Погребняк Л.М. (ВІТІ)
д.т.н. Науменко М.І. (ВІТІ)

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАВАДОСТІЙКОГО ТА ПРОСТОРОВОГО КОДУВАНЬ В НЕСТАЦІОНАРНИХ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНИХ КАНАЛАХ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Проведено аналіз ефективності основних завадостійких кодів для безпроводових систем військового зв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням сигналів та технологією багатоелементних антен, що реалізує методи просторового блочного кодування з підвищеною стійкістю до нестаціонарності та частотної селективності каналу. З урахуванням енергетичних виграшів від завадостійкого та просторового кодувань виконана оцінка підвищення стійкості системи передачі інформації до нестаціонарності каналу та встановлені допустимі межі нормованих значень доплерівського зсуву частоти при використані ансамблів сигналів різного об'єму.

Погребняк Л.М., Науменко Н.И. Эффективность помехоустойчивого и пространственного кодирования в нестационарных частотно-селективных каналах систем военной радиосвязи. *Проведен анализ эффективности основных помехоустойчивых кодов для беспроводных систем военной связи с ортогональным частотным мультиплексированием сигналов и технологией многоэлементных антенн, которая реализует методы пространственного блочного кодирования с повышенной устойчивостью к нестационарности и частотной селективности канала. С учетом энергетических выигрышей от помехоустойчивого и пространственного кодирования выполнена оценка повышения устойчивости системы передачи информации в нестационарности канала и установлены допустимые пределы нормированных значений доплеровского сдвига частоты при использовании ансамблей сигналов различного объема.*

L. Pogrebnyak, N. Naumenko Efficiency of noise-immune and spatial coding in non-stationary frequency-selective channels of military radio communication systems. *The efficiency of the main noise-immune codes for wireless military communications systems with orthogonal frequency multiplexing of signals and multi-element antenna technology which implements the methods of spatial block coding with increased stability to non-stationarity and frequency selectivity of the channel is analyzed. An estimation of the stability of the information transmission system in the channel non-stationarity is performed and the permissible limits of the normalized values of the Doppler frequency shift are established using ensembles of signals of different volumes taking into account the energy gains from noise immunity and spatial coding.*

Ключові слова: *завадостійке кодування, нестаціонарні частотно-селективні канали, системи військового радіозв'язку.*

Постановка завдання.

Досвід проведення антитерористичної операції показує, що оперативне володіння швидкоплинною обстановкою є основним фактором для якісного прийняття управлінських рішень. Основним засобом управління військами та зброєю залишається система військового радіозв'язку (СВРЗ).

Внаслідок особливостей дислокації та динамічного переміщення органів та пунктів військового управління канали СВРЗ характеризуються високими рівнями нестаціонарності та частотної селективності. Враховуючи складну структуру швидких частотно-селективних завмирань та обмеженість частотно-енергетичного ресурсу зазначених каналів, передача великих обсягів інформації потребує розробки високошвидкісних завадостійких сигнально-кодових конструкцій для ефективного (близьке до теоретичних меж) використання пропускної здатності реальних каналів.

Сучасні та перспективні методи побудови таких сигнально-кодових конструкцій ґрунтуються на сумісному використанні технології багатоелементних антен (*multiple input – multiple output, MIMO*), ортогонального частотного мультиплексування (*orthogonal frequency division multiplex, OFDM*) та завадостійкого канального кодування. При цьому *OFDM* усуває частотно-селективні завмирання та забезпечує високу спектральну ефективність СВРЗ, а *MIMO* – її високу енергетичну ефективність, реалізуючи ортогональне просторове блочне кодування сигналів. Базовими методами ортогонального блочного кодування є просторово-часове (*space-time block codes, STBC*) та просторово-частотне (*space-frequency block codes, SFBC*) кодування [1]. Ефективність цих методів залежить від рівнів нестаціонарності та

частотної селективності каналу. Відомо, що *STBC* чутливий до нестаціонарності каналу, а *SFBC* до його частотної селективності [2]. Тому зазначені методи *STBC* та *SFBC* потребують удосконалення: *STBC* в частині підвищення стійкості до часової неінваріантності каналу, що має місце в результаті впливу доплерівського зсуву частоти $f_д$, а *SFBC* до нерівномірності амплітудно-частотної характеристики каналу [3, 4].

В безпроводових частотно-селективних каналах з помірним рівнем нестаціонарності ($f_д T \in [0{,}01,\ 0{,}1]$, T тривалість *OFDM*-символу) кращими є методи, що базуються на удосконалені просторово-часового блочного кодування. При високих нормованих значеннях доплерівського зсуву частоти ($f_д T > 0{,}1$) просторове кодування сигналів доцільно здійснювати шляхом удосконалення базового методу *SFBC* як потенційно більш стійкого до нестаціонарності каналу [3 5].

В цілому використання зазначених методів просторового кодування сигналів в нестаціонарних частотно-селективних каналах повинно забезпечувати енергетичну ефективність СВРЗ з *MIMO-OFDM,* близьку до її ефективності в гаусівському каналі при мінімальній складності реалізації. Подальше зростання енергетичної ефективності СВРЗ, підвищення її стійкості до нестаціонарності та частотної селективності каналу може бути досягнуто за допомогою завадостійких кодів, що використовуються в стандартах мереж мобільного зв'язку *LTE, LTE-Advance* і широкосмугового доступу *IEEE* 802.11 та 802.16.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У роботах [6 9] проведена оцінка ефективність завадостійких канальних кодів у гаусівському каналі та стаціонарних ($f_д T = 0$) релеївських і райсівських каналах без частотно-селективних завмирань. Однак, незважаючи на високу коректуючу здатність таких кодів їх застосування у нестаціонарних частотно-селективних каналах є низькоефективним. Тому необхідно проведення досліджень щодо комплексного застосування завадостійких кодів та методів просторового кодування з підвищеною стійкістю до нестаціонарності і частотної селективності.

Метою статті є підвищення енергетичної ефективності системи передачі за рахунок сумісного застосування типових завадостійких кодів та удосконалених методів просторового кодування.

Нижче за допомогою імітаційного моделювання доведено ефективність їх спільного застосування у частотно-селективних каналах з різними рівнями нестаціонарності в широкому діапазоні швидкостей передачі.

Основна частина.

Узагальнена структурна схема СВРЗ з *MIMO-OFDM*, що реалізує завадостійке канальне та просторове кодування з підвищеною стійкістю до нестаціонарності та частотної селективності каналу, наведена на рис. 1.

Аналіз методів просторового кодування показав, що в частотно-селективних каналах з помірним рівнем нестаціонарності найбільш ефективним є метод *WHSTCC* (рис.1.а). Він базується на алгоритмі просторово-часового кодування *STBC* та реалізує схему спряженої компенсації (*conjugate cancellation, CC*) міжканальних завад (*interchannel interference, ICI*) і максимальне обмеження кількості піднесучих *OFDM* з одночасним посиленням частотного рознесення сигналів кодером Уолша-Адамара (*Walsh-Hadamard, WH*). При цьому мінімальна кількість піднесучих *OFDM* повинна гарантувати відсутність міжсимвольних завад (*intersymbol interference, ISI*), тобто енергетичну ефективність СВРЗ на рівні релеївської межі, та бути кратною степені двійки, що необхідно для реалізації процедури швидкого перетворення Фур'є.

Енергетичний виграш методу *WHSTCC* в порівнянні із класичним *STBC* в каналах з помірною нестаціонарністю ($f_д T \in [0{,}01,\ 0{,}1]$) при максимальному обмежені кількості піднесучих до N = 64 складає 5 12 дБ ($P_п = 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$) для всіх практично важливих рівнів селективності в каналах СВРЗ [5].

З підвищенням нестаціонарності каналу ($f_д T > 0{,}1$) ефективність методу *WHSTCC* суттєво знижується, що є результатом неоптимальної роботи схеми *CC*. За таких умов досить ефективним є метод $\overline{SF}$ (рис.1.б) [4]. Суть методу $\overline{SF}$ ґрунтується на застосуванні короткого унітарного перетворення Уолша-Адамара (2×2) до вихідних символів *SFBC* кодера Аламоуті. Таке перетворення забезпечує прийом сигналів сусідніх підканалів після зворотної процедури *WH* з однаковим коефіцієнтом передачі, що по суті еквівалентно перетворенню частотно-селективного каналу в канал з кусочно-плоскою амплітудно-частотною характеристикою на всіх або частині суміжних пар підканалів *OFDM* в залежності від ансамбля модуляційних сигналів. Така рівномірність АЧХ каналу є необхідною умовою оптимальної роботи просторового-частотного кодера Аламоуті.

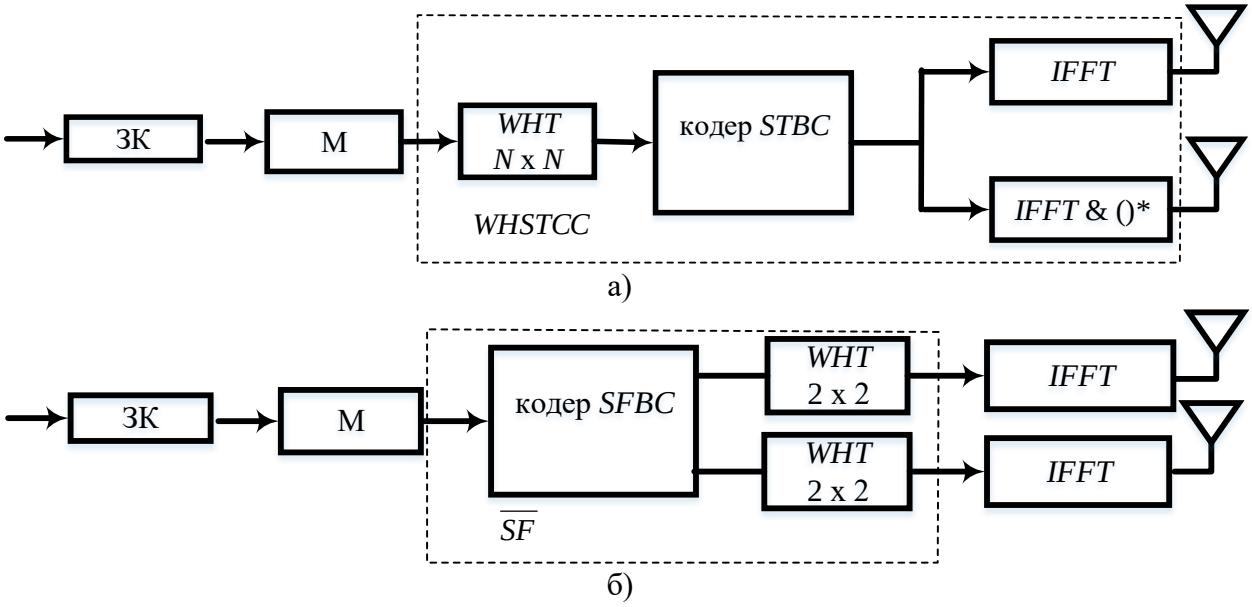

Рис. 1 Узагальнена структурна схема СВРЗ з *MIMO-OFDM* для каналів з помірним (а) та високим (б) рівнями нестаціонарності: ЗК – завадостійкий кодер, М – модулятор, *WHT* – перетворення Уолша-Адамара розміром $N\times N$, *IFFT* – *N*-точкове зворотне перетворення Фур'є, *N* – кількість піднесучих *OFDM*, (–)*– оператор комплексного спряження

В загальному випадку для *QAM-M* ($M > 2$) рівномірна АЧХ сусідніх підканалів *OFDM* має місце в разі, коли пари вхідних елементів кодера Аламоуті складаються із комплексно спряжених величин. Враховуючи, що елементи модуляційних сигналів мають рівну ймовірність, то кількість таких спряжених пар є незначною, особливо для ансамблів сигналів великого об'єму. Для *QPSK* вона складає 25 % від загальної кількості пар сигналів, а для *QAM*-16 – лише 5 %. В інших випадках метод $\overline{SF}$ працює як класичний *SFBC*, залишаючись критичним до частотної селективності каналу.

В той же час для *BPSK* рівномірність АЧХ на суміжних підканалах буде мати місце для всіх пар піднесучих, незалежно від структури вхідної послідовності [4]. Це означає, що метод $\overline{SF}$ забезпечує рівномірність АЧХ на всіх парах піднесучих, тобто є оптимальним для рознесення сигналів. Модуляційний ансамбль *BPSK* для СВРЗ в більшості випадків являється основним внаслідок низької енергетики реальних безпроводових каналів зв'язку із-за складної завадової обстановки та можливо впливу засобів радіоелектронної боротьби. Тому використання методу просторового кодування $\overline{SF}$ разом з *BPSK* для СВРЗ є надзвичайно ефективним і корисним.

В частотно-селективних каналах з високим рівнем нестаціонарності $\left(f_д T \in [0{,}1\ 0{,}2]\right)$

метод $\overline{SF}$ з *BPSK* в порівнянні з класичним *SFBC* при $P_{\text{п}} = 5 \cdot 10^{-3}$ дає енергетичний виграш 6 дБ незалежно від рівня частотної селективності. Однак, ефективність методу $\overline{SF}$ з *QAM-M (M* > 2) суттєво знижується як із зростанням об'єму ансамблю сигналів так і із збільшенням рівня частотної селективності каналу. В цілому ефективне використання методу $\overline{SF}$ обмежується ансамблем сигналів *QPSK* в каналах із помірним рівнем селективності [4].

Таким чином, методи просторового кодування з *WHSTCC* і $\overline{SF}$ забезпечують значне підвищення енергетичної ефективності системи військового радіозв'язку з *MIMO-OFDM*. Подальше зростання її ефективності, як зазначалося вище, може бути досягнуто за допомогою сумісного застосування удосконалених методів просторового кодування та типових завадостійких кодів: згорточного коду (*Convolutional Code, CC*), каскадного коду із зовнішнім кодом Ріда-Соломона і внутрішнім згорточним кодом (*RS-CC)*, згорточного турбокоду (*Turbo Convolutional Codes, TCC*), блочного турбокоду (*Turbo Product Codes, TCP*), коду з малою щільністю перевірок на парність (*Low density parity check codes, LDPC*) [1, 6, 10].

Згорточний код (Convolutional Code, CC) з утворюючими поліномами $G_0 = 133$ і $G_0 = 171$ та конструктивною довжиною *K* = 7, що м'яко декодується декодером Вітербі. Складність реалізації декодера експоненціально зростає зі збільшенням конструктивної довжини коду, тому на практиці використовуються коди з $K \le 7$. Внаслідок такого обмеження *згорточні* коди в безпроводових каналах є недостатньо ефективним. Енергетичний виграш зазначеного *CC* в гаусівському каналу на 4,5 дБ менше від енергетичної ефективності системи передачі інформації з *BPSK*, що відповідає пропускній здатності каналу [7].

Каскадний код з зовнішнім укороченим кодом Ріда-Соломона RS (204,188,8) та внутрішнім згорточним кодом з K = 7 (Reed-Solomon-Convolutional Code, RS-CC) з м'яким декодуванням по Вітербі та перемежувачем. Цей каскадний код *RS-CC* забезпечує енергетичний виграш від кодування (ЕВК), що є на 2,5 дБ менше від теоретичної межі [7].

Згорточний турбокод (***Turbo Convolutional Code, TCC***), що утворений в результаті паралельного каскадування двох рекурсивних систематичних згорточних кодів з *K* = 4 та псевдовипадковим пристроєм перемеження (*n* = 3060). Для декодування *TCC* використовують ітеративний алгоритм *Soft Output Viterby Algorithm* (*SOVA*), кількість ітерацій ⍰ 10.

Такий *TCC* має ЕВК, який лише на 1,5 дБ менший за енергетичну ефективність, що відповідає пропускні здатності гаусівського каналу, а його область насичення має місце при $P_{\text{п}} = 10^{-7}$. Однак необхідна достовірність передачі інформації в СВРЗ знаходиться в межах $P_{\text{п}} = 10^{-3} - 10^{-5}$, тому на практиці не є критичною [7].

Блочний турбокод (Turbo Block Code, TBC), що використовується в стандарті *IEEE* 802.16 з довжиною кодового блоку *n* = 4096. При кодовій швидкості $R = 1/2$ та приблизно однакових довжинах кодового блоку *TBC* поступається *TCC* у гаусівському каналі приблизно на 1 дБ [7]. Однак, *TBC* є достатньо ефективним при високих кодових швидкостях та в каналах з низьким відношеннях сигнал/шум. Крім того, код легко адаптується до вимог коректуючої здатності, інформаційної надлишковості, довжини кодового блоку.

Для декодування *TBC* використовують ітеративний алгоритм *SOVA* з аналогічною кількість ітерацій [7].

Код з малою щільністю перевірок на парність (low-density parity-check code, LDPC) що використовується в стандарті *IEEE* 802.16 з довжиною кодового блоку *n* = 2304. Декодування *LDPC* кодів здійснюється декодером *sum-product.*

Специфічна структура перевірочної матриці *LDPC* створює квадратичну залежність складності кодування від довжини коду. Апаратна реалізація *LDPC* не дозволяє досить просто змінювати кодову швидкість і довжину блоку, оскільки потрібно щоразу формувати

нову матрицю. Зазначений *LDPC* забезпечує ЕВК, який на 2,0 дБ менше від теоретичної межі [7].

Оцінка ефективності сучасних завадостійких кодів з кодовою швидкістю $R=1/2$ сумісно з методами просторового кодування (*WHSTCC*, $\overline{SF}$, *SFBC*) була проведена за допомогою імітаційного моделювання в середовищі *MatLab*. Розглядалась система передачі інформації із *MIMO* (2×2), *OFDM* ($N = 64$) та модуляційними ансамблями сигналів *BPSK*, *QAM-M* ($M = 4$, 16, 64) по нестаціонарних релеївських каналах із завмираннями. Завмирання в каналі згенеровано за допомогою моделі Джейкса.

Завадостійкість СВРЗ при сумісному застосуванні в частотно-селективному каналі завадостійких кодів і методів просторового кодування *WHSTCC* з *QPSK* при помірній нестаціонарності ($f_д T = 0{,}05$) та $\overline{SF}$ з *BPSK* при високій нестаціонарності $(f_д T = 0{,}2)$ наведена на рис.2.а. та рис.2.б.

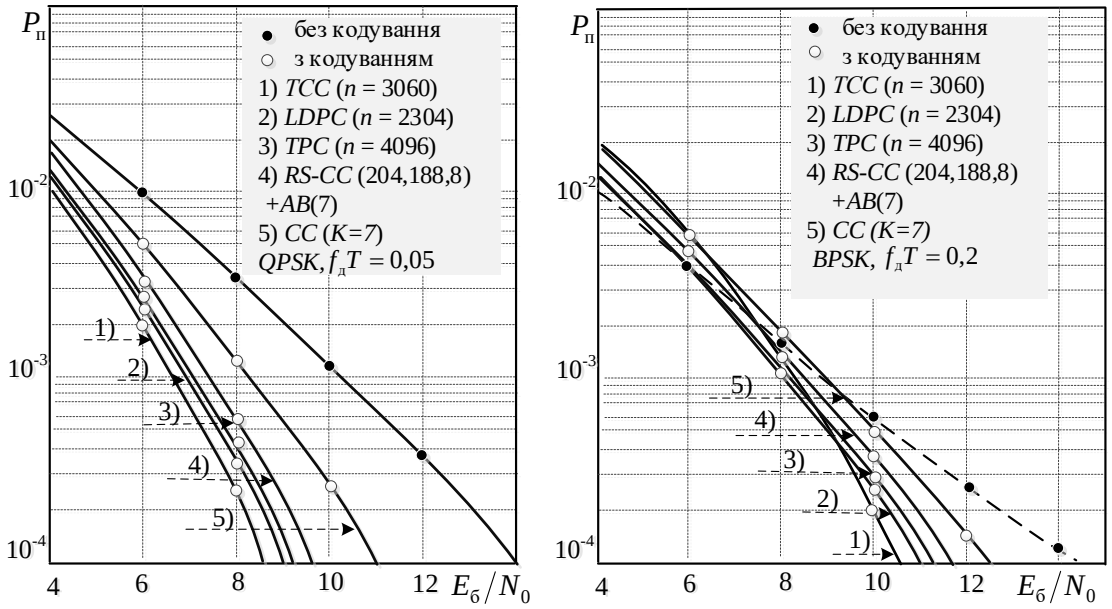

Рис. 2 Завадостійкість СВРЗ з MIMO (2×2), *OFDM* ($N = 64$), різними канальними коректуючими кодами із швидкістю $R=1/2$ та методами просторового кодування *WHSTCC* (а) і $\overline{SF}$ (б)

Максимальний ЕВК забезпечує згорточний турбокод з зазначеними параметрами, так, при $P_п = 10^{-4}$ складає 5,5 дБ та 4,2 дБ при помірній та високій нестаціонарності каналу відповідно. Тому далі досліджується його ефективність з більш високими об'ємами ансамблів сигналів.

Ефективність сумісного застосування *TCC* та *WHSTCC* з різними ансамблями сигналів в частотно-селективному каналі з помірною нестаціонарністю (максимальне зміщення фази на тривалості одного *OFDM*-символу становить $2\pi f_д T \approx 0{,}4\alpha_з$, $\alpha_з$ – фазовий запас ансамблів сигналів) характеризується кривими завадостійкості наведеними на рис. 3.

Енергетичний виграш від кодування в залежності від ансамблів сигналів є досить значним. При $P_п = 10^{-4}$ становить 5,0, 5,5, 6,0 та 6,5 дБ для *BPSK*, *QPSK*, *QAM*-16 та *QAM*-64 відповідно, що є вагомим вкладом в енергетичну ефективність СВРЗ на шляху до досягнення пропускної здатності. Слід підкреслити, що в зазначених умовах суттєве збільшення нормованого значення доплерівського від $f_д T =$ 0,007 для *QAM*-64 до $f_д T$ =0,1 для *BPSK* призводить до незначної втрати ЕВК, що не перебільшує 1,5 дБ. Це підтверджує високу

енергетичну ефективність методу *WHSTCC* в частотно-селективних каналах з помірною нестаціонарністю.

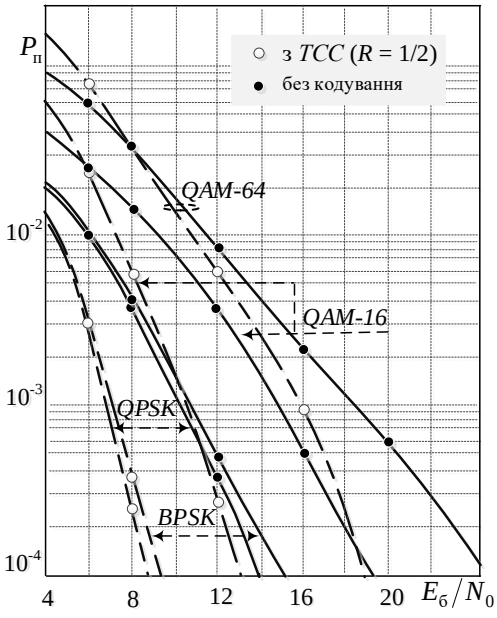

Рис.3 Завадостійкість СВРЗ із *TCC* та *WHSTCC* для різних ансамблів сигналів в нестаціонарному частотно-селективному каналі ($2\pi f_д T \approx 0{,}4\alpha_з$)

Аналіз кривих на рис.4. дозволяє встановити верхні межі допустимих значень доплерівського зсуву в каналах СВРЗ без кодування, що гарантують необхідну достовірність передачі інформації $\left(P_п = 5\cdot10^{-3} - 5\cdot10^{-4}\right)$ для різних ансамблів сигналів при характерних для них відношеннях $\mathrm{E}_б/\mathrm{N}_0$: 10 дБ для *BPSK* (*QPSK)*, 14 дБ для *QAM*-16, 20 дБ для *QAM*-64. Так, для *BPSK* максимальне допустиме значення $f_д T$, що забезпечує вказану достовірність передачі інформації становить 0,12 – 0,08, для *QPSK* –0,10 – 0,04, для *QAM*-16 – 0,04 – 0,02, для *QAM*-64 – 0,013 – 0,003. Застосування завадостійкого коду дозволяє збільшити допустимі значення величини нормованого доплерівського зсуву для: *BPSK* до 0,13 – 0,11, *QPSK* до 0,13 – 0,11, *QAM*-16 до 0,05 – 0,04, *QAM*-64 до 0,018 – 0,008. Таке суттєве підвищення (більше ніж у два-три рази для *QAM-M* (*M* > 2)) стійкості СВРЗ до нестаціонарності каналу в діапазоні помірних значень $f_д T \in [0{,}01\ 0{,}1]$ свідчить про високу ефективність застосування методу *WHSTCC* разом з *TCC* в рамках єдиної сигнально-кодової конструкції для всіх розглянутих ансамблів сигналів.

В каналах з високим рівнем нестаціонарності ефективність методу *WHSTCC* різко погіршується внаслідок критичності схеми спряженої компенсації міжканальних завад до нормованих значень доплерівського зсуву $f_д T > 0{,}1$ [5].

Це негативно впливає на роботу *TCC* та завадостійкість системи передачі інформації в цілому. В даному випадку доцільно реалізувати процедуру завадостійкого канального кодування сумісно з методами просторового кодування *SFBC* та $\overline{SF}$, що є більш потенційно стійкими до нестаціонарності каналу (рис.5).

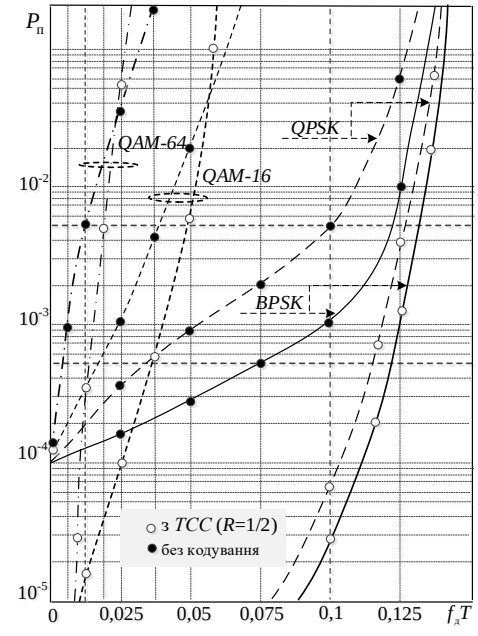

Рис.4 Ефективність СВРЗ з *WHSTCC, TCC* та різними ансамблями сигналів в залежності від рівня нестаціонарності каналу

Аналіз кривих на рис. 5 підтверджує зазначену критичність методу *SFBC* до частотної селективності каналу навіть без завадостійкого кодування. Використання *SFBC* не забезпечує необхідну ймовірність бітової помилки ($P_п < 10^{-3}$) як для *QPSK* так і *BPSK* незалежно від $\mathrm{E}_б/\mathrm{N}_0$. В той же час метод $\overline{SF}$ з *QPSK* навіть без *TCC* забезпечує значення $P_п \le 10^{-3}$ в нестаціонарному каналі $\left(f_д T = 0{,}1\right)$ при незначному відношенні $\mathrm{E}_б/\mathrm{N}_0$ = 13 дБ. Додаткове застосування *TCC* надає ЕВК при $P_п = 10^{-3} - 5\cdot10^{-4}$ в межах 3,8 – 4,2 дБ.

Метод $\overline{SF}$ з *BPSK*, будучи інваріантний до частотної селективності каналу, є більш високоефективним в каналах зі значними рівнями нестаціонарності. Так при $f_д T = 0{,}2$ і

згаданому вище відношенні $\mathrm{E_б/N_0}$ = 13 дБ забезпечує ймовірність помилки $P_{\text{п}} \approx 10^{-4}$, що на порядок менше ніж для ансамблів сигналів *QPSK* в каналі із помірною нестаціонарністю $\left(f_{\text{д}}T = 0{,}1\right)$. При цьому ЕВК від застосування *TCC* складає 4 – 7 дБ (на рівні значень $P_{\text{п}} = 10^{-4} - 5\cdot 10^{-5}$ і має тенденцію до зростання).

З аналізу кривих рис.6. встановимо верхні межі допустимі значень доплерівського зсуву в каналах СВРЗ без кодування, що гарантують необхідну достовірність передачі інформації $\left(P_{\text{п}} = 10^{-3} - 5\cdot 10^{-4}\right)$ при $\mathrm{E_б/N_0}$ = 10 дБ. Підкреслимо, що метод *SFBC* незалежно від об'єму ансамблю сигналу (*BPSK, QPSK*) та рівня нестаціонарності частотно-селективного каналу не забезпечує необхідну достовірність. Навіть при $f_{\text{д}}T = 0$ ймовірність помилки $P_{\text{п}} > 2\cdot 10^{-3}$ за рахунок його критичності до частотної селективності каналу. В таких умовах застосування завадостійкого канального кодування значного покращення $P_{\text{п}}$ не забезпечує, однак спостерігається при $f_{\text{д}}T$, що не перевищує 0,1. Відомо, з отриманих результатів у [5], що у зазначеному діапазоні доцільніше використовувати канальне кодування із методом *WHSTCC*, який інваріантний до частотної селективності.

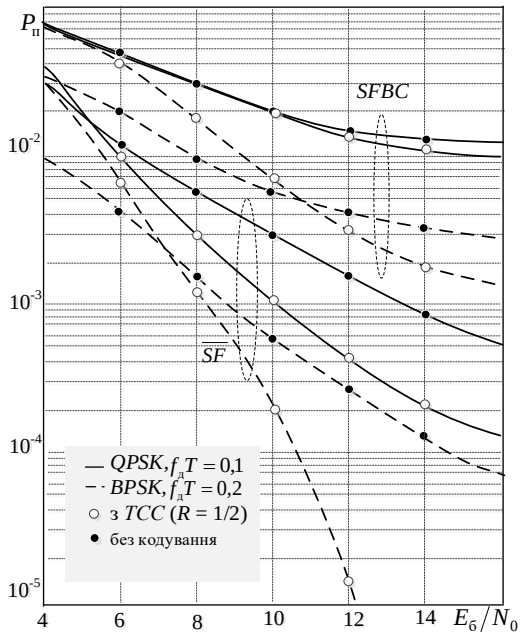

Рис.5 Завадостійкість СВРЗ із $\overline{SF}$, *SFBC* та *TCC* в частотно-селективному каналі з високими рівнями нестаціонарності

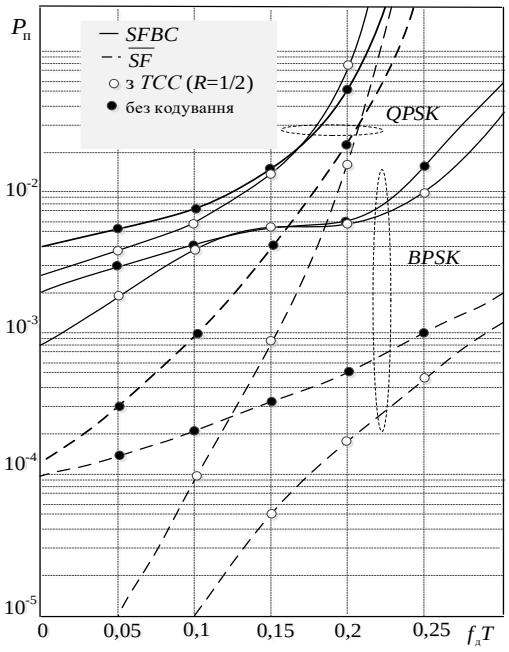

Рис.6 Ефективність СВРЗ з $\overline{SF}$, *SFBC*, *TCC* та ансамблями сигналів *QPSK* та *BPSK* в залежності від рівня нестаціонарності каналу

В той же час метод $\overline{SF}$ в частотно-селективному нестаціонарному каналі забезпечує $P_{\text{п}} = 10^{-3} - 5\cdot 10^{-4}$ при максимально допустимих значеннях $f_{\text{д}}T$, що складають: для *BPSK* 0,25 – 0,21, для *QPSK* –0,10 – 0,075. Застосування *TCC* дозволяє підвищити значення $f_{\text{д}}T$ для: *BPSK* до 0,3 – 0,26, *QPSK* до 0,15 – 0,14, що приблизно на 20 – 25 % для $\overline{SF}$ з *BPSK* та на 50 – 87 % для $\overline{SF}$ з *QPSK* підвищує стійкість СВРЗ до нестаціонарності каналу.

Висновки

Проведений аналіз ефективності основних завадостійких кодів у нестаціонарних частотно-селективних каналах системи військового зв'язку показав, що згорточний турбокоди з зазначеними параметрами є максимально ефективним. Енергетичний виграш від

його сумісного застосування з удосконаленими методами із підвищеною стійкістю до нестаціонарності та частотної селективності складає 5,5 дБ та 4,2 дБ.

В каналах з помірною нестаціонарністю енергетичний виграш від *TCC* в залежності від об'єму ансамблю сигналів становить 5,0 – 6,0 дБ. Застосування завадостійкого коду дозволяє суттєво підвищити (більш ніж у два-три рази) стійкість СВРЗ до нестаціонарності каналу, а також збільшити допустимі значення величини нормованого доплерівського зсуву.

В частотно-селективних каналах з високими рівнями нестаціонарності базовий метод просторово-частотного кодування навіть сумісно з завадостійкими кодами не забезпечує необхідну достовірність передачі інформації. Це пов'язано з суттєвою залежністю методу *SFBC* від частотної селективності каналу. В тож же час його удосконалена версія враховує вказану критичність та разом із *TCC* збільшує енергетичну ефективність СВРЗ в залежності від об'єму ансамбля сигналів на 4 – 7 дБ (*BPSK*) та 3,8 – 4,2 дБ (*QPSK*). В цілому стійкість СВРЗ до нестаціонарності за рахунок канального кодування підвищується на 20 – 25 % (*BPSK)* та 50 – 87 % (*QPSK).*

Напрямом подальших досліджень є узгодження завадостійкого кодуванням з методами адаптивної модуляції і просторового кодування в рамках єдиної сигнально-кодової конструкції, що може забезпечити, відповідно до тверджень провідного теоретика та практика у галузі телекомунікацій *R. Calderbank*, високоефективне використання енергетичного, частотного та просторового ресурсів реальних безпроводових каналів зв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / И.А. Гепко, В. Ф. Олейник, Ю. Д. Чайка – К.: „ЕКМО", 2009. – 671 с.

2. Namjeong Lee Adaptive switching between space-time and space-frequency block coded OFDM Systems / Namjeong Lee, Joonhyuk Kang // MilCom. – 2008.– pp. 7 – 13.

3. Hen-Geul Yeh Architectures for MIMO-OFDM system in frequency selective mobile fading channels / H. G. Yeh // IEEE Transactions on circuits and systems. – 2015. – vol. 62. – pp. 1189 – 1193.

4. A. Al-Dweik Robust MIMO-OFDM system for frequency selective mobile wireless channels / A. Al-Dweik, Sami Muhaidat, Fatma Kalbat // IEEE transaction on Vehicular Technology – 2014. – pp. 1 – 11.

5. Науменко М.І. Удосконалений метод просторово-часового блочного кодування для частотно-селективних нестаціонарних каналів систем військового радіозв'язку / Науменко М.І., Погребняк Л.М. // Збірники наукових праць ВІТІ – 2017. – № 1. – С. 81 – 86.

6. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: Справочник / Золотарев В.В., Овечкин Г.В. – М.:Горячая линия-Телеком, 2004. – 212 с.

7. Зубарев Ю.Б. Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных / Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. // Электросвязь – 2008. – № 12. – С. 58 – 61.

8. Сидоркина Ю.А. Анализ эффективности современных помехоустойчивых кодов / Сидоркина Ю.А., Шахтарин Б.И., Балахонов К.А. // Весник МГТУ им. Баумана – 2014. – № 6. – С. 107 – 116.

9. R.Krishnamoorthy Forward Error Correction Code for MIMO-OFDM System in AWGN and Rayleigh Fading Channel / R.Krishnamoorthy, N.S.Pradeep // International Journal of Computer Applications – 2013. – vol. 69. – pp. 8 – 13.

10. Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / Гельгор А.Л., Попов Е.А. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с.