

Рукопис надійшов: 25.05.2022

Статтю опубліковано: 31.08.2022

УДК 004.81

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263402

Розробка методики підвищення заводозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення в умовах впливу дестабілізуючих факторів

О. Я. Сова, А. В. Шишацький, В. М. Остапчук, Ю. В. Журавський, М. А. Роговець, І. В. Борисов, В. Ю. Бовсуновський, Ю. З. Артабасв, О. О. Троцько, І. Ю. Пилипчук

Об'єктом дослідження є багатоантенні системи зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення. Проблемним питанням, вирішенню якого присвячено дане дослідження, є підвищення заводозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення. Розроблено методику підвищення заводозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення в умовах впливу дестабілізуючих факторів. Відмінна особливість запропонованої методики полягає в використанні удосконаленої процедури попереднього кодування, оцінці стану каналу багатоантенних систем радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами за декількома показниками. Удосконалена процедура оцінки стану каналу полягає в оцінці ймовірності бітової помилки каналу, частотної характеристики стану каналу та імпульсної характеристики стану каналу. Формування оцінки стану каналу по кожному з показників оцінки відбувається на окремому шарі нейронної мережі з використанням апарату нечітких множин, після чого на виході нейронної мережі формується узагальнена оцінка. Новизна запропонованої методики полягає також в використанні удосконаленої процедури прогнозування стану каналу багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами. Сутність запропонованої процедури полягає в використанні нечітких когнітивних моделей та штучної нейронної мережі для прогнозування стану каналів багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами.

За результатами дослідження встановлено, що запропонована методика дозволяє підвищити заводозахищеність систем багатоантенних систем зі спектрально ефективними сигналами за схемою 8×8 та 64 піднесучими при на 20–25 % у порівнянні з відомими.

Ключові слова: засоби радіозв'язку, нейронні мережі, нечіткі множини, обчислювальна складність, частотна характеристика.

1. Вступ

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output – багато входів багато виходів) знайшла практичне застосування у багатьох сучасних телекомунікаційних системах. Технологія MIMO використовується в безпроводових локаль-

них мережах стандарту IEEE 802.11n, а також в безпроводових мережах мобільного зв'язку WiMAX і LTE тощо [1–5].

Суть технології MIMO подібна до методу рознесеного прийому, коли на приймальному боці створюються декілька некорельованих копій сигналу за рахунок рознесення антен у просторі, за поляризацією, рознесення сигналів за частотою або у часі.

В системах радіозв'язку з MIMO реалізується просторове мультиплексування: потік даних на передачі розбивається на два або більше підпотоків, кожний з яких передається та приймається за допомогою різних антен.

На заводо захищеність багатоантенних систем радіозв'язку впливають навмисні завади та завмирання сигналу, що виникають у ході багатопробеневого розповсюдження радіохвиль. Також одним з обмежень, технології MIMO є низька пропускна спроможність антенних каналів.

Для підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу та боротьби з завмираннями сигналу спільно з технологією MIMO використовуються спектрально ефективні сигнали з частотним ущільненням (Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing – SEFDM) [6–10].

Разом з тим, спільне використання технології MIMO та SEFDM знижує енергетичну ефективність каналів і в свою чергу призводить до зниження заводо захищеності. Це обумовлює пошук нових наукових підходів, що дозволяють при заданому рівні пропускної спроможності каналів системи MIMO забезпечити необхідний рівень заводо захищеності.

Все це підтверджує актуальність обраного напрямку дослідження.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Особливістю багатопробеневого каналу є його нестаціонарність внаслідок наявності в каналі постійних змін умов розповсюдження сигналу, що призводить до спотворень переданого сигналу. Окрім спотворень, що виникають унаслідок особливого характеру розповсюдження радіохвиль, на переданий сигнал можуть впливати навмисні і випадкові завади.

В роботі [3] проведено розробку методу оцінки стану каналу системи MIMO, що заснований на отриманні пілот сигналу на початку сеансу зв'язку та проведення подальшої оцінки на основі кореляції між блоками повідомлень. Недоліками запропонованого методу є оцінювання стану каналу систем MIMO тільки по одному показнику, а саме по ймовірності бітової помилки шляхом сліпої оцінки. Метод не призначений для оцінки по декільком показникам оцінки стану каналу одночасно, не врахує спотворення сигналу при використанні багаточастотної модуляції при використанні технології SEFDM.

В роботі [5] запропоновано методу оцінки стану системи MIMO, з урахуванням конфігурації системи MIMO та швидкості руху абонентського терміналу, проте зазначена методика не враховує вплив завад, що створюється засобами радіоелектронної боротьби, не враховується багаточастотне мультиплексування.

В роботі [10] авторами розглянуто вплив завад на продуктивність систем MIMO. При цьому оцінювання їх впливу проводилося лише на основі ймовірності бітової помилки, без врахування додаткових перетворень в антенних ка-

налах. Це не дозволяє проводити вироблення ефективних заходів адаптації до ситуації в каналі, не враховується багаточастотне мультиплексування.

В роботі [11] авторами проведено розробку методу підвищення перепускної здатності та оцінки стану каналу систем МІМО з використанням нейронних мереж. Проте оцінка стану каналу здійснюється методом грубої сили (повного перебору можливих варіантів – brute force [11]), що призводить до великої кількості обчислень. Складність отримання результатів методом повного перебору залежить від кількості всіх можливих варіантів рішення задачі. Якщо простір рішень дуже велике, то повний перебір всіх можливих значень може тривати роками.

В роботі [12] авторами розроблений метод оцінювання стану каналу системи МІМО-OFDM з використанням нейронної мережі. Зазначений метод може бути обраний як базовий, враховуючи подібність технології мультиплексування з технологією SEFDM. Отримані авторами результати показали значну перевагу нейронних мереж у порівнянні з відомими підходами. Авторами проведена оцінка каналу за ймовірністю бітової помилки, середньоквадратичною помилкою та методом найменшого квадрату. Оцінювання каналу в запропонованому методі здійснюється за окремо взятим показником.

В роботі [13] проведено розробку методики управління параметрами системи МІМО та методу оцінки каналу системи МІМО за допомогою нейронної мережі. Зазначена методика призначений для оцінювання та корегування параметрів системи МІМО на основі оцінювання ймовірності бітової помилки. Оцінювання інших параметрів системи при цьому не відбувається.

В роботі [14] проведено розробку методу компенсації фазового шуму в тому числі і систем МІМО з використанням нейронних мереж. В зазначеному методі проводиться оцінювання фазового шуму каналу та ймовірності бітової помилки.

В роботі [15] проведено розробку методу ієрархічного оцінювання стану каналу систем МІМО з використанням штучних нейронних мереж. В зазначеному методі проводиться послідовне оцінювання стану каналу шляхом повного перебору значень стану каналу по критерію мінімізації середньоквадратичної помилки. Після чого відбувається навчання нейронної мережі та частковим перебором проводиться до оцінювання стану каналу. Проте оцінювання по декільком показникам не відбувається, не враховуються спотворення, що наявні в піднесучих багаточасткового сигналу.

В роботі [16] проведено розробку методу передбачення характеристик стану каналу систем МІМО з використанням нейронних мереж. Для навчання нейронної мережі відбувається оцінювання 11 характеристик каналу, таких як:

- середня затримка часу проходження сигналу;
- характеристика середовища поширення;
- азимут кута випромінювання сигналу;
- азимут кута приходу сигналу;
- характеристика середовища поширення сигналу в куті поширення;
- середній кут поширення сигналу;
- кут подальшого розповсюдження сигналу, середній кут приходу сигналу, характеристика сигналу в куті подальшого поширення та інші.

В зазначеному методі проводиться послідовне оцінювання зазначених характеристик, а не паралельне, що збільшує час оцінювання стану каналу. Зазначені характеристики усі характеризують енергетику втрат сигналу в ході поширення, проте не дозволяє оцінити частотну характеристику та ймовірність бітової помилки в каналі.

В роботі [17] запропонований метод оцінки стану каналу зв'язку з використанням технології MIMO-OFDM. В зазначеній статті оцінка ймовірності бітової помилки стану каналу системи MIMO-OFDM проводиться з використанням компресійного алгоритму, лінії що йде вниз на пілотних несучих OFDM. Знову ж таки, і цей метод не призначений для оцінювання за декількома показниками оцінки стану каналу.

В роботі [18] наведений аналіз відомих підходів щодо оцінки стану каналу зв'язку з використанням технології MIMO-OFDM. Наведені методи оцінки стану каналу зв'язку що засновані на оцінюванні ймовірності бітової помилки. Наведені в роботі методи оцінки не здатні проводити оцінку по декільком показникам оцінки одночасно.

Отже проведений аналіз відомих наукових підходів з підвищення заводо- захищеності систем радіозв'язку з технологією MIMO-SEFDM показав, що в зазначених працях відсутнє наступне [1–18]:

- вибір методів попереднього кодування каналів з технологією MIMO-SEFDM;
- отримання узагальненої оцінки стану каналу каналів з технологією MIMO-SEFDM;
- постійне оцінювання декількох характеристик в режимі реального часу каналів з технологією MIMO-SEFDM;
- одночасно оцінювати як лінії вниз так і лінії вгору з технологією MIMO-SEFDM;
- прогнозування стану каналів з технологією MIMO-SEFDM.

З цією метою слід вважати за доцільне проведення розробки методики підвищення заводо- захищеності багатоантенних систем зі спектрально- ефективними сигналами спеціального призначення в умовах впливу дестабілізуючих факторів. Це дозволяє реалізувати компроміс між спектральною та енергетичною ефективністю каналів радіозв'язку.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка методики підвищення заводо- захищеності багатоантенних систем зі спектрально- ефективними сигналами спеціального призначення в умовах впливу дестабілізуючих факторів, який дозволяє підвищити заводо- захищеність каналів радіозв'язку з технологією MIMO-SEFDM. Це дасть можливість підвищити ефективність функціонування каналів радіозв'язку з технологією MIMO-SEFDM в умовах деструктивного впливу.

Для вирішення поставленого завдання необхідно вирішити ряд взаємо- пов'язаних завдань дослідження:

- провести формалізацію роботи системи MIMO-SEFDM;

- розробити алгоритм реалізації методики підвищення заводозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення в умовах впливу дестабілізуючих факторів;
- провести оцінку ефективності запропонованої методики;

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є багатоантенні системи зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення.

Сутність запропонованої методики полягає в адаптивному виборі раціональних значень параметрів каналів багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами в залежності від поточної реалізації передаточної характеристики каналів, за критерієм мінімуму ймовірності бітової помилки при виконанні обмежень на швидкість передачі інформації.

В ході проведеного дослідження використовувалися загальні положення теорії штучного інтелекту – для вирішення задачі аналізу та прогнозування стану каналів засобів радіозв'язку з технологією MIMO-SEFDM. Тобто, теорія штучного інтелекту є основою зазначеного дослідження. Моделювання проводилося з використанням програмного забезпечення MathCad 2014 (США) та ПЕОМ Intel Core i3 (США).

Оцінку ефективності та моделювання роботи запропонованої в дослідженні методики підвищення заводозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення в умовах впливу дестабілізуючих факторів було проведено в програмному забезпеченні MatCad 14 (США).

5. Результати дослідження з розробки методики підвищення заводозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення

5. 1. Формалізація роботи системи MIMO-SEFDM

Структурна схема систему радіозв'язку, що використовує MIMO зі спектрально-ефективними сигналами, наведена на рис. 1 [19, 20].

В зазначеній схемі на передавальній стороні після кодера (який тут включає в себе і модулятор) сигнал піддається лінійному перетворенню за допомогою матриці \mathbf{F} . Потім сигнал надходить у канал зв'язку MIMO зі спектрально-ефективними сигналами з матрицею каналу \mathbf{H} . Матриця \mathbf{F} лінійного перетворення визначає алгоритм лінійного попереднього кодування.

Вид кодера та модулятора, що використовуються, має суттєвий вплив на структуру алгоритму попереднього кодування. При синтезі алгоритмів попереднього кодування зазвичай розглядають дві архітектури системи зв'язку MIMO зі спектрально-ефективними сигналами:

- система MIMO зі спектрально-ефективними сигналами з просторовим мультиплексуванням. В такій системі незалежні інформаційні потоки передаються через всі антени, в ній можлива окрема адаптація швидкості передачі для кожної передавальної антени з використанням наявної на передавальній стороні інформації про стан каналу зв'язку;

– система МІМО зі спектрально-ефективними сигналами з просторово-часовим кодуванням.

Процедура попереднього кодування, що спирається на використання доступної на передавальній стороні інформації про стан каналу зв'язку, забезпечує виконання двох функцій:

– розбиття сигналу, що передається, на незалежні просторові потоки (промені);

– розподіл потужності випромінюваних сигналів між цими просторовими потоками (променями).

Якщо просторові потоки (промені) точно відповідають власним (сингулярним) векторам матриці \mathbf{H} каналу, то взаємні завади між цими потоками не виникають. Передача інформації каналом зв'язку у цьому випадку здійснюється паралельно у кількох незалежних просторових каналах. Для реалізації такого ідеального трансферу даних необхідно, щоб на передавальній стороні була доступна точна інформація про поточний стан каналу зв'язку.

Якщо на передавальній стороні інформація про канал зв'язку відома тільки частково, то при попередньому кодуванні просторові потоки (промені) формуються таким чином, щоб мінімізувати рівень взаємних завад між ними. Слід зазначити, що при збільшенні кількості передавальних антен число ступенів свободи зростає. Це дозволяє отримати більш вагомий енергетичний вигравш від попереднього кодування, що підтверджує додаткову перевагу використання технології МІМО зі спектрально-ефективними сигналами, порівняно з класичною технологією МІМО.

Модель сигналу у системі зв'язку МІМО зі спектрально-ефективними сигналами з лінійним попереднім кодуванням може бути подана в наступній формі:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{C} + N_0, \quad (1)$$

де \mathbf{H} – матриці каналу, N_0 – білий гаусівський шум із спектральною щільністю потужності $G(f) = G_0$, $0 < f < \infty$, \mathbf{F} – матриця попереднього кодування каналу, \mathbf{C} – кодова матриця каналу.

Ця модель справедлива як для просторового мультиплексування, так і для просторово-часового кодування.

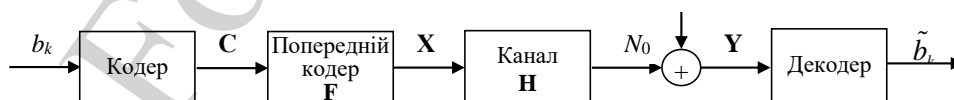


Рис. 1. Узагальнений опис системи багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами

5. 2. Алгоритм реалізації методики підвищення завадозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами

Проблему підвищення завадозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення можна вирішити шляхом адаптивного вибору раціональних значень параметрів каналів багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами.

ми в залежності від поточної реалізації передаточної характеристики каналів. За критерій ефективності може бути обрано мінімум ймовірності бітової помилки при виконанні обмежень на швидкість передачі інформації.

Постановка завдання.

Задано: параметри прийомопередавального пристрою і каналу $\Psi = \{\psi_i\}$, $i = \overline{1, m}$, де $\psi_1 \dots \psi_m$ – кількість передавальних та приймальних антен, вид модуляції, вид та параметри коригувального коду, потужність сигналу, смуга частот сигналу, відношення сигнал/завада (ВСЗ), \mathbf{H} – канална матриця.

Необхідно: визначити параметри багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами, які мінімізують ймовірність бітової помилки при виконанні обмеження на швидкість передачі інформації.

Обмеження: $\tau_{гр} \leq \tau_{кор}$, де $\tau_{гр}$ – тривалість групи символів, $\tau_{кор}$ – час кореляції завмирань; розмірність ансамблю сигналів $2 \leq M \leq 64$; кількість передавальних антен $S \leq 8$; кількість приймальних антен $V \leq 8$; швидкість коригувального коду $R = 0,5 - 0,9$; ймовірність помилкового приймання сигналів $P_6 \leq 10^{-3}$.

Допущення: канална матриця \mathbf{H} – відома і постійна за час $\tau_{гр}$.

Завдання вибору параметрів багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами з мінімальною ймовірністю бітової помилки P_6 зводяться до типової оптимізаційної задачі. Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд:

$$\begin{cases} P_6 = F_1(v_i, \Delta F, M, S, V, n, R, d, h^2, F) \rightarrow \min; \\ v_i = F_2(P_6, M, n, R, d, F) \geq v_{i, \text{доп}}, \end{cases} \quad (2)$$

де v_i – швидкість передачі інформації; ΔF – ширина смуги пропускання каналу; n – довжина кодової комбінації, P_c – потужність сигналу, M – розмірність ансамблю сигналів, R – швидкість коригувального коду ($R = k/n$), k – кількість інформаційних біт в кодовій комбінації довжиною n , d – величина кодової відстані, h^2 – відношення сигнал/шум на вході приймача, \mathbf{F} – матриця попереднього кодування.

Таким чином, система рівнянь (2) для розв'язання оптимізаційної задачі перетворюється до вигляду:

$$P_6 = F_1(\Psi) = \frac{R \cdot S \cdot V \cdot \log_2 M}{\Delta F \cdot \tau_i} \rightarrow \min_{\Psi \in G};$$

$$G = \begin{cases} \Delta F = \Delta F_{\text{зад}}; M = 2^m; 1 \leq m \leq 6; \\ 1 \leq S \leq 8; 1 \leq V \leq 8; \\ 7 \leq n \leq 256; 1 \leq Q^2 \leq 100; \\ 0,5 \leq R \leq 0,9; 0 < \tau_i \leq \tau_{i, \text{доп}}; \\ 1 \leq d \leq 19; S, V, d, n, m \in \mathbb{Z}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\Psi = [\Delta F, M, S, V, n, R, d, \tau_i, P_6, h^2, F].$$

Розв'язання представленої задачі умовної дискретної оптимізації доцільно проводити за допомогою направленої перебору допустимих варіантів з використанням ітеративного алгоритму.

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

Введення вихідних даних. Вводяться параметри багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами і каналів $\Psi = \{\psi_i\}$, $i = \overline{1, 8}$, де $\psi_1 \dots \psi_8$ – кількість передавальних та приймальних антен. Також вид модуляції, розмірність ансамблю сигналів, тривалість кадру на виході демодулятора, тривалість кадру на виході декодера, швидкість коригувального коду, величина кодової відстані, тип кодеру попереднього кодування.

Оцінка стану каналу. На даному етапі за допомогою розробленого авторами методу оцінки стану каналу [21–23] оцінюється стан багатопроменевого каналу та визначається його канална матриця.

Попереднє кодування.

Розглянемо пошук матриці \mathbf{F} – рішення оптимізаційної задачі оптимальних параметрів попереднього кодування у наступному вигляді:

$$\mathbf{F} = \mathbf{V}\mathbf{T}, \quad (4)$$

де \mathbf{V} – унітарна матриця із SVD-розкладання, а шукана матриця \mathbf{T} належить до підгрупи поворотів $SU(M)$ унітарної групи $U(M)$ у просторі C^M .

Зазначимо, що для \mathbf{F} у вигляді обмеження $\varepsilon_n \left(\text{Tr} \left(\mathbf{F}\mathbf{x}(\mathbf{F}\mathbf{x})^H \right) \right) = P_{\text{симв}} * M$ виконується автоматично, оскільки в результаті множення на унітарну матрицю евклідова норма вектору \mathbf{x} не змінюється. Задача знаходження оптимальних параметрів попереднього кодування для репрезентативного набору матриць, характерного, відповідно до зібраної статистики, для даного поєднання антенної групи та вектору колокації, вирішується щодо \mathbf{T} чисельно:

$$\mathbf{T}_{opt}(SNR, H) = \arg \min_{\mathbf{T}} \left(\varepsilon_n \left(SER(SNR, \mathbf{H}, \mathbf{T}) \right) \right),$$

$$\mathbf{T} \in SU(M). \quad (5)$$

Далі знайдене оптимальне значення \mathbf{T}_{opt} записується в базу даних ЗРЗ як рекомендований другий елемент попереднього кодування (5) для цього поєднання антени групи і вектору колокації. Головне: чисельний пошук \mathbf{T}_{opt} ведеться заздалегідь поза сеансу зв'язку. Запропонуємо параметричне уявлення для матриць \mathbf{T} для випадків $M=2$ і $M=4$, в рамках якого будемо методом перебору шукати розв'язання задачі (5).

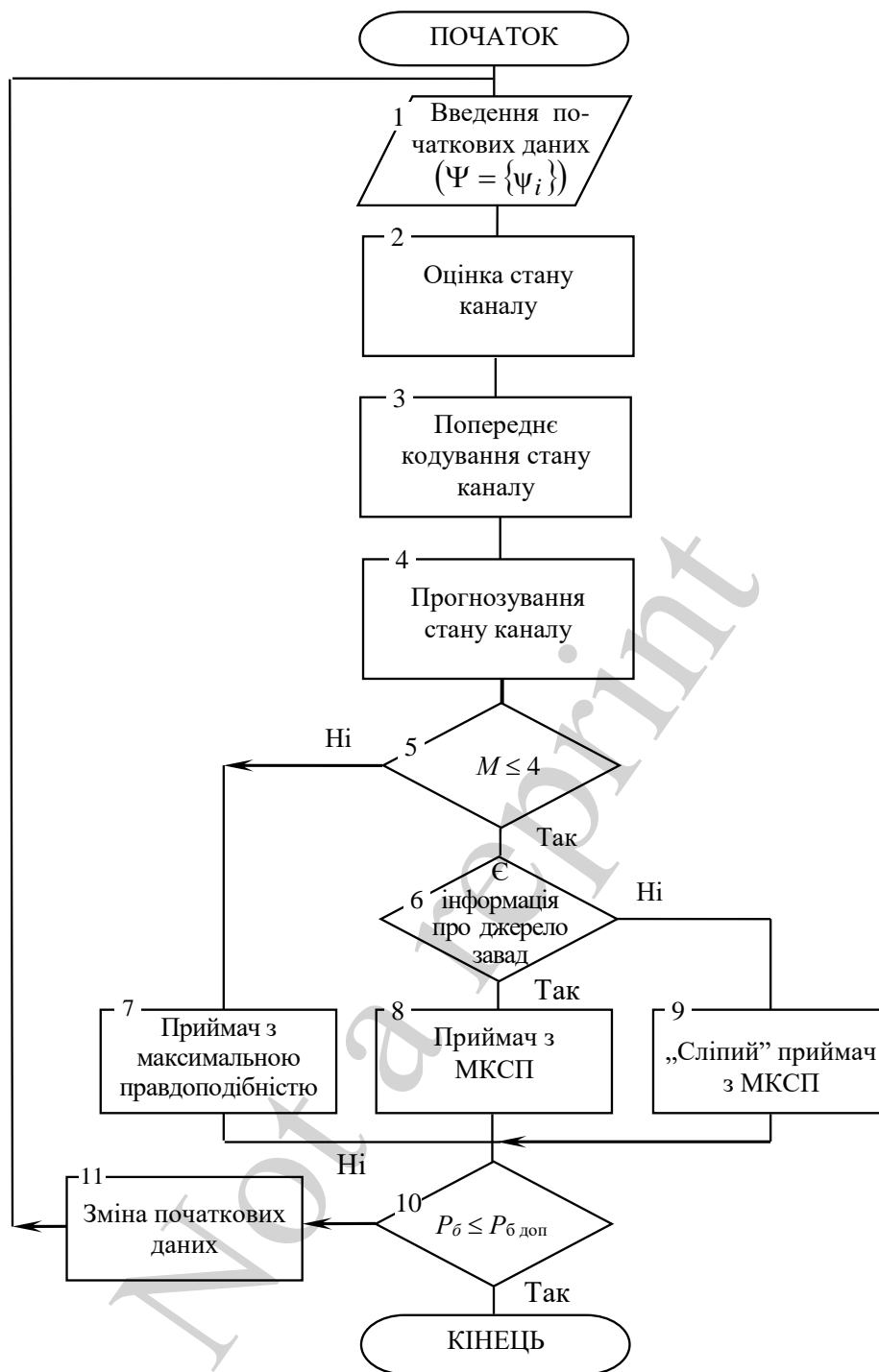


Рис. 2. Схема алгоритму реалізації запропонованої методики

Для $M \geq 2$ будемо шукати T у групі $SU(2)$, тобто згідно матричного подання елемента $SU(2)$ вигляді [24–32]:

$$T_{\alpha, \vartheta, \psi} = \begin{bmatrix} \alpha e^{i, \vartheta} & \sqrt{1 - \alpha^2} e^{-i\psi} \\ -\sqrt{1 - \alpha^2} e^{-i\psi} & \alpha e^{-i, \vartheta} \end{bmatrix}, \tag{6}$$

де $\alpha \in [0; 1]$, $\vartheta \in [0; 2\pi]$; $\psi \in [0; 2\pi]$.

Для $M=4$ будемо шукати T у підгрупі $SU(2) \times SU(2) \in SU$ [24], тобто згідно матричного представлення елемента $SU(2) \times SU(2)$ у вигляді [25]:

$$\mathbf{T}_{a,b,\vartheta,\psi,\omega,\delta} = \begin{bmatrix} ae^{i\vartheta} & \sqrt{1-\alpha^2}e^{-i\psi} \\ -\sqrt{1-\alpha^2}e^{-i\psi} & ae^{-i\vartheta} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} be^{i\vartheta} & \sqrt{1-b^2}e^{-i\psi} \\ -\sqrt{1-b^2}e^{-i\psi} & be^{-i\vartheta} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де $\alpha, b \in [0;1]$, $\vartheta \in [0;2\pi]$; $\psi \in [0;2\pi]$; $\omega \in [0;2\pi]$; $\delta \in [0;2\pi]$

Знак \otimes позначає Кронекеровий добуток матриць.

Прогнозування стану каналів багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами.

Процедуру прогнозування стану каналів багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами будемо розглядати на основі в даному випадку використовується на основі нечітких когнітивних моделей та штучної нейронної мережі [22, 23].

Вибір параметрів СКК. Алгоритм вибору СКК для кожного власного каналу складається з вибору, в залежності від заводої обстановки, виду модуляції, вибору коректувального коду і вибору маніпуляційного коду.

При створенні СКК широкий розвиток одержали методи двовимірної модуляції, при яких ансамблі сигналів можуть бути представлені крапками в двовимірному евклідовому просторі. Незважаючи на те, що теоретично при передачі інформації з каналу одномірні види модуляції мають такі ж потенційні можливості, що і двовимірні, при формуванні СКК одномірна модуляція використовується набагато рідше. Застосування багатомірних сигналів обмежується складністю реалізації таких СКК.

В [12] показано, що системи з високою енергетичною ефективністю, що необхідні для виконання умов методики, які забезпечують виграш за β_E і програш за β_F – системи з СКК у яких використовується багатопозиційна фазова (ФМ-М) маніпуляція. В даній процедурі відбувається пошук оптимальної СКК за допомогою нечітких когнітивних моделей на основі підходу запропонованого авторами в [22, 23, 28, 33, 34].

Вибір способу обробки сигналів при прийманні.

На даному етапі вибирається один із способів обробки сигналів в приймачі системи МІМО: детектування з максимальною правдоподібністю; приймання з мінімальною середньоквадратичною помилкою (MMSE) або так зване „сліпе” приймання сигналів.

Після вибору способу обробки сигналів перевіряється виконання вимог із забезпечення заданої ймовірності помилкового приймання сигналів.

5. 3. Оцінка ефективності запропонованої методики підвищення заводо- захищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами

Для системи МІМО 8×8 з чотирьохпозиційною квадратурною модуляцією для релесівського каналу було проведено статистичне моделювання в середовищі *MatCad* та 64 піднесучих на кожному антенному каналі. На рис. 3 подано

результати ефективності запропонованої методики. На рис. 4 наведена порівняння запропонованої методики по ефективності попереднього кодування з відомими за критерієм мінімуму ймовірності бітової помилки.

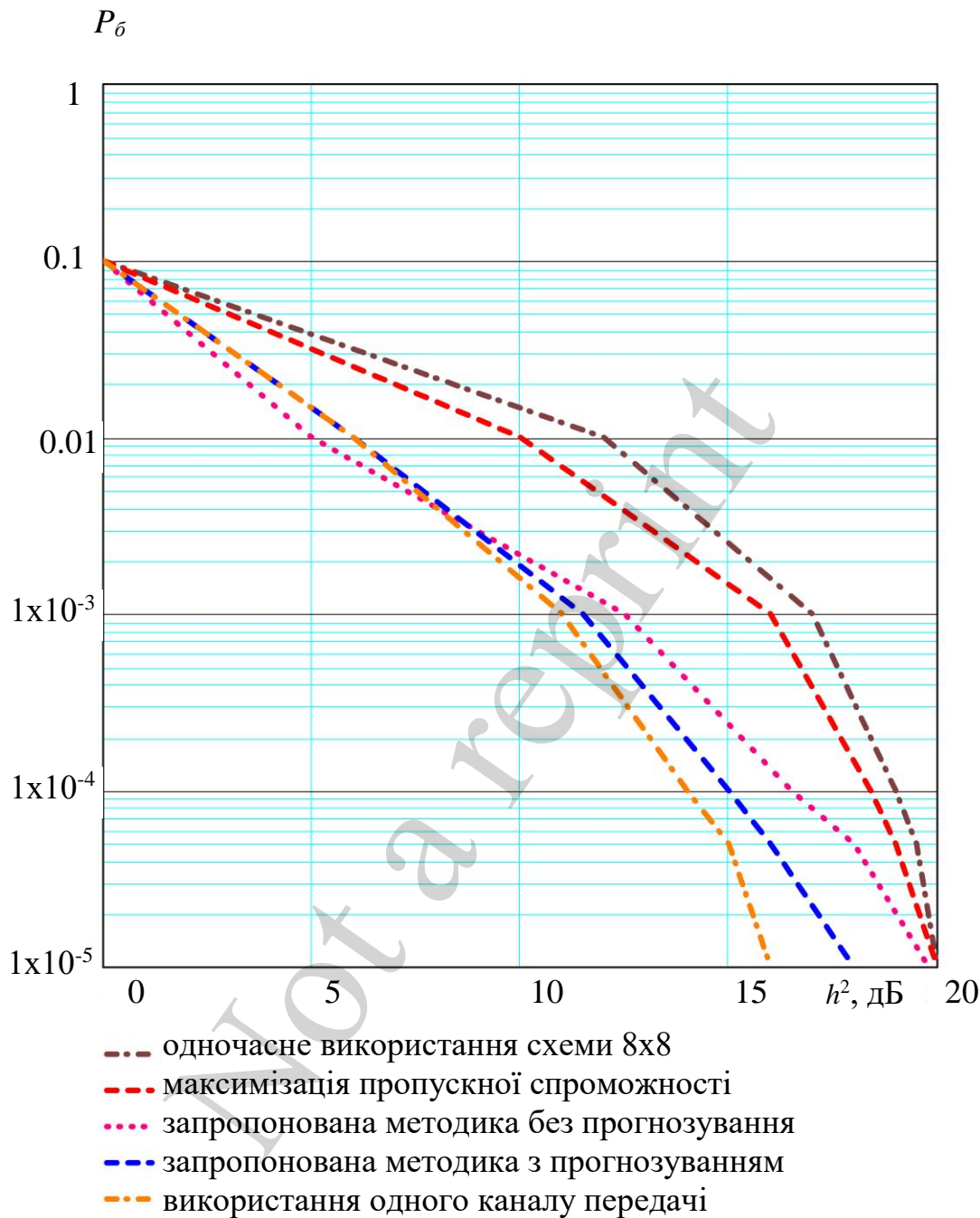


Рис. 3. Результати оцінки ефективності запропонованої методики

Результати моделювання показують, що запропонована методика дозволяє проводити реалізувати прогнозування стану каналів системи МІМО зі спектрально ефективними сигналами. Також дозволяє здійснювати адаптивне перемикання числа каналів, здійснювати попереднє кодування каналів при збереженні ймовірності бітової помилки нижче заданої межі. При цьому можливо працювати при низьких значення відношення сигнал/шум в режимах з обмеженою кількістю паралельних каналів передачі.

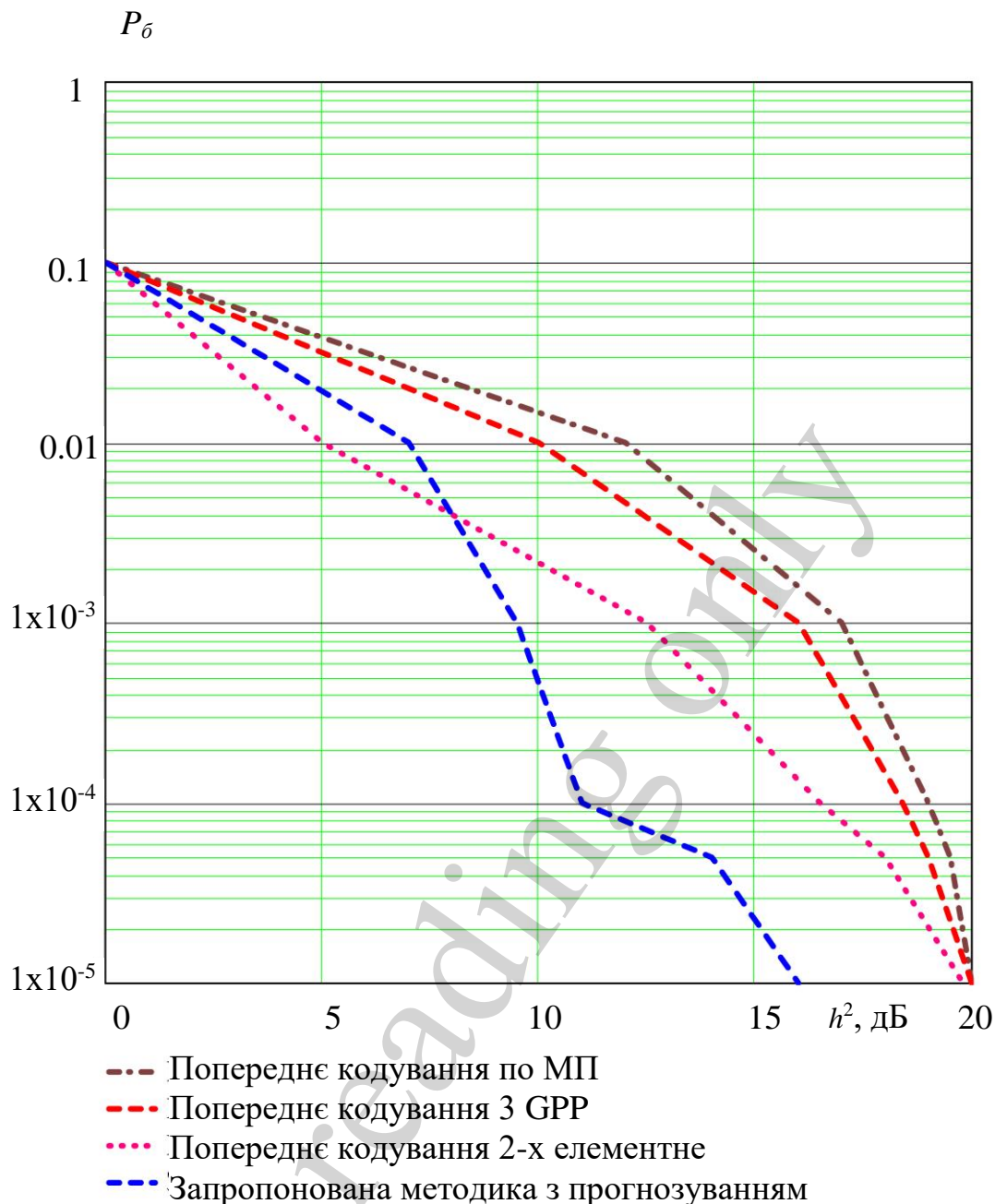


Рис. 4. Результати оцінки ефективності запропонованої методики по ефективності попереднього кодування

Оцінка ефективності запропонованої методики дозволяє стверджувати про те, що вона дозволяє підвищити завадозахищеність систем МІМО зі спектрально-ефективними сигналами за схемою 8×8 та 64 піднесучими при $P_{\delta} = 10^{-5}$ на 20–25 % у порівнянні з відомими.

6. Обговорення результатів з розробки методики підвищення завадозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами

Запропоновано методику підвищення завадозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення. Перевага зазначеної методики від відомих полягає в наступному:

- формалізацією процесу функціонування багатоантенних систем зі спектрально ефективними сигналами в умовах впливу дестабілізуючих факторів з урахуванням попереднього кодування (рис. 1, вираз (1));
- удосконаленою процедурою оцінки, в основу якої покладено метод оцінки стану каналу [21–23];
- удосконаленою процедурою попереднього кодування (вирази (4)–(6));
- удосконаленою процедурою прогнозування на основі нечітких когнітивних моделей та штучної нейронної мережі [22, 23];
- адекватною оцінкою деструктивного впливу на заводозахищеність багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами (графічні залежності на рис. 3, 4).

Проведено моделювання роботи запропонованої методи в програмному середовищі MathCad 14.

Основними перевагами запропонованої методики є:

- використання комплексного показника оцінки стану каналу, що враховує більшість відомих параметрів оцінки;
- однозначність отриманої оцінки стану каналу;
- широка сфера використання (системи радіозв'язку та радіолокації);
- простота математичних розрахунків;
- підвищена оперативність оцінки стану каналу за рахунок використання теорії штучного інтелекту;
- можливість адаптації до сигнальної обстановки в каналі та прогнозування стану каналу;
- можливість синтезу оптимальної структури засобу радіозв'язку.

До недоліків запропонованої методики слід віднести:

- втрата інформативності при оцінюванні стану каналу за рахунок комплексної оцінки.
- менша точність оцінювання по окремо взятому параметру оцінки стану каналу;
- менша точність оцінювання на початковому етапі, що пов'язано з ненавченістю нейронної мережі та відсутності бази сигнальної обстановки;
- дану методику не доцільно використовувати в системах радіозв'язку при необхідності отримання точної оцінки стану каналу по окремому показнику.

Зазначену методику доцільно використовувати в радіостанціях з програмованою архітектурою, що функціонує в умовах активного радіоелектронного подавлення.

Зазначена методика дозволить:

- ідентифікувати структуру завади, її тип та закон постановки;
- провести оцінку стану каналу;
- використовувати ефективні сигнально-кодові конструкції для забезпечення заводозахищеності каналів;
- забезпечити ефективне використання радіочастотного ресурсу програмованих засобів радіозв'язку;
- підвищити швидкість оцінки каналів зв'язку;

– зменшити використання обчислювальних ресурсів засобів радіозв'язку з програмованою архітектурою.

– виробити заходи, що спрямовані на підвищення завадозахищеності.

Обмеженнями зазначеного дослідження є:

– наявність бази радіоелектронної обстановки регіону застосування;

– достатня кваліфікація особового складу, що експлуатує радіостанції;

– наявність мінімальних обчислювальних ресурсів радіостанції, для коректної роботи програмного забезпечення.

Запропоновану в роботі методику доцільно використовувати при розробці програмного забезпечення для модулів (блоків) оцінки перспективних засобів радіозв'язку, що засновано на інтерфейсах відкритої архітектури версії SCA 2.2.

Зазначене дослідження є подальшим розвитком досліджень проведеними авторами, що спрямовані на розробку методологічних засад оперативного управління радіоресурсом систем радіозв'язку.

7. Висновки

1. Проведено формалізацію роботи системи MIMO-SEFDM. Зазначений формалізований опис дозволяє описати процеси, які відбуваються в процесі передачі інформації в каналах системи MIMO-SEFDM та визначити заходи, які спрямовані на підвищення енергетичної ефективності системи MIMO-SEFDM.

2. Запропонований алгоритм реалізації методики підвищення завадозахищеності багатоантенних систем зі спектрально-ефективними сигналами спеціального призначення в умовах впливу дестабілізуючих факторів.

Відмінність запропонованого алгоритму реалізації методики полягає у виборі значень параметрів системи MIMO та спектрально-ефективних сигналів (раціональних параметрів попереднього кодування). Також параметрів сигналів для кожного каналу системи MIMO в залежності від поточного стану передаточної характеристики каналу. Вибір здійснюється з врахуванням результатів прогнозування за критерієм мінімуму ймовірності бітової помилки при виконанні обмежень на швидкість передачі інформації. Зазначений вибір здійснюється за допомогою теорії штучного інтелекту, що покладений в основу удосконалених процедур.

Раціональні значення параметрів сигналу для конкретного стану каналу визначаються зі скінченної кількості допустимих варіантів, що дозволяє спростити практичну реалізацію обладнання багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами.

Параметрами сигналу, значення яких визначаються при розв'язанні оптимізаційної задачі є: параметри попереднього кодування, кількість піднесучих, параметри сигнально-кової конструкції, метод обробки сигналів та потужність передавача.

3. Впровадження розробленої методики забезпечує: мінімізацію ймовірності бітової помилки; мінімізацію потужності передавача; покращення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів; підвищення скритності передачі інформації; мінімізація енергоспоживання.

Одержані результати можуть бути застосовані в адаптивних прийомопередавачах багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами, що дозволить істотно підвищити їх завадозахищеність в умовах навмисних завад та селективних завмирань.

Зазначена методика дозволяє підвищити завадозахищеність каналів багатоантенних систем військового радіозв'язку зі спектрально-ефективними сигналами на 20–25 %, що підтверджується результатами моделювання.

Вдячності

Авторський колектив виловлює подяку за надання допомоги: доктору технічних наук, професору Ротштейну Олександр Петровичу Ієрусалимського політехнічного інституту – Махон Лев.

Література

1. Слюсар, В. (2005). Системы МІМО: принципы построения и обработка сигналов. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, 8, 52–58. URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/974>
2. Кувшинов, О. В. (2009). Адаптивне управління засобами завадозахисту військових систем радіозв'язку. *Збірник наукових праць ВІКНУ*, 17, 125–130.
3. Dahiya, S., Singh, A. K. (2018). Channel estimation and channel tracking for correlated block-fading channels in massive MIMO systems. *Digital Communications and Networks*, 4 (2), 138–147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2017.07.006>
4. Khan, I., Singh, D. (2018). Efficient compressive sensing based sparse channel estimation for 5G massive MIMO systems. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 89, 181–190. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.03.038>
5. Вовченко, В. В. (2015). Статистическая оценка потерь в каналах связи стандарта LTE и LTE-Advanced на базе технологии МІМО. *Системы обработки інформації*, 7 (132), 159–163.
6. Мардоян, Г. Р. (2015). Оценка МІМО канала для псевдокогерентных систем связи. В *мире научных открытий*, 2 (62), 465–478. doi: <https://doi.org/10.12731/wsd-2015-2-27>
7. Chiong, C. W. R., Rong, Y., Xiang, Y. (2016). Blind channel estimation and signal retrieving for MIMO relay systems. *Digital Signal Processing*, 52, 35–44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2016.02.007>
8. Wang, Y., Chen, K., Yu, J., Xiong, N., Leung, H., Zhou, H., Zhu, L. (2017). Dynamic propagation characteristics estimation and tracking based on an EM-EKF algorithm in time-variant MIMO channel. *Information Sciences*, 408, 70–83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.04.035>
9. Kühn, V. (2006). *Wireless Communications over MIMO Channels. Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems*. John Wiley Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/0470034602>
10. Shaheen, E. M., Samir, M. (2013). Jamming Impact on the Performance of MIMO Space Time Block Coding Systems over Multi-path Fading Channel. *REV*

Journal on Electronics and Communications, 3 (1-2). doi: <https://doi.org/10.21553/rev-jec.56>

11. Zhou, X., Zhuge, Q., Qiu, M., Xiang, M., Zhang, F., Wu, B. et. al. (2018). Bandwidth variable transceivers with artificial neural network-aided provisioning and capacity improvement capabilities in meshed optical networks with cascaded ROADM filtering. *Optics Communications*, 409, 23–33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.09.021>

12. Seyman, M. N., Taşpınar, N. (2013). Channel estimation based on neural network in space time block coded MIMO–OFDM system. *Digital Signal Processing*, 23 (1), 275–280. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2012.08.003>

13. Reshamwala, N. S., Suratia, P. S., Shah, S. K. (2014). Artificial Neural Network trained by Genetic Algorithm for Smart MIMO Channel Estimation for Downlink LTE-Advance System. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 6 (3), 10–19. doi: <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2014.03.02>

14. Кувшинов, О. В. (2011). Алгоритми контролю стану каналу зв'язку в умовах складної радіоелектронної обстановки. Системи озброєння і військова техніка, 2 (26), 189–192. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2011_2_45

15. Слюсар, В. И., Слюсар, И. И. (2003). Совместное оценивание нескольких параметров сигналов в системах связи с цифровым диаграммообразованием. Сб. “Материалы 7-го юбилейного международного молодежного форума “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке”. Харьков, 128.

16. Hranac, R. (2017). Broadband: Is MER Overrated? *Communications Technology*.

17. Mahmoud, H. A., Arslan, H. (2009). Error vector magnitude to SNR conversion for nondata-aided receivers. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8 (5), 2694–2704. doi: <https://doi.org/10.1109/twc.2009.080862>

18. Шматок, С. О., Подчашинський, Ю. О., Шматок, О. С. (2007). Математичні та програмні засоби моделювання пристроїв і систем управління. Використання нечітких множин та нейронних мереж. Житомир: ЖДТУ, 280.

19. Andrews, J. G. (2005). Modulation, coding and signal processing for wireless communications - Interference cancellation for cellular systems: a contemporary overview. *IEEE Wireless Communications*, 12 (2), 19–29. doi: <https://doi.org/10.1109/mwc.2005.1421925>

20. Goldsmith, A., Jafar, S. A., Jindal, N., Vishwanath, S. (2003). Capacity limits of MIMO channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 21 (5), 684–702. doi: <https://doi.org/10.1109/jsac.2003.810294>

21. Kalantaievska, S., Pievtsov, H., Kuvshynov, O., Shyshatskyi, A., Yarosh, S., Gatsenko, S. et. al. (2018). Method of integral estimation of channel state in the multiantenna radio communication systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (95)), 60–76. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144085>

22. Koshlan, A., Salnikova, O., Chekhovska, M., Zhyvotovskiy, R., Prokopenko, Y., Hurskyi, T. et. al. (2019). Development of an algorithm for complex processing of geospatial data in the special-purpose geoinformation system in conditions of

diversity and uncertainty of data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (101)), 35–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>

23. Mahdi, Q. A., Shyshatskyi, A., Prokopenko, Y., Ivakhnenko, T., Kupriyenko, D., Golian, V. et. al. (2021). Development of estimation and forecasting method in intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (9 (111)), 51–62. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232718>

24. Гороховатський, В., Стяглик, Н., Царевська, В. (2021). Комбінаційний метод прискореного метричного пошуку даних у задачах класифікації зображень. *Сучасні інформаційні системи*, 5 (3), 5–12. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.01>

25. Levashenko, V., Liashenko, O., Kuchuk, H. (2020). Building Decision Support Systems based on Fuzzy Data. *Advanced Information Systems*, 4 (4), 48–56. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.07>

26. Meleshko, Y., Drieiev, O., Drieieva, H. (2020). Method of identification bot profiles based on neural networks in recommendation systems. *Advanced Information Systems*, 4 (2), 24–28. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.05>

27. Kuchuk, N., Merlak, V., Skorodelov, V. (2020). A method of reducing access time to poorly structured data. *Advanced Information Systems*, 4 (1), 97–102. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>

28. Shyshatskyi, A., Tiurnikov, M., Suhak, S., Bondar, O., Melnyk, A., Bokhno, T., Lyashenko, A. (2020). Method of assessment of the efficiency of the communication of operational troop grouping system. *Advanced Information Systems*, 4 (1), 107–112. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.16>

29. Raskin, L., Sira, O. (2016). Method of solving fuzzy problems of mathematical programming. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (4 (83)), 23–28. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81292>

30. Lytvyn, V., Vysotska, V., Pukach, P., Brodyak, O., Ugryn, D. (2017). Development of a method for determining the keywords in the slavic language texts based on the technology of web mining. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (86)), 14–23. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.98750>

31. Stepanenko, A., Oliinyk, A., Deineha, L., Zaiko, T. (2018). Development of the method for decomposition of superpositions of unknown pulsed signals using the second-order adaptive spectral analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (92)), 48–54. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126578>

32. Gorbenko, I., Ponomar, V. (2017). Examining a possibility to use and the benefits of post-quantum algorithms dependent on the conditions of their application. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (86)), 21–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96321>

33. Lovska, A. A. (2015). Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge. *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 49–54. URL: https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_1/10%20Lovska.pdf

34. Lovska, A., Fomin, O. (2020). A new fastener to ensure the reliability of a passenger car body on a train ferry. *Acta Polytechnica*, 60 (6). doi: <https://doi.org/10.14311/ap.2020.60.0478>