBC Аламоуті має перевагу за показником ЕЕ над NOSTBC типу VBLAST для значень СЕ до 8 біт/с/Гц та SNR до 35 дБ при BER, що не перевищує 10^{-5} . У МІМО 4 x 4 коди OSTBC поступаються NOSTBC за показниками ЕЕ. Код VBLAST дозволяє забезпечити СЕ 4 – 8 біт/с/Гц при SNR 10 – 20 дБ, BER не більше 10^{-5} . На основі отриманих результатів сформульовано пропозиції подальшого удосконалення OSTBC та NOSTBC.

Ключові слова: МІМО, просторове рознесення та мультиплексування, ортогональне та неортогональне просторово-часове блочне кодування, завадостійкість, спектральна ефективність.

Аннотация. Рассматриваются системы беспроводной связи, главной задачей которых является повышение их спектральной (СЭ) и энергетической эффективности (ЭЭ) в условиях ограничения частотно-энергетического ресурса. Дополнительное использование пространственного ресурса на базе гибких и универсальных методов пространственно-временного кодирования сигналов STC (Space-Time Coding) в многоантенных системах MIMO (Multiple Input – Multiple Output) позволяет существенно повысить показатели СЭ и ЭЭ, а также значительно улучшить возможности и условия обмена ЭЭ на СЭ. Показаны преимущества и недостатки ортогонального (Orthogonal Space-Time Block Coding, OSTBC) и неортогонального блочного STC (Non-Orthogonal STBC, NOSTBC). Продемонстрированы два основных способа синтеза спектрально и энергетически-эффективных методов передачи информации. Первый способ реализуется путем создания совершенных Perfect-кодов, позволяющих одновременно достичь максимальных выигрышей разнесения и мультиплексирования. Экспоненциальная вычислительная сложность декодирования таких кодов делает невозможной их практическую реализацию в мобильных терминалах на современном этапе развития схемотехники. Второй способ синтеза заключается в усовершенствовании простых базовых методов STC в части повышения СЭ и ЭЭ путем создания сигнально-кодовых конструкций (СКК), обладающих преимуществами базовых методов STC и лишённых недостатков, свойственных Perfect-кодам. Предложена методика синтеза СКК, сущность которой заключается в определении приоритетных областей (по значению показателя соотношения сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR)) использования STC и соответствующих им ансамблей сигналов, обеспечивающих максимальную СЭ при гарантированной вероятности битовой ошибки (Bit Error Rate, BER). Установлено, что MIMO 2 x 2 с OSTBC Аламути имеет преимущество по показателю ЭЭ над NOSTBC типа VBLAST для значений СЭ до 8 бит/с/Гц и SNR до 35 дБ при BER, не превышающей 10^{-5} . В MIMO 4 x 4 коды OSTBC уступают NOSTBC по показателям ЭЭ. Код VBLAST позволяет обеспечить СЭ 4 – 8 бит/с/Гц при SNR 10 – 20 дБ, BER не больше 10^{-5} . На основании полученных результатов сформулированы предложения дальнейшего усовершенствования OSTBC и NOSTBC.

Ключевые слова: MIMO, пространственное разнесение и мультиплексирование, ортогональное и неортогональное пространственно-временное блочное кодирование, помехоустойчивость, спектральная эффективность.

Abstract. Wireless communication systems are considered, the main task of which is to increase their spectral (SE) and energy efficiency (EE) in conditions of limited frequency and energy resources. Additional use of the spatial resource based on flexible and universal methods of signals Space-Time Coding (STC) in MIMO-systems (Multiple Input – Multiple Output) can significantly increase the SE and EE values, as well as significantly improve the capabilities and conditions for EE exchange on SE. The advantages and disadvantages of Orthogonal Space-Time Block Coding (OSTBC) and Non-Orthogonal STBC (NOSTBC) are shown. Two main methods of synthesis of spectrally and energy-efficient information transmission methods are demonstrated. The first method is implemented by creating Perfect-codes that simultaneously achieve maximum diversity and multiplexing gains. The exponential computational decoding complexity of such codes makes it impossible for their practical implementation in mobile terminals at the present stage of development of circuitry. The second method of synthesis is based on improving the simple basic STC methods in terms of increasing the SE and EE by creating Signal-Code Constructions (SCC), which have the advantages of the basic STC methods and are devoid of the disadvantages inherent in Perfect-codes. A technique for the synthesis of SCC is proposed, the essence of which is to determine the priority areas (by the value of the Signal-to-Noise Ratio (SNR)) of using the STC and corresponding signal constellations, which provide the maximum SE for a guaranteed Bit Error Rate (BER). It was found that MIMO 2x2 with Alamouti OSTBC has an advantage in terms of EE over NOSTBC type VBLAST for SE not more than 8 b/s/Hz and SNR under 35 dB, BER not exceeding 10^{-5} . In MIMO 4x4, OSTBC codes are inferior to NOSTBC in terms of EE. VBLAST code allows to provide SE 4 – 8 b/s/Hz at SNR 10 – 20 dB, BER not exceeding 10^{-5} . Based on the results obtained, propositions for further improvement of OSTBC and NOSTBC are formulated.

Key words: MIMO, Spatial Diversity and Multiplexing, Orthogonal and Non-Orthogonal Space-Time Block Coding, Noise Immunity, Spectral Efficiency.

Останнє десятиліття пов'язане зі стрімким розвитком систем безпроводного зв'язку (СБЗ), що одночасно забезпечують високу швидкість та надійність передачі великих обсягів інформації. Тому головним завданням таких СБЗ при обмежених частотно-енергетичних ресурсах є підвищення спектральної (СЕ) й енергетичної (ЕЕ) ефективності та забезпечення умов ефективного обміну ЕЕ на СЕ. За твердженням провідного фахівця в

галузі цифрових телекомунікацій Р. Кальдербанка, додаткове використання просторового ресурсу на базі сучасних гнучких та універсальних методів просторово-часового кодування сигналів (Space-Time Coding, STC) у багатоантенних системах МІМО (Multiple Input – Multiple Output) дозволяє суттєво покращити можливості та умови обміну ЕЕ на СЕ [1]. Технологія МІМО стала невід'ємною частиною сучасних стандартів безпроводного зв'язку (LTE, WiMAX IEEE 802.16, Wi-Fi IEEE 802.11) [2] та базою для СБЗ наступних поколінь [3].

У каналах МІМО використовуються такі методи просторово-часового блочного кодування (Space-Time Block Coding, STBC): ортогональні (Orthogonal, OSTBC), квазіортогональні (Quasi-Orthogonal, QOSTBC) [4] та неортогональні (Non-Orthogonal, NOSTBC) [4, 5]. Ефективність будь-якого методу просторово-часового кодування, узгодженого з МІМО-каналом, найчастіше оцінюють такими ключовими параметрами: швидкість STC κ , вираш рознесення d (Diversity Gain, DG), вираш мультиплексування r (Multiplexing Gain, MG), вираш розставлення (Array Gain, AG) та обчислювальна складність O [6]. Методи OSTBC та QOSTBC дозволяють значно підвищити завадостійкість передавання інформації за рахунок просторового рознесення сигналів (Spatial Diversity, SD), проте вони не є оптимальними за показником СЕ. Методи NOSTBC забезпечують істотне збільшення швидкості передавання інформації шляхом просторового мультиплексування сигналів (Spatial Multiplexing, SMX), однак вони потребують удосконалення в частині SD.

Більшість досліджень в області STC тривалий час були спрямовані на розробку методів, що дозволяють максимізувати або DG [7, 8], або MG [5]. Слід зауважити, що максимізація одного вирашу не обов'язково максимізує інший, більш того, збільшення MG майже завжди супроводжується зменшенням DG, і навпаки. Така об'єктивна суперечність ускладнює синтез методів, що одночасно забезпечують високу завадостійкість та СЕ.

Разом із тим, у результаті наукових досліджень останнього десятиліття створено клас досконалих Perfect-кодів (PSTBC) [9, 10], що одночасно максимізують DG і MG, та є верхньою межею ефективності методів STBC. Головним недоліком PSTBC є висока обчислювальна складність декодування сигналів за алгоритмом максимальної правдоподібності (Maximum Likelihood, ML), що експоненційно збільшується у МІМО великих розмірностей та унеможливує їх практичну реалізацію. До того ж, завадостійкість сімейства неортогональних методів STC, до яких належить і PSTBC, є критичною до просторової кореляції в каналі. Слід зауважити, що великий розмір просторово-часового кодового слова PSTBC, так само як і всіх методів OSTBC та QOSTBC, зумовлює критичність зазначених методів до часової селективності (нестационарності) каналу.

Іншим способом синтезу високошвидкісних завадостійких методів передавання інформації є удосконалення простих базових просторово-часових кодів у частині підвищення СЕ та ЕЕ за рахунок створення сигнально-кодових конструкцій (СКК), що мають переваги базових методів STC та позбавлені недоліків, властивих Perfect-кодам. З практичної точки зору, з урахуванням обмежень на складність реалізації, очевидно, що удосконалення потребують класичні методи OSTBC та NOSTBC шляхом синтезу СКК, максимально узгоджених зі статистичними параметрами каналу. У результаті зазначеного синтезу показники СЕ та ЕЕ таких СКК можуть бути достатньо наближеними до ефективності PSTBC. Прикладами синтезованих СКК є STBC-SM [11], МІМО-OFDM-ІМ [12], STBC-DM-OFDM-ІМ [13] та багато інших [14].

У цьому напрямку важливим завданням є встановлення енергетичних областей (за співвідношенням сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR)) пріоритетного використання OSTBC та NOSTBC для широкого спектра значень СЕ та різних структур МІМО обмеженої складності. Це дозволить визначити оптимальний за СЕ метод STC та у разі

потреби правильно адаптувати його до нестационарних у часі параметрів каналу. Визначенню енергетичних областей пріоритетного використання методів OSTBC та NOSTBC присвячено чимало досліджень, проте більшість результатів отримано для класичних STBC у релеївському каналі та MIMO найменшої розмірності 2×2 [15 – 18]. До того ж, оцінка спектрально-енергетичної ефективності (СЕЕ) зазначених методів у [15 – 18] проводилась без урахування вимог до показників якості QoS (Quality of Service) інформаційного додатку. Великий інтерес являє розширення досліджень для більш широкого класу методів STC та MIMO більшої розмірності. Важливість такої задачі пов'язана з тим, що пріоритетність застосування OSTBC та NOSTBC може кардинально змінюватись в залежності від розмірності MIMO, стану каналу, а також вимог QoS.

Метою даної статті є синтез спектрально та енергетично-ефективних СКК для широкого діапазону значень СЕ і гарантованої достовірності у MIMO обмеженої розмірності та складності, а також визначення напрямків подальшого удосконалення таких СКК з можливістю їх адаптивного застосування в залежності від статистичних параметрів каналу.

Модель MIMO системи. Розглядається когерентна MIMO система з T_x передавальними та R_x приймальними антеннами у квазістатичному релеївському каналі з повільними завмираннями. Інформація про стан каналу (Channel State Information, CSI) відома лише приймачу. Канал вважається постійним протягом довжини просторово-часового кодового слова D та змінюється з кожним кодовим словом. На вхід приймача надходить комплексна матриця сигналів \mathbf{Y} розмірності $[R_x \times D]$, що є сумою спотвореного каналом корисного сигналу та шуму:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{d} + \xi, \quad (1)$$

де \mathbf{d} – комплексна матриця $[T_x \times D]$ переданих сигналів; \mathbf{H} – комплексна матриця $[R_x \times T_x]$ каналних коефіцієнтів (КМ); ξ – матриця $[R_x \times D]$ шуму з комплексними незалежними ідентично розподіленими гауссівськими випадковими змінними з $CN(0, \sigma^2)$.

Методика синтезу енергетично та спектрально-ефективних сигнально-кодових конструкцій для MIMO з просторово-часовим кодуванням (Методика). Синтез СКК базується на розв'язку варіаційної задачі максимізації СЕ, η [біт/с/Гц] для MIMO розмірності $T_x \times R_x \leq 4$ на заданих класах методів STC, \mathbf{G} при гарантованій достовірності \bar{P}_n в умовах обмежень на складність практичної реалізації \bar{O} :

$$\begin{aligned} [\mathbf{G}_{\text{opt}}(\gamma_m), \mathbf{D}_{\text{opt}}(\gamma_m)] &= \arg \max_{\mathbf{G}, \mathbf{D}(M)} \eta \{[\mathbf{G}_i(\gamma_m), \mathbf{D}_j(\gamma_m)]\}; \\ \mathbf{G}_i &\in \mathbf{G} = \{\text{OSTBC}, \text{QOSTBC}, \text{NOSTBC}\}; i = \overline{1, n}; \\ \mathbf{D}_j &\in \mathbf{D}(M) = \{\text{BPSK}, \text{QPSK}, M\text{-QAM}\}; j = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (2)$$

де γ_m [дБ] – SNR; n – кількість кодів $\mathbf{G}_i \in \mathbf{G}$; m – кількість значень η_i , що аналізуються; M – розмір багатопозиційних ансамблів сигналів фазової (Phase Shift Keying, M -PSK) або квадратурно-амплітудної модуляції (Quadrature Amplitude Modulation, M -QAM); достовірність оцінюється інтенсивністю ймовірності бітової помилки P_n (Bit Error Rate, BER). Обмеження $T_x = R_x \leq 4$ пов'язане з тим, що MIMO 2×2 та 4×4 широко застосовуються в сучасних СБЗ для цивільних потреб [2] та в інтересах силових структур [19].

Для розв'язання варіаційної задачі максимізації СЕ (2) скористаємось методикою синтезу СКК, що полягає у визначенні пріоритетних областей (за значенням показника SNR) використання STC та відповідних їм ансамблів сигналів, що забезпечують максимальну СЕ при заданій достовірності. Запропонована методика складається з

наступних положень:

1. Формування матриці еквівалентних (за СЕ) СКК:

$$A = (G_{ij} \tilde{D}_{ij})_{i=1, j=1}^{n, m} \quad (3)$$

Кожен рядок матриці A – сукупність СКК для повної множини \mathbf{G} кодів STC, що мають однакову СЕ. Еквівалентність за СЕ досягається правильним вибором розміру ансамблю сигналів \tilde{D}_{ij} .

2. Прорідження матриці A за критерієм допустимої складності:

$$\bar{A} = \begin{cases} (\bar{G}_{ij}, \bar{D}_{ij}) = (G_{ij}, \tilde{D}_{ij}), & O(G_{ij}, \tilde{D}_{ij}) \leq \bar{O}, \\ (\bar{G}_{ij}, \bar{D}_{ij}) = 0, & O(G_{ij}, \tilde{D}_{ij}) > \bar{O}. \end{cases} \quad (4)$$

3. Для заданої структури МІМО $Tx = Rx \leq 4$ отримати функціональні залежності завадостійкості:

$$P_{n \ ij} = f(\gamma_{ш}) \forall (G_{ij}, \tilde{D}_{ij}) \in \bar{A}. \quad (5)$$

4. На основі (5) оцінити СЕЕ:

$$\eta_i = f(\gamma_{ш}) \Big|_{P_n \leq \bar{P}_n} \forall \mathbf{G}_i \in \mathbf{G}, i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

5. Визначити оптимальні STC та відповідні їм області значень SNR:

$$(G_i^k, \Delta\gamma_{ш}^k)_{\text{opt}} = G_{\text{opt}}^k(\Delta\gamma_{ш}^k) = \arg \max_{\mathbf{G}, \gamma_{ш}} \eta [G_i(\Delta\gamma_{ш}^k), \tilde{D}_j(\Delta\gamma_{ш}^k)], k < i. \quad (7)$$

6. Визначити оптимальні ансамблі сигналів та відповідні їм підобласті значень SNR:

$$(\tilde{D}_j^{kl}, \Delta\gamma_{ш}^{kl})_{\text{opt}} = \tilde{D}_{\text{opt}}^{kl}(\Delta\gamma_{ш}^{kl}) = \arg \max_{\mathbf{D}^{(M)}, \Delta\gamma_{ш}^k} \eta [G_{\text{opt}}^k(\Delta\gamma_{ш}^k), \tilde{D}(\Delta\gamma_{ш}^{kl})], \quad (8)$$

$$l < j, \Delta\gamma_{ш}^{kl} \in \Delta\gamma_{ш}^k \in \Delta\gamma_{ш}. \quad (8)$$

7. У результаті розв'язком оптимізаційної задачі (2) є наступна послідовність СКК:

$$[G(\gamma_{ш}), \tilde{D}(\gamma_{ш})]_{\text{opt}} = \{ [G_{\text{opt}}^k(\Delta\gamma_{ш}^k), \tilde{D}_{\text{opt}}^{kl}(\Delta\gamma_{ш}^{kl})] \}. \quad (9)$$

Огляд просторово-часових кодів. У рамках виконання п. 1 (п. 1) Методики розглядаються відомі методи STC.

OSTBC дозволяють забезпечити повне рознесення сигналів з низькою обчислювальною складністю ML-декодера. Найвідомішим OSTBC є код Аламоуті [7] для $Tx = 2$ ($\kappa = 1$), використання якого дозволяє наблизитись до повної пропускну здатності MISO 2×1 (Multiple Input – Single Output). OSTBC для $Tx > 2$ забезпечують більший порядок рознесення, підвищуючи завадостійкість, проте їх $\kappa \leq 3/4$ [4, 6]. Іншим недоліком OSTBC для $Tx > 2$ є велика D , що зумовлює їх критичність до нестационарної поведінки каналу. Оскільки декодування сигналів починається тільки після прийому всього кодового слова, важливою властивістю OSTBC є оптимальність затримки D_{\min} . У табл. 1 надано значення максимальної κ та мінімальної D_{\min} комплексних OSTBC з $Tx = 2 - 16$. Очевидно, що збільшення кількості Tx призводить до зменшення $\kappa \rightarrow 1/2$, а D при $Tx > 6$ є неприпустимо великою навіть для каналів із повільними завмираннями.

Таблиця 1 – Максимальна κ та мінімальна D_{\min} різних OSTBC

Tx	κ	D_{\min}	Tx	κ	D_{\min}	Tx	κ	D_{\min}
2	1	2	7	5/8	56	12	7/12	792
3	3/4	4	8	5/8	56	13	4/7	3003
4	3/4	4	9	3/5	210	14	4/7	6006
5	2/3	15	10	3/5	420	15	9/16	11440
6	2/3	30	11	7/12	792	16	9/16	11440

Ряд квазіортогональних QOSTBC [4] переважають OSTBC за швидкістю, проте не забезпечують повне рознесення. Цей недолік QOSTBC може бути усунено завдяки повороту ансамблю сигналів M -PSK та M -QAM на певні кути у QOSTBC-Rotated [4]. Декодування QOSTBC є складнішим порівняно з OSTBC, оскільки відбувається не посимвольно, а по парах або четвірках символів. Недоліком QOSTBC також є велика D , що негативно впливає на їх завадостійкість у нестационарних умовах. Більш стійкою до нестационарної поведінки каналу є частотна версія коду Аламоуті OSFBC (Space-Frequency Block Coding) [20].

Згадані методи OSTBC, QOSTBC та OSFBC практично демонструють факт, що рознесена передача при прийманні на одну антену може дати вигравш, аналогічний вигравшу рознесеного прийому [4]. Важливість даного результату для побудови та розгортання СБЗ з портативними мобільними терміналами (МТ) важко переоцінити.

NOSTBC дозволяють підвищити СЕ, проте характеризуються низькою ЕЕ через низький рівень рознесення сигналів, а також високою O . Важливо, що при NOSTBC сигнали T_x передавальних антен неортогональні, тому взаємодіють між собою та є одне для одного завадами (міжпотоківна інтерференція). Найвідомішим NOSTBC є код VBLAST [5]. Необхідною умовою ефективної роботи VBLAST є $R_x \geq T_x$, оскільки математично неможливо розділити більше, ніж $\min [T_x, R_x]$ символів з R_x прийнятих комбінацій сигналів. Передавання інформаційних потоків по потенційно незалежним паралельним просторовим каналам (SMX) можлива лише за умови некорельованості шляхів між кожною парою приймально-передавальних антен. Слід зауважити, що структурно простий код VBLAST є лише просторовим кодом; його породжувальна матриця є вектором, а тому VBLAST іноді називають векторною модуляцією (Vector Modulation).

Важливо, що $O_{NOSTBC} > O_{QOSTBC} > O_{OSTBC}$, що визначається кількістю базових арифметичних операцій та часом для їх реалізації. Для сучасних чутливих до затримок мобільних СБЗ забезпечення низького порядку складності O є одним з пріоритетних завдань. Перехід до субоптимальних методів декодування з метою зниження порядку складності O , у більшості випадків, пов'язаний із суттєвою втратою завадостійкості [2, 5].

Таким чином, методи OSTBC максимізують DG, а NOSTBC – MG. Вигравші DG та MG визначають асимптотичну (зі зростанням SNR) динаміку зменшення $P_{\text{н}}$ або збільшення СЕ відповідно. Вигравш DG характеризують або порядком рознесення (кількістю незалежних шляхів проходження сигналу), або ЕЕ, що визначається крутизною спаду кривої завадостійкості $P_{\text{н}} = f(\gamma_{\text{ш}})$. Вигравш MG фактично є можливістю MIMO збільшувати СЕ на r біт/с/Гц з кожними 3 дБ приросту SNR при заданих вимогах достовірності [6]. Зазначені вигравші є основними та мають наступні обмеження: $r \leq \min [T_x, R_x]$; $d \leq T_x \times R_x$.

Сімейство оптимальних за показником СЕЕ Perfect-кодів для довільної кількості антен запропоновано у [10]. Вони є повношвидкісними та забезпечують повне рознесення сигналів, а тому одночасно максимізують вигравші DG та MG. Найвідомішим з PSTBC для MIMO $2 \times R_x$ є код Golden [9], головним недоліком якого також є експоненційна складність ML-декодера. Зменшення O_{PSTBC} розглянуто у [21, 22], проте успіхи у даному напрямку не є суттєвими. Декодування коду Аламоуті, відомого як G_2 , також спрощено у [23].

Структура, обчислювальна складність декодування O та показники вигравшів DG та MG кодів Аламоуті, VBLAST та Golden для найменшої MIMO 2×2 надано у табл. 2. У сучасних стандартах безпроводного зв'язку використовуються ортогональні та неортогональні типи матриць. У WiMAX коди Аламоуті, VBLAST та Golden відомі як матриці А, В та С відповідно [2, 15, 18] та застосовуються залежно від SNR.

Таблиця 2 – Структура та показники ефективності різних STC у MIMO 2 × 2

Назва коду / показники	OSTBC Аламоуті, G ₂	VBLAST	Golden
Матриця	$\begin{bmatrix} d_1 & d_2 \\ -d_2^* & d_1^* \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} d_1 & d_2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{1+\varsigma}} \begin{bmatrix} d_1 + j\varsigma & d_4 \varsigma d_2 + d_3 \\ d_2 - \varsigma d_3 & j\varsigma d_1 + d_4 \end{bmatrix}, \varsigma = \frac{(-1 + \sqrt{5})}{2}$
DG, <i>d</i>	4	2	4
MG, <i>r</i>	1	2	2
Базова <i>O</i>	2 <i>M</i>	<i>M</i> ²	<i>M</i> ⁴
Спрощена <i>O</i>	<i>M</i> ^{0,5} [23]	<i>M</i> ²	<i>M</i> ^{2,5} [22]

Код G₂ передбачає передавання антенами Tx₁ та Tx₂ пари символів [d₁ d₂], відповідно, протягом першого напівтактового інтервалу, а протягом другого – їх інверсних копій [-d₂^{*} d₁^{*}], де ()^{*} – оператор комплексного спряження.

Точні вирази для розрахунку ймовірності бітової помилки P_п для методів рознесеного прийому з оптимальним когерентним додаванням MMRC (Maximal Receive Ratio Combining), що еквівалентні за завадостійкістю рознесеній передачі OSTBC, у каналі з повільними релеївськими завмираннями наведено у [24] для BPSK та QPSK:

$$P_{п, \text{BPSK}} = \frac{1}{2} \left[1 - \mu \sum_{k=0}^{L-1} \binom{2k}{k} \left(\frac{1 - \mu^2}{4} \right)^k \right], \quad (10)$$

$$P_{п, \text{QPSK}} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\mu}{\sqrt{2 - \mu^2}} \sum_{k=0}^{L-1} \binom{2k}{k} \left(\frac{1 + \mu^2}{4 - 2\mu^2} \right)^k \right], \quad (11)$$

де *L* – порядок рознесення, причому $L = \begin{cases} R_x, \text{ MRRC,} \\ 2 R_x, G_2 \end{cases}$ та $\mu = \begin{cases} \sqrt{\gamma_{\text{ш}} / (1 + \gamma_{\text{ш}})}, \text{ MRRC,} \\ \sqrt{\gamma_{\text{ш}} / (2 + \gamma_{\text{ш}})}, G_2 \end{cases}$.

Відмінність у визначенні μ для рознесених прийому та передачі пов'язана з фіксованою потужністю передавача для випадку Tx = 1 (MMRC) та рівномірним її розподілом по всіх Tx ≥ 2 у OSTBC [25].

Для квадратних ансамблів сигналів *M*-QAM (*M* ≥ 4) та аналогічних умов запропоновано [26] точні вирази для розрахунку P_п для OSTBC та VBLAST:

$$P_{п, \text{OSTBC}} = \frac{4}{\sqrt{M} \log_2 M} \sum_{k=1}^{\log_2 \sqrt{M} (1-2^{-k}) \sqrt{M}-1} \sum_{i=0}^{\sqrt{M}-1} \left[(-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \left(2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \right] \times \left(\frac{1 - \mu(i)}{2} \right)^{T_x R_x} \sum_{j=0}^{T_x R_x - 1} \left\{ \binom{T_x R_x - 1 + j}{j} \times \left(\frac{1 + \mu(i)}{2} \right)^j \right\}; \quad (12)$$

$$P_{п, \text{VBLAST-ZF}} = \frac{4}{\sqrt{M} \log_2 M} \sum_{k=1}^{\log_2 \sqrt{M} (1-2^{-k}) \sqrt{M}-1} \sum_{i=0}^{\sqrt{M}-1} \left[(-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \left(2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \right] \times \left(\frac{1 - \mu(i)}{2} \right)^{R_x - T_x + 1} \sum_{j=0}^{R_x - T_x} \left\{ \binom{R_x - T_x + j}{j} \times \left(\frac{1 + \mu(i)}{2} \right)^j \right\}, \quad (13)$$

де $\mu(i) = \begin{cases} \sqrt{3(2i+1)^2 \gamma_{\text{ш}} / (4(M-1) + 3(2i+1)^2 \gamma_{\text{ш}})}, G_2, \\ \sqrt{3(2i+1)^2 \gamma_{\text{ш}} / (2(M-1) + 3(2i+1)^2 \gamma_{\text{ш}})}, \text{ VBLAST - ZF} \end{cases}$. Слід зауважити, що

для коду VBLAST детектування на приймачі відбувається за алгоритмом форсування нуля (Zero Forcing, ZF), оскільки точний вираз для ML-декодера складно аналізувати.

Нагадаємо, що $O_{ZF} \ll O_{ML}$ ціною втрати завадостійкості через посилення шуму при детектуванні [2].

Оцінка СЕЕ просторово-часових кодів для МІМО 2×2 . У рамках виконання п. 3 Методики на основі (10) – (13) та імітаційного моделювання в середовищі Matlab проаналізовано завадостійкість OSTBC Аламоуті та NOSTBC (Golden і VBLAST) у МІМО 2×2 для $\eta = 2 - 10$ біт/с/Гц. Криві завадостійкості VBLAST отримано як за допомогою (13) – Analysis – (VBLAST, ZF, An), так і за допомогою імітаційного моделювання – Simulation – у Matlab (VBLAST, ML, Sim). Завадостійкість коду Golden оцінювалась у Matlab (Golden, ML, Sim), а OSTBC – підрахунком за формулами (10) – (12), що позначено (OSTBC, ML, An) (рис. 2 (а - г), 3).

Аналіз кривих рис. 2 (а - г), 3 показує, що код Golden переважає OSTBC та VBLAST для будь-якої СЕ, оскільки одночасно дає MG та DG. Код G_2 є простим у декодуванні, проте для досягнення $\eta = 10$ біт/с/Гц йому необхідно застосовувати ансамбль 1024-QAM, а обом конкурентам – 32-QAM. Субоптимальне спрощене декодування за алгоритмом ZF у VBLAST є найгіршим за показниками $P_n \forall \gamma_{ш}, \eta$. Зі зростанням СЕ криві завадостійкості коду Golden та OSTBC поступово віддаляються, а VBLAST (ML) та Golden – помітно зближуються: різниця між ними при $\eta = 10$ біт/с/Гц не перевищує 3 дБ при типових для цифрових систем передачі значень $P_n = 10^{-5}$.

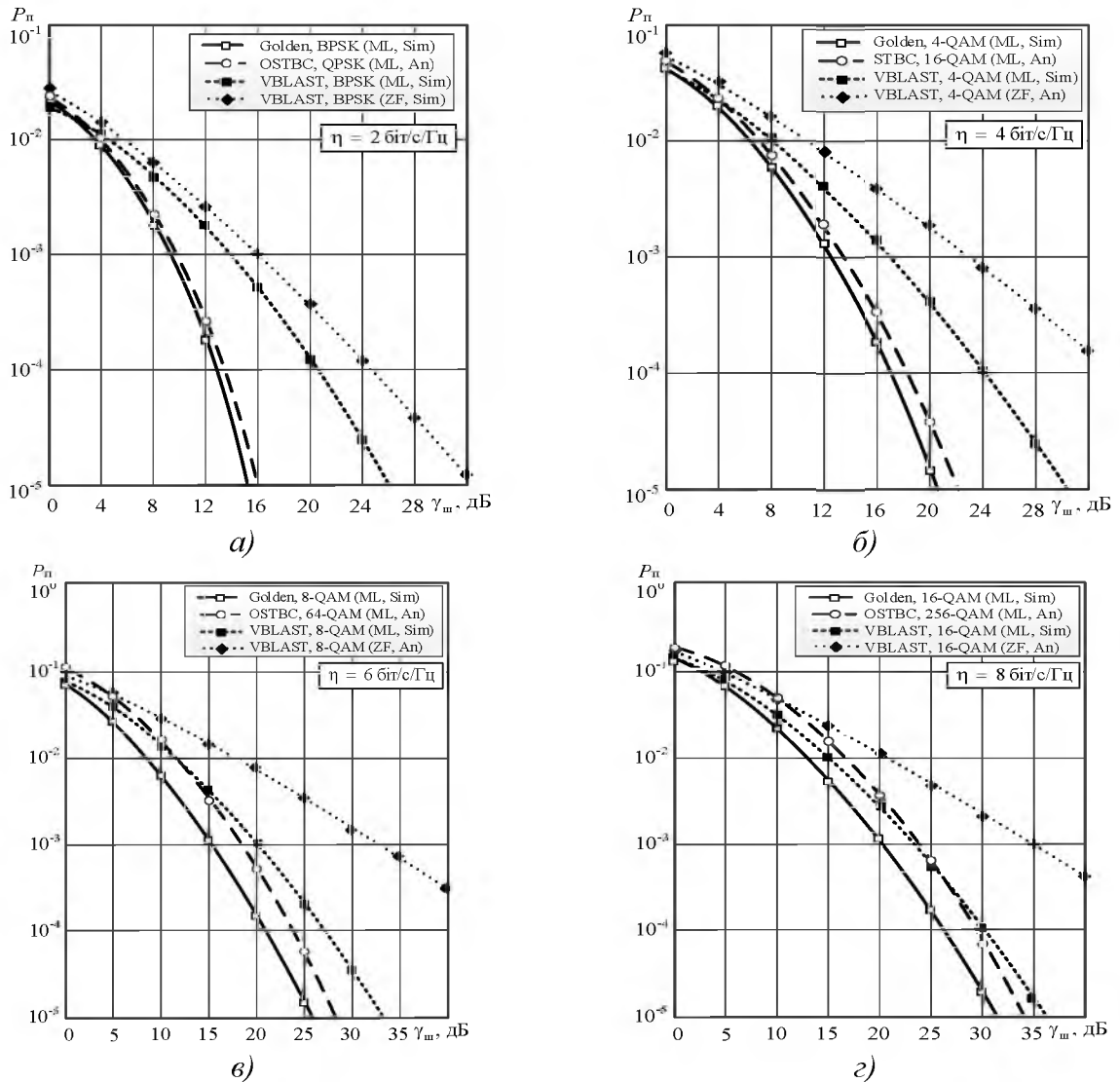


Рисунок 1 – Завадостійкість кодів Golden, OSTBC та VBLAST, 2×2

Для виконання п. 4 Методики на основі аналізу кривих рис. 1 (а – г), 2 побудовано графіки досягнення показників СЕ трьома схемами для $0 \leq \gamma_{\text{ш}} \leq 40$ дБ; $\eta = 2-10$ біт/с/Гц; $P_{\text{п}} = 10^{-3}$ та $P_{\text{п}} = 10^{-5}$ (рис. 3).

Незважаючи на те, що код Golden є оптимальним за показниками СЕ та ЕЕ, відмінність між кривими OSTBC та Golden при $\eta \leq 4$ біт/с/Гц є нехтовно малою: не перевищує 2 дБ. Крива СЕ коду VBLAST впевнено наближається до оптимальної (Golden) при збільшенні SNR та СЕ. На основі зазначених висновків та у рамках виконання вимог п. 2 Методики код Golden у проріджену матрицю \bar{A} не потрапляє. Криві OSTBC та VBLAST мають точку перетину, що свідчить про можливість визначення областей пріоритетного застосування (за SNR) таких кодів у залежності від $\bar{P}_{\text{п}}$. З рис. 3 випливає, що при $P_{\text{п}} = 10^{-3}$ перетин кривих $\eta = f(\gamma_{\text{ш}}) \Big|_{P_{\text{п}} < \bar{P}_{\text{п}}}$ кодів G_2 та VBLAST спостерігається при $\gamma_{\text{ш}} = 23$ дБ, а при $P_{\text{п}} = 10^{-5}$ точку перетину зміщено до $\gamma_{\text{ш}} = 37,5$ дБ.

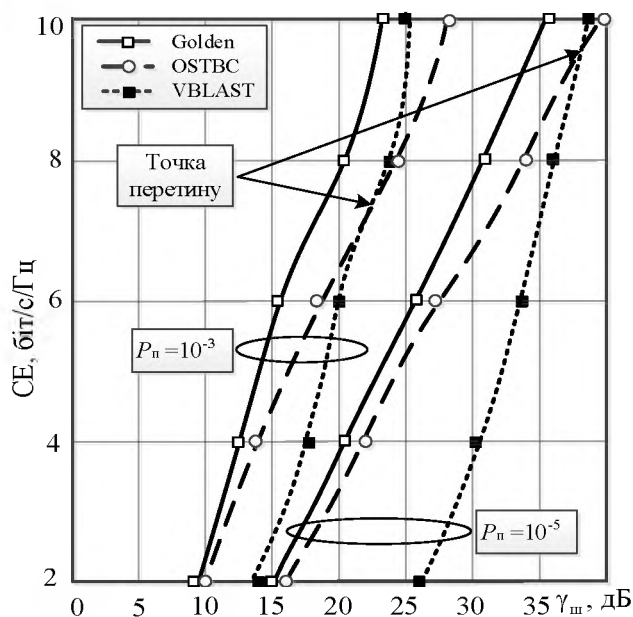
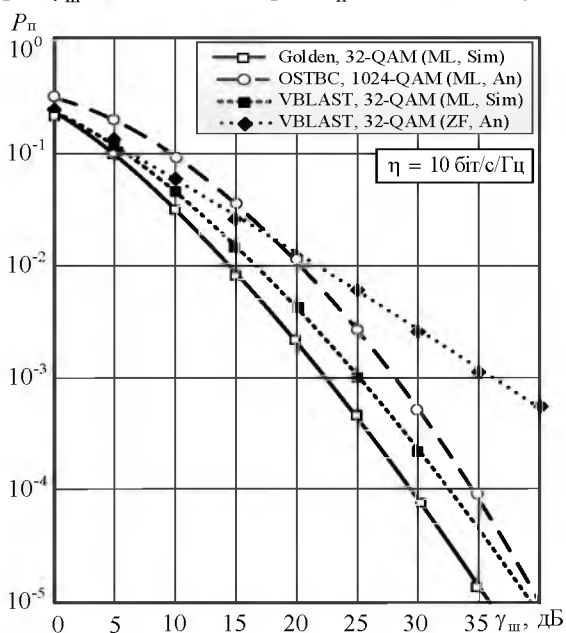


Рисунок 2 – Завадостійкість кодів Golden, OSTBC та VBLAST, 2×2

Рисунок 3 – Спектральна ефективність кодів Golden, OSTBC та VBLAST, 2×2

Згідно з п. 5, 6 Методики визначено області та підобласті використання кодів Аламоуті та VBLAST у MIMO 2×2 для різних $P_{\text{п}}$ (рис. 4). За умови $P_{\text{п}} = 10^{-3}$ (достатньо для розбірливого передавання мовних повідомлень) код VBLAST слід застосовувати при $\gamma_{\text{ш}} \geq 23$ дБ, а за умови $P_{\text{п}} = 10^{-5}$ – при $\gamma_{\text{ш}} \geq 37,5$ дБ. Таким чином, вибір STC залежить від вимог до достовірності ($P_{\text{п}}$) та СЕ, а також SNR.

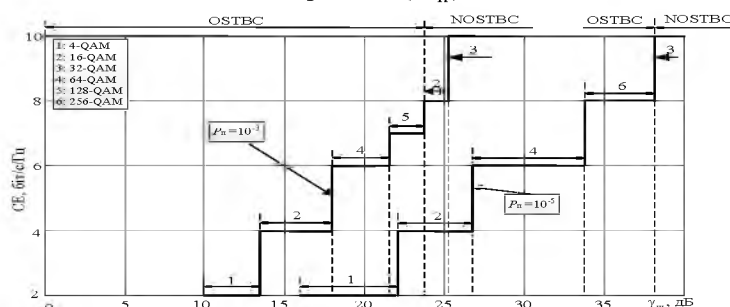


Рисунок 4 – Визначення областей та підобластей використання кодів OSTBC (G_2) та NOSTBC (VBLAST), 2×2 залежно від допустимого значення $P_{\text{п}}$

При $0 \leq \gamma_{ш} \leq 35$ дБ та $P_{п} \leq 10^{-5}$ для найменших МІМО 2×2 найефективнішим є OSTBC Аламоуті, який за таких обмежень забезпечує $\eta \leq 8$ біт/с/Гц. Послаблення вимог до достовірності передавання інформації ($10^{-5} < P_{п} < 10^{-2}$) у МІМО 2×2 дозволяє визначити області (за SNR), де використання NOSTBC типу VBLAST дає енергетичний вигравш (ЕВ) порівняно з OSTBC, що можливо обміняти на вигравш за СЕ.

Оцінка СЕЕ просторово-часових кодів для МІМО 4×4 . Аналогічним чином, у рамках виконання п. 3 – 5 Методики, проаналізовано завадостійкість кодів VBLAST – за (13), OSTBC з $\kappa = 1/2$ (G_4) та $\kappa = 3/4$ (H_4) – за (12), а також – за результатами імітаційного моделювання – звичайного QOSTBC та QOSTBC-Rotated з поворотом ансамблю сигналів ($\kappa = 1$) [4] та коду Perfect ($\kappa = 4$) [10] для МІМО 4×4 . Проаналізовано також і СЕЕ коду G_2 з посиленням рознесенням на приймання ($R_x = 4$).

Аналіз завадостійкості NOSTBC типу VBLAST та Perfect, OSTBC типу G_2 , G_4 та H_4 , QOSTBC та QOSTBC-Rotated проведено для $\eta = 4$ біт/с/Гц (рис. 5, а) та $\eta = 8$ біт/с/Гц (рис. 5, б). Найкращу завадостійкість демонструє код Perfect з вигравшами $d = 16$ та $r = 4$; його ЕВ ≥ 5 дБ порівняно з VBLAST, ML ($d = r = 4$) при $P_{п} = 10^{-5}$, а VBLAST, ZF показує вкрай низьку завадостійкість: навіть для $P_{п} = 10^{-4}$ необхідно $\gamma_{ш} > 43$ дБ.

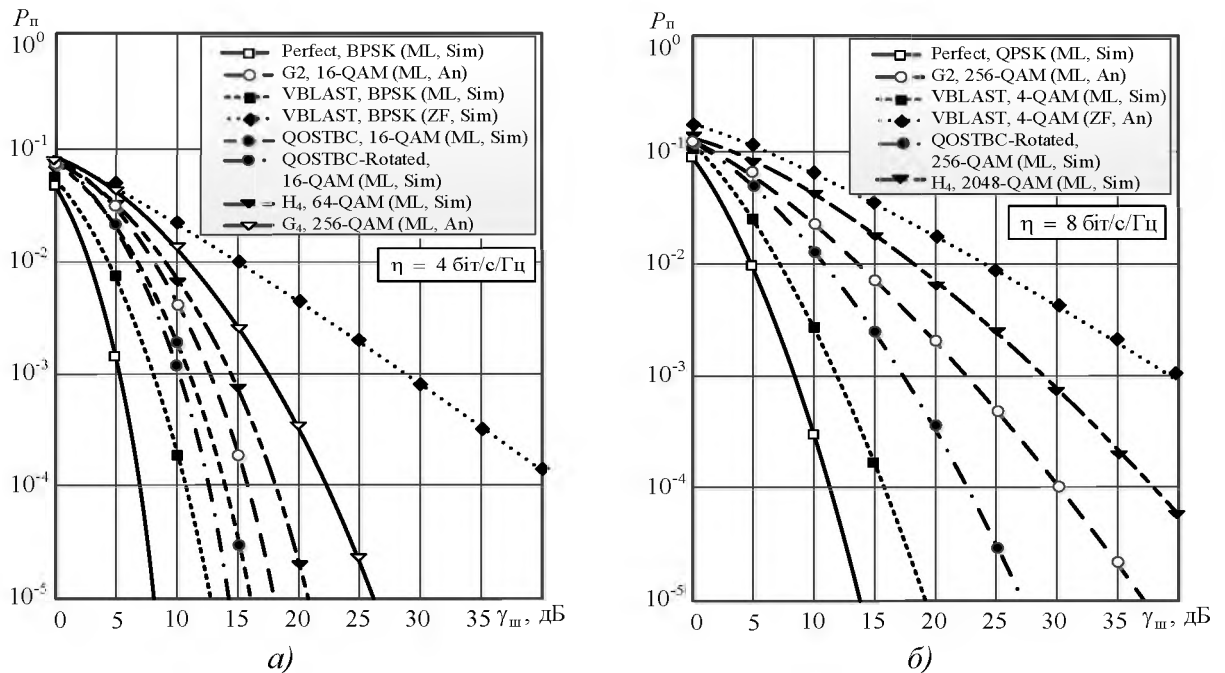


Рисунок 5 – Завадостійкість кодів Perfect, VBLAST, OSTBC та QOSTBC, 4×4

Код QOSTBC-Rotated забезпечує ЕВ близько 2 дБ порівняно з класичним QOSTBC при $P_{п} = 10^{-5}$ (рис. 5, а). Код VBLAST, ML має ЕВ порівняно з кодами QOSTBC та G_2 , оскільки останні забезпечують лише $r = 1$. OSTBC H_4 з $d = 16$ та $r = 1$ є неоптимальним, оскільки для досягнення $\eta = 4,5$ та $8,25$ біт/с/Гц використовує 64-QAM та 2048-QAM відповідно (не цілі значення СЕ зумовлені структурою коду). Для $\eta = 4$ біт/с/Гц код G_4 (аналогічно, $d = 16$, $r = 1$) використовує 256-QAM (рис. 6, а); для $\eta = 8$ біт/с/Гц G_4 не взято для аналізу, оскільки йому необхідний $M = 2^{16}$, що є непрактичним навіть для надстабільного провідного середовища передавання інформації. Код H_4 переважає G_4 на 5,5 дБ при $P_{п} = 10^{-5}$ (рис. 6, а) через менший розмір M . Для такої ж достовірності, ЕВ G_2 ($d = 8$) порівняно з H_4 та G_4 складає 3 та 9 дБ

відповідно. Слід пам'ятати, що більша частина ЕВ від рознесення досягається вже при $d = 4$, а подальше зростання порядку рознесення супроводжується сповільненням темпу виграшу [27].

Аналіз СЕ кодів Perfect, VBLAST, QOSTBC-Rotated, H_4 для МІМО 4×4 та G_2 для МІМО 2×4 при $P_n = 10^{-5}$, показує, що OSTBC неспроможні досягнути пропускну здатності каналу через властивість ортогональності породжувальної матриці та втрату значення κ (рис. 6). NOSTBC типу Perfect і VBLAST забезпечують стрімке зростання СЕ.

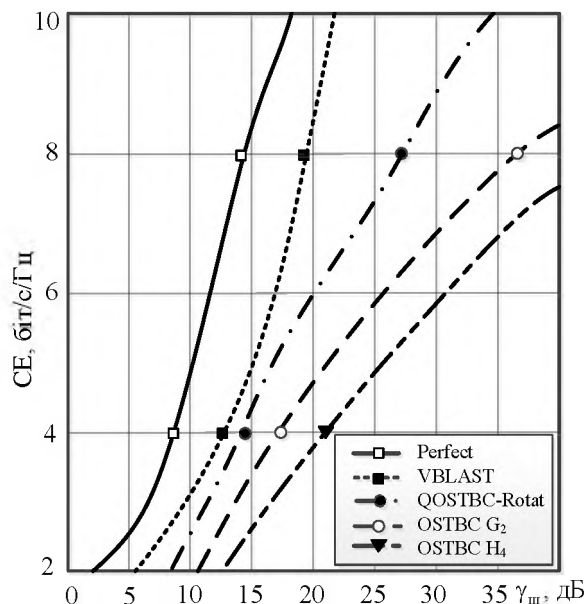


Рисунок 6 – Спектральна ефективність кодів Perfect, VBLAST, QOSTBC-Rotated та OSTBC, 2×4 та 4×4 , $P_n = 10^{-5}$

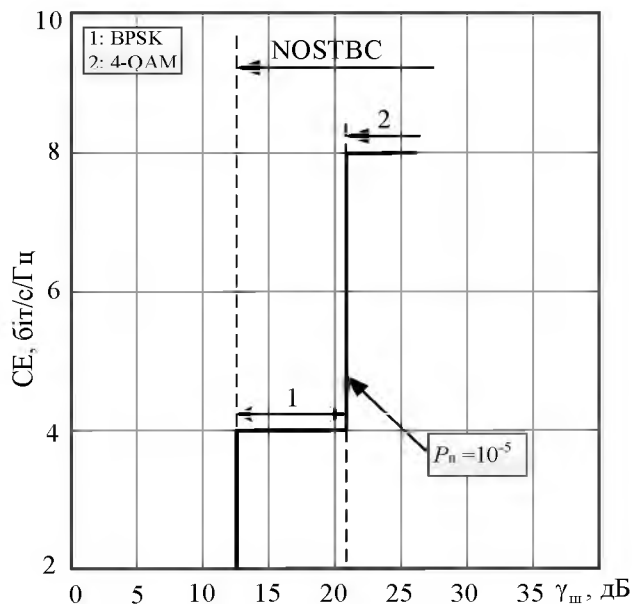


Рисунок 7 – Спектральна ефективність VBLAST, 4×4 , $P_n = 10^{-5}$

Код QOSTBC-Rotated показує кращі показники СЕ, ніж OSTBC, наближаючись до показників VBLAST, оскільки належить до класу NOSTBC. Оскільки криві завадостійкості кодів на рис. 5, а) та б) не мають критичних точок, аналіз показників СЕ методів для різних P_n проводити недоцільно. У МІМО 4×4 коди NOSTBC мають ЕВ порівняно з OSTBC (рис. 6) для всіх SNR, що являють практичний інтерес, тому п. 5 – 7 Методики є спрощеними. Подвоєння СЕ з NOSTBC типу VBLAST можливе при $\gamma_{ш} = 21$ дБ за рахунок збільшення розміру $M = 4$ (рис. 7).

В умовах обмежених можливостей сучасних цифрових процесорів обробки сигналів, практична реалізація найбільш енерго- та спектрально-ефективного коду Perfect є ускладненою навіть для $M > 4$ (порядок складності $O(M^{16})$), тому такий код до матриці \bar{A} не входить (п. 2 Методики). Застосування неоптимальних за показником МГ кодів OSTBC та QOSTBC є виправданим лише у МІСО з $T_x > 2$ на лінії “вниз” (від базової станції до МТ, оснащеного однією Rx), оскільки дає значний ЕВ від рознесення сигналів. Таким чином, у некорельованому релеївському каналі для МІМО 4×4 для забезпечення $\eta \geq 4$ біт/с/Гц слід віддати перевагу коду VBLAST.

Висновки. Синтез високошвидкісних завадостійких СКК базується на розв’язанні варіаційної задачі максимізації СЕ для МІМО обмеженої розмірності та складності з використанням методів просторово-часового кодування сигналів STC при гарантованій достовірності. У ході розв’язання такої задачі використано Методику синтезу СКК, сутність якої полягає у визначенні пріоритетних областей (за значенням показника SNR) використання STC та відповідних їм ансамблів сигналів, що забезпечують максимальну СЕ при заданій достовірності. У результаті використання Методики було визначено:

1. MIMO 2×2 з OSTBC Аламоуті має перевагу за показником ББ над NOSTBC типу VBLAST для значень $\eta \leq 8$ біт/с/Гц та $\gamma_{\text{ш}} < 35$ дБ при $P_{\text{п}} \leq 10^{-5}$.

Зазначений аргумент зумовив появу робіт з удосконалення часової [13] та частотної [28] версії коду Аламоуті з використанням концепції індексної модуляції піднесучих OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

2. Послаблення вимог до достовірності передавання інформації ($10^{-5} < P_{\text{п}} < 10^{-2}$) у MIMO 2×2 дозволяє визначити області (за SNR), де використання NOSTBC типу VBLAST дає енергетичний вииграш порівняно з OSTBC, що можливо обміняти на вииграш за СЕ.

3. Для MIMO 4×4 енергетична ефективність методів просторового рознесення сигналів (OSTBC, QOSTBC) є нижчою порівняно з методами просторового мультиплексування. Код VBLAST дозволяє забезпечувати $\eta = 4 - 8$ біт/с/Гц при $10 < \gamma_{\text{ш}} < 20$ дБ, $P_{\text{п}} \leq 10^{-5}$.

Отримані результати можуть бути ефективно використані у процесі синтезу СКК для широкого класу каналів, а також при побудові адаптивних алгоритмів для каналів зі змінними параметрами.

Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка СКК на базі просторового коду VBLAST з неповною активацією передавальних антен (з метою зменшення міжантенної кореляції та міжпоточної інтерференції) з використанням просторової модуляції сигналів SM (Spatial Modulation) та OFDM для реальних каналів з частотно-часовою селективністю та просторовою кореляцією.

REFERENCES:

1. Calderbank, R., Naguib, A. "Space-time coding and signal processing for high data rate wireless communications," *Wireless, Communications and Mobile Computing*, no.1 (2001): 13-34.
2. Hanzo, L., Akhtman, Y.(J.), Wang, L. "MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX. Coherent versus non-coherent and cooperative turbo-transceivers," *UK* (2011): 658 p.
3. Wu, Y. et al. "A Survey on MIMO Transmission with Discrete Input Signals: Technical Challenges, Advances, and Future Trends," (2017): 109 p.
4. Jafarkhani, H. "Space-Time Coding. Theory and practice," Cambridge, UK: Cambridge University Press (2005): 302 p.
5. Wolniansky, P.W., Foschini, G.J., Golden, G.D., Valenzuela, R.A. "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," *URSI international symposium on signals, systems, and electronics* (1998): 295-300.
6. Sinnokrot, M., Madisetti, V. "Space-Time Block Coding," *The Digital Signal Processing Handbook, Second Edition*, FL: CRC Press (2010): 27-1-27-16.
7. Alamouti, S. "A simple transmitter diversity scheme for wireless communications." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16 (1998): 1451-1458.
8. Tarokh, V., Jafarkhani, H., Calderbank, R. "Space-Time Block Codes From Orthogonal Designs," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 45, no. 5 (1999): 1456-1467.
9. Belfiore, J.C., Rekaya, G., Viterbo, E. "The Golden Code: A 2x2 Full Rate Space-Time Code with Non-Vanishing Determinants," *IEEE Transactions on Inform. Theory*, vol. 51, no. 41 (2004): 1596-1600.
10. Oggier, F., Rekaya, G., Belfiore, J.C., Viterbo, E. "Perfect Space-Time Block Codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 9 (2006): 3885-3902.
11. Basar, E., Aygolu, U., Panayirci, E., Poor, H.V. "Space-Time Block Coded Spatial Modulation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 3 (2011): 823-832.
12. Basar, E. "On multiple-input multiple-output OFDM with index modulation for next generation wireless networks," *IEEE TSP*, vol. 64, no. 15 (2016): 3868-3878.
13. Naumenko, M.I., Solodovnyk, V.I. "Signal-Code Construction Based on Space-Time Block Coding with Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM," *IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology PIC S&T* (2019): 57-62.
14. Basar, E., Wen, M., Mesleh, R., Renzo, M., Xiao, Y., Haas, H. "Index Modulation Techniques for Next-Generation Wireless Networks," *Special section on IM techniques for next-generation wireless networks. IEEE Access*, vol. 5 (2017): 16693-16746.
15. Khakhai, P., Uthansakul, P., Uthansakul, M. "Adaptive MIMO switching of 2x2 MIMO system

for WiMAX technology,” Computing, Communications and Applications Conf., Hong Kong (2012): 392-395.

16. Kim, C., Lee, J. “Dynamic rate-adaptive MIMO mode switching between spatial multiplexing and diversity,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (2012): 12 p.

17. Chae, C., Forenza, A., Heath, R., McKay, M., Collings, I. “Adaptive MIMO transmission techniques for broadband wireless communication systems,” IEEE Comm. Mag., vol. 48 (5) (2010): 112-118.

18. Muquet, B., Biglieri, E., Goldsmith, A., Sari, H. “An Analysis of MIMO Techniques for Mobile WiMAX Systems,” in book: Mobile WiMAX (2008): 13-30.

19. Silvus technologies. Streamcaster radio. Available online: silvustechologies.com/products/streamcaster-radios/.

20. Youssefi, M.A., Bounouader, N., Guennoun, Z., Abbadi, J. “Adaptive switching between Space-Time and Space-Frequency Block Coded OFDM Systems in Rayleigh Fading Channel,” Int. J. Commun., Netw. System Sciences, no. 6 (2013): 316-323.

21. Amani, E., Djouani, K., Kurien, A. “Low Complexity Decoding of the 4x4 Perfect Space-time Block Code,” Procedia Computer Science, vol. 32 (2014): 223-228.

22. Sinnokrot, M., Barry, J. “Fast maximum-likelihood decoding of the Golden code,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 1 (2010): 26-31.

23. Luay, A., Ender, A. “Low-Complexity Maximum Likelihood Detection of Orthogonal Space-Time Block Codes,” GLOBECOM – IEEE Global Telecommunications Conference (2009): 1-5.

24. Proakis, J.G., Salehi, M. “Digital Communications,” 5th Edition, McGraw-Hill, NY (2008): 1150 p.

25. Hampton, J.R. “Introduction to MIMO Communications,” Cambridge University Press, USA (2014): 288 p.

26. Chang, S., Rim, M., Cosman, P.C., Milstein, L.B. “Superposition MIMO Coding for the Broadcast of Layered Sources,” IEEE Tr. on Comm., vol. 59 (2011): 3240-3248.

27. Goldsmith, A. “Wireless Communications,” Cambridge University Press (2005): 419 p.

28. Solodovnyk, V.I., Naumenko, M.I. “Space-Frequency Block Coding with Two-Mode Index Modulation OFDM and Increased Stability to Channel Frequency Selectivity,” Radioelectronics and Communications Systems, vol. 63 (2020): 186-200.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Calderbank, R., Naguib, A. “Space-time coding and signal processing for high data rate wireless communications,” Wireless, Communications and Mobile Computing, no.1 (2001): 13-34.

2. Hanzo, L., Akhtman, Y.(J.), Wang, L. “MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX. Coherent versus non-coherent and cooperative turbo-transceivers,” UK (2011): 658 p.

3. Wu, Y. et al. “A Survey on MIMO Transmission with Discrete Input Signals: Technical Challenges, Advances, and Future Trends,” (2017): 109 p.

4. Jafarkhani, H. “Space-Time Coding. Theory and practice,” Cambridge, UK: Cambridge University Press (2005): 302 p.

5. Wolniansky, P.W., Foschini, G.J., Golden, G.D., Valenzuela, R.A. “V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel,” URSI international symposium on signals, systems, and electronics (1998): 295-300.

6. Sinnokrot, M., Madisetti, V. “Space-Time Block Coding,” The Digital Signal Processing Handbook, Second Edition, FL: CRC Press (2010): 27-1-27-16.

7. Alamouti, S. “A simple transmitter diversity scheme for wireless communications.” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16 (1998): 1451-1458.

8. Tarokh, V., Jafarkhani, H., Calderbank, R. “Space-Time Block Codes From Orthogonal Designs,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 45, no. 5 (1999): 1456-1467.

9. Belfiore, J.C., Rekaya, G., Viterbo, E. “The Golden Code: A 2x2 Full Rate Space-Time Code with Non-Vanishing Determinants,” IEEE Transactions on Inform. Theory, vol. 51, no. 41 (2004): 1596-1600.

10. Oggier, F., Rekaya, G., Belfiore, J.C., Viterbo, E. “Perfect Space-Time Block Codes,” IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 9 (2006): 3885-3902.

11. Basar, E., Aygolu, U., Panayirci, E., Poor, H.V. “Space-Time Block Coded Spatial Modulation,” IEEE Transactions on Communications, vol. 59, no. 3 (2011): 823-832.

12. Basar, E. “On multiple-input multiple-output OFDM with index modulation for next generation wireless networks,” IEEE TSP, vol. 64, no. 15 (2016): 3868-3878.

13. Naumenko, M.I., Solodovnyk, V.I. “Signal-Code Construction Based on Space-Time Block Coding with Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM,” IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology PIC S&T (2019): 57-62.

14. Basar, E., Wen, M., Mesleh, R., Renzo, M., Xiao, Y., Haas, H. “Index Modulation Techniques

for Next-Generation Wireless Networks,” Special section on IM techniques for next-generation wireless networks. *IEEE Access*, vol. 5 (2017): 16693-16746.

15. Khakhai, P., Uthansakul, P., Uthansakul, M. “Adaptive MIMO switching of 2x2 MIMO system for WiMAX technology,” *Computing, Communications and Applications Conf.*, Hong Kong (2012): 392-395.

16. Kim, C., Lee, J. “Dynamic rate-adaptive MIMO mode switching between spatial multiplexing and diversity,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* (2012): 12 p.

17. Chae, C., Forenza, A., Heath, R., McKay, M., Collings, I. “Adaptive MIMO transmission techniques for broadband wireless communication systems,” *IEEE Comm. Mag.*, vol. 48 (5) (2010): 112-118.

18. Muquet, B., Biglieri, E., Goldsmith, A., Sari, H. “An Analysis of MIMO Techniques for Mobile WiMAX Systems,” in book: *Mobile WiMAX* (2008): 13-30.

19. Silvus technologies. Streamcaster radio. Available online: silvustechologies.com/products/streamcaster-radios/.

20. Youssefi, M.A., Bounouader, N., Guennoun, Z., Abbadi, J. “Adaptive switching between Space-Time and Space-Frequency Block Coded OFDM Systems in Rayleigh Fading Channel,” *Int. J. Commun., Netw. System Sciences*, no. 6 (2013): 316-323.

21. Amani, E., Djouani, K., Kurien, A. “Low Complexity Decoding of the 4x4 Perfect Space-time Block Code,” *Procedia Computer Science*, vol. 32 (2014): 223-228.

22. Sinnokrot, M., Barry, J. “Fast maximum-likelihood decoding of the Golden code,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 1 (2010): 26-31.

23. Luay, A., Ender, A. “Low-Complexity Maximum Likelihood Detection of Orthogonal Space-Time Block Codes,” *GLOBECOM – IEEE Global Telecommunications Conference* (2009): 1-5.

24. Proakis, J.G., Salehi, M. “Digital Communications,” 5th Edition, McGraw-Hill, NY (2008): 1150 p.

25. Hampton, J.R. “Introduction to MIMO Communications,” Cambridge University Press, USA (2014): 288 p.

26. Chang, S., Rim, M., Cosman, P.C., Milstein, L.B. “Superposition MIMO Coding for the Broadcast of Layered Sources,” *IEEE Tr. on Comm.*, vol. 59 (2011): 3240-3248.

27. Goldsmith, A. “Wireless Communications,” Cambridge University Press (2005): 419 p.

28. Solodovnyk, V.I., Naumenko, M.I. “Space-Frequency Block Coding with Two-Mode Index Modulation OFDM and Increased Stability to Channel Frequency Selectivity,” *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 63 (2020): 186-200.

DOI 10.33243/2518-7139-2020-1-1-68-81