

УДК 621.396

д-р техн. наук Сайко В. Г. ORCID: 0000-0002-3059-6787 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Станілога О. О. ORCID: 0000-0002-6047-1897 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Пантась С. О. ORCID: 0000-0001-9868-142X (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Пантась І. О. ORCID: 0000-0001-5766-1422 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПЕЛЕНГАЦІЇ СИГНАЛІВ СТАНДАРТУ IEEE 802.11bf

Розвиток методів спільної ідентифікації та пеленгування дозволяє розділяти пеленги великої кількості джерел сигналів безпроводових систем зв'язку, що ведуть роботу в одному частотному діапазоні з поділом за часом [21–26]. У цій роботі акцент зроблено на виявленні цільових сигналів та виділення з них ідентифікаційних ознак джерела. Від успішності реалізації цих операцій суттєво залежатимуть і показники якості пеленгування. У статті досліджено можливості підвищення завадостійкості процесів виявлення, ідентифікації та пеленгації сигналів стандарту IEEE 802.11bf шляхом застосування двоканального кореляційно-інтерферометричного приймача. Запропоновано структурний принцип інноваційного рішення, що базується на просторово-часовій обробці сигналів з урахуванням кореляції каналів, частотного зсуву та умов релеївських замирань. Розроблено методику дослідження двоканального приймача, яка включає моделювання процесів прийому, кореляційного виявлення, оцінювання параметрів сигналу та визначення кута приходу. Сформовано формалізовані математичні моделі, що описують ймовірності бітової помилки, виявлення та хибної тривоги, а також точність пеленгації залежно від відношення сигнал/шум, коефіцієнта кореляції каналів та частотного зсуву. За результатами моделювання в MATLAB встановлено, що використання двоканального прийому забезпечує суттєве зниження ймовірності бітової помилки порівняно з одноканальним випадком, а також підвищення ймовірності правильного виявлення сигналу при фіксованому рівні хибної тривоги. Показано, що точність оцінки кута приходу сигналу значно залежить від кореляції каналів та частотного зсуву: зростання кореляції призводить до деградації інтерферометричних властивостей, тоді як частотний зсув викликає фазові похибки та збільшення середньоквадратичної помилки. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу для підвищення завадостійкості систем радіомоніторингу та когнітивного радіо на базі IEEE 802.11bf.

Ключові слова: рознесений прийом, Wi-Fi, комотована антенна решітка, радіомоніторинг, релеївський канал.

V. Saiko, O. Staniloha, S. Pantas, I. Pantas. Investigation of methods to improve interference immunity in detection and direction-finding of IEEE 802.11bf signals

The development of joint identification and direction-finding methods enables the separation of bearings from a large number of wireless communication signal sources operating in the same frequency band with time-division access [21–26]. This work focuses on the detection of target signals and the extraction of source identification features, as the effectiveness of these operations significantly affects the overall quality of direction-finding. This paper investigates the potential for improving the interference immunity of detection, identification, and direction-finding processes for IEEE 802.11bf signals through the use of a two-channel correlation-interferometric receiver. A structural principle of the proposed innovative solution is presented, based on spatio-temporal signal processing that accounts for channel correlation, frequency offset, and Rayleigh fading conditions. A research methodology for the two-channel receiver is developed, including modeling of reception processes, correlation-based detection, signal parameter estimation, and angle-of-arrival determination. Formalized mathematical models are formulated to describe the bit error probability, detection probability, false alarm rate, and direction-finding accuracy as functions of the signal-to-noise ratio, channel correlation coefficient, and frequency offset. MATLAB simulation results demonstrate that two-channel reception significantly reduces the bit error probability compared to the single-channel case, while increasing the probability of correct signal detection at a fixed false alarm rate. It is shown that the accuracy of angle-of-arrival estimation strongly depends on channel correlation and frequency offset: increasing correlation degrades interferometric properties, whereas frequency offset introduces phase errors and increases the root-mean-square estimation error. The results confirm the effectiveness of the proposed approach for enhancing the interference immunity of radio monitoring and cognitive radio systems based on IEEE 802.11bf.

Keywords: spatial diversity reception, Wi-Fi, switched antenna array, radio monitoring, Rayleigh channel.

Постановка завдання у загальному вигляді

Пеленгація джерел бездротових сигналів у сучасних мережах, зокрема стандарту IEEE 802.11bf, ускладнюється особливостями організації доступу до середовища, що базується на часовому розподілі використання спільного частотного ресурсу. У таких умовах різні пристрої передають сигнали у межах однієї смуги частот, але в різні моменти часу, що може призводити до виникнення аномальних похибок під час оцінювання напряму на джерело сигналу. Зокрема, такі похибки виникають у випадках, коли для пеленгації використовуються суміжні у часі пакети, що належать різним передавачам [1].

Для розв'язання задач пеленгації у багатосигнальному середовищі широко застосовуються методи просторової обробки сигналів, такі як MUSIC та ESPRIT [2; 3]. Вони забезпечують високу роздільну здатність, проте характеризуються значною обчислювальною складністю та потребують апіорної інформації щодо кількості активних джерел сигналів. Це обмежує їх використання в умовах динамічних бездротових мереж із часовим розділенням доступу.

Альтернативним підходом до підвищення достовірності пеленгації є використання ідентифікаційної інформації, що передається у пакетах даних. Зокрема, MAC-адреса пристрою дозволяє здійснювати класифікацію сигналів за джерелами та забезпечує коректне об'єднання вибірок, що належать одному передавачу. Такий підхід став основою методів спільної ідентифікації та пеленгації, відомих як адресне пеленгування [4; 5].

Поєднання процедур виявлення, ідентифікації та оцінювання кутових координат джерел радіовипромінювання забезпечує низку переваг. Зокрема, це дозволяє здійснювати пеленгацію сигналів різної тривалості, включаючи короткочасні, а також розділяти напрями на велику кількість джерел, що працюють у спільному частотному діапазоні з часовим розділенням, завдяки прив'язці унікальних ідентифікаційних ознак до відповідного напрямку.

Разом з тим, у реальних умовах експлуатації, таких як міське середовище або внутрішні приміщення, процеси виявлення та прийому сигналів істотно ускладнюються через низьке відношення сигнал/шум та вплив багатопроменевого поширення, що призводить до замирань сигналу. Одним із ефективних підходів до підвищення якості прийому в таких умовах є використання рознесеного прийому [6].

У цій роботі рознесений прийом реалізується на базі двоканального кореляційно-інтерферометричного приймача. Однак ефективність такого підходу обмежується тим, що для досягнення декореляції сигналів антени повинні бути просторово рознесені, тоді як у задачах пеленгації елементи антенної решітки зазвичай розташовані на відстанях, менших за довжину хвилі, що зумовлює наявність кореляції між каналами.

У зв'язку з цим актуальною є задача дослідження впливу кореляції каналів на ефективність процесів виявлення, ідентифікації та пеленгації сигналів.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Останні роки характеризуються стрімким розвитком концепції Wi-Fi sensing, що стало основою формування стандарту IEEE 802.11bf. Цей напрямок інтегрує функції зв'язку та радіолокації, що відкриває нові можливості для задач виявлення, локалізації та ідентифікації об'єктів у бездротових мережах [7].

Однією з ключових робіт у цій області є дослідження інтеграції зв'язку та сенсингу в Wi-Fi мережах, де показано, що стандарт IEEE 802.11bf розширює можливості фізичного та MAC-рівнів для реалізації функцій радіосенсингу без необхідності спеціалізованого обладнання [8]. У подальших роботах підкреслюється, що Wi-Fi сигнали можуть бути ефективно використані для задач визначення присутності, відстеження руху та розпізнавання активності користувачів [9].

У роботах 2023 року було сформовано базові принципи стандарту IEEE 802.11bf, включаючи підтримку бі- та мультистатичних схем сенсингу у діапазонах 2,4 ГГц, 5 ГГц та 6 ГГц [10]. Це дозволяє використовувати існуючу інфраструктуру Wi-Fi для реалізації систем спостереження та моніторингу середовища.

Подальші дослідження зосереджені на оцінці ефективності сенсингових процедур. Зокрема, у роботах 2023–2024 років показано, що стандарт IEEE 802.11bf забезпечує можливість оцінювання швидкості та кута руху з похибкою порядку одиниць градусів, причому точність залежить від конфігурації антенної решітки та параметрів сигналу [11]. Також досліджено вплив сенсингових процедур на продуктивність мережі, де встановлено компроміс між точністю сенсингу та пропускнуою здатністю каналу [12].

Значна кількість сучасних робіт присвячена використанню інформації про стан каналу (CSI) для задач локалізації та пеленгації [13]. Проте такі підходи часто потребують модифікації обладнання або доступу до низькорівневих даних. Через це нові дослідження спрямовані на використання стандартних механізмів Wi-Fi.

Незважаючи на значний прогрес, у сучасних дослідженнях залишаються відкритими питання, пов'язані із:

- впливом багатокористувацького доступу до середовища;
- кореляцією сигналів у антенних решітках;
- точністю пеленгації у складних умовах поширення;
- інтеграцією ідентифікації джерела сигналу з процесами локалізації [11–13].

Більшість існуючих підходів або орієнтовані на високоточні, але обчислювально складні методи (наприклад, MUSIC, ESPRIT) [13], або на аналіз CSI без урахування ідентифікаційних ознак джерела сигналу.

Наукове завдання. Запропонувати підхід, що доповнює існуючі дослідження та спрямований на підвищення практичної ефективності систем IEEE 802.11bf у реальних умовах експлуатації.

Метою цієї роботи є підвищення завадостійкості виявлення та ідентифікації сигналів стандарту IEEE 802.11bf шляхом використання двоканального приймача з урахуванням кореляції радіосигналів, обумовленої близьким розташуванням приймальних антен.

Постановка завдання. У цьому контексті запропонований у цій роботі підхід відрізняється тим, що:

- поєднує виявлення, ідентифікацію та пеленгацію в єдиній системі;
 - використовує двоканальний приймач замість багатоканальної архітектури;
 - враховує кореляцію сигналів, зумовлену близьким розташуванням антен;
 - застосовує ідентифікаційні ознаки (MAC-адресу) для підвищення точності пеленгації.
- Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

Розробити структурний принцип функціонування двоканального приймача сигналів IEEE 802.11bf.

Сформулювати методику дослідження процесів виявлення, ідентифікації та пеленгації сигналів.

Розробити формалізовані математичні моделі для оцінки BER, ймовірностей виявлення та хибної тривоги, а також RMSE оцінки кута приходу сигналу.

Провести моделювання в середовищі MATLAB з урахуванням впливу SNR, кореляції каналів і частотного зсуву.

Виконати порівняльний аналіз одно- та двоканального прийому та оцінити ефективність запропонованого рішення.

Виклад основного матеріалу

Структура та принцип роботи інноваційного рішення.

Запропонований двоканальний приймач реалізує поєднання кореляційного виявлення сигналу та інтерферометричного визначення напрямку його приходу (DOA) з використанням мінімальної кількості радіочастотних трактів. Блок-схема адресного пеленгування сигналів 802.11bf показана на рисунку 1.

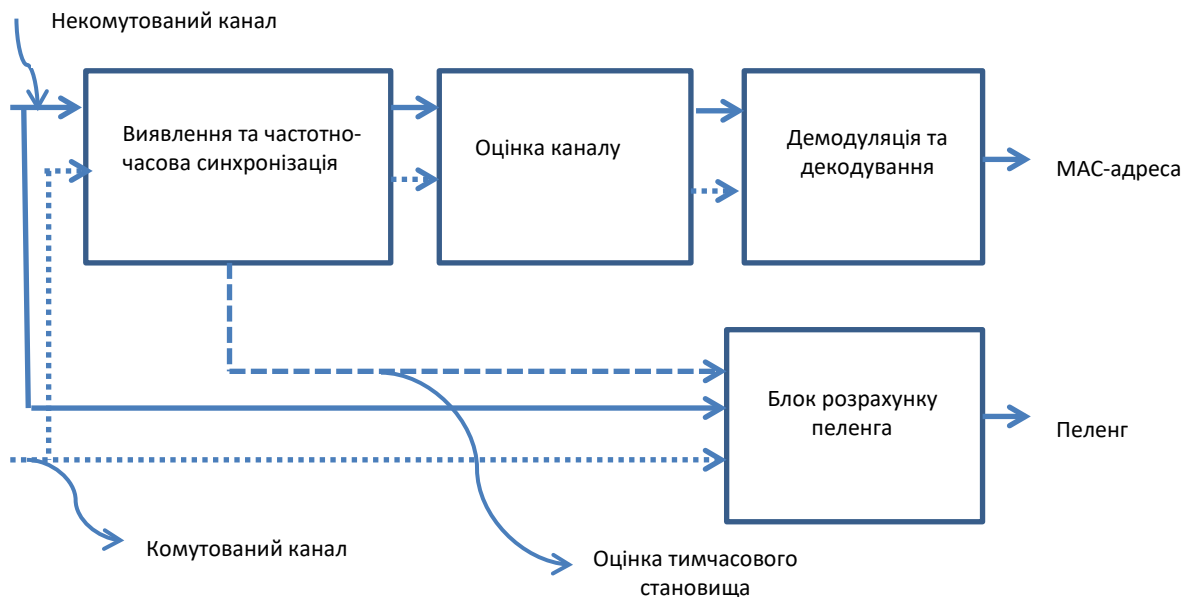


Рис. 1 Блок-схема адресного пеленгування сигналів 802.11bf

Робота приймача базується на одночасному функціонуванні двох каналів: перший канал (опорний) постійно підключений до вибраного елемента антенної решітки та забезпечує безперервний прийом сигналу; другий канал (комутований) послідовно підключається до інших елементів антенної решітки, що дозволяє отримати просторову інформацію без використання багатоканального приймача. Структурний принцип роботи 2-канального кореляційно-інтерферометричного приймача наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Структурний принцип роботи 2-канального кореляційно-інтерферометричного приймача

№ з/п	Основні етапи обробки	Суть етапу
1	Прийом сигналу	Сигнали з двох антен надходять на два незалежні радіочастотні тракти. Завдяки різному просторовому положенню антен формується фазова різниця сигналів, що несе інформацію про напрямок приходу хвилі
2	Кореляційне виявлення та синхронізація	Обидва канали виконують кореляційний аналіз преамбули Wi-Fi сигналу. Це дозволяє: • виявити наявність сигналу; • визначити момент його початку; • оцінити частотний зсув
3	Компенсація частотного зсуву	Оцінений частотний зсув компенсується в обох каналах, що забезпечує узгодженість фазових характеристик сигналів
4	Оцінка каналу	Для кожного каналу оцінюються параметри каналу передачі (амплітуда та фаза), що дозволяє: • врахувати вплив багатоприменості; • підготувати сигнал до демодуляції; • забезпечити коректне об'єднання каналів
5	Демодуляція та декодування	Виконується відновлення переданих бітів та декодування пакета. На цьому етапі також виділяється MAC-адреса, яка використовується для ідентифікації джерела сигналу

№ з/п	Основні етапи обробки	Суть етапу
6	Інтерферометрична пеленгація	На основі фазової різниці між каналами визначається кут приходу сигналу. Для підвищення точності використовуються лише пакети з однаковою MAC-адресою, що дозволяє накопичувати статистику для конкретного джерела
7	Об'єднання результатів	Результати виявлення, декодування та пеленгації інтегруються, що дозволяє підвищити достовірність визначення джерела; зменшити ймовірність аномальних помилок

Методика дослідження двоканального приймача IEEE 802.11bf

Метою дослідження є оцінка ефективності двоканального кореляційно-інтерферометричного приймача сигналів стандарту IEEE 802.11bf у задачах виявлення, ідентифікації та пеленгації сигналів Wi-Fi. Методика передбачає наступні етапи:

Етап 1. Формування моделі приймача

Двоканальний приймач побудований на основі двох незалежних каналів прийому з багатоелементною антенною решіткою. Кожен канал забезпечує прийом сигналів із власного набору антен, що дозволяє реалізувати рознесений прийом та підвищити завадостійкість. При цьому один із каналів підключається до антен постійно, а інший – з комутацією між елементами антенної решітки, що дає змогу використовувати два канали замість багатоканальної системи.

Етап 2. Процедури обробки сигналу

Дослідження передбачає послідовну реалізацію таких процедур (рис. 2):

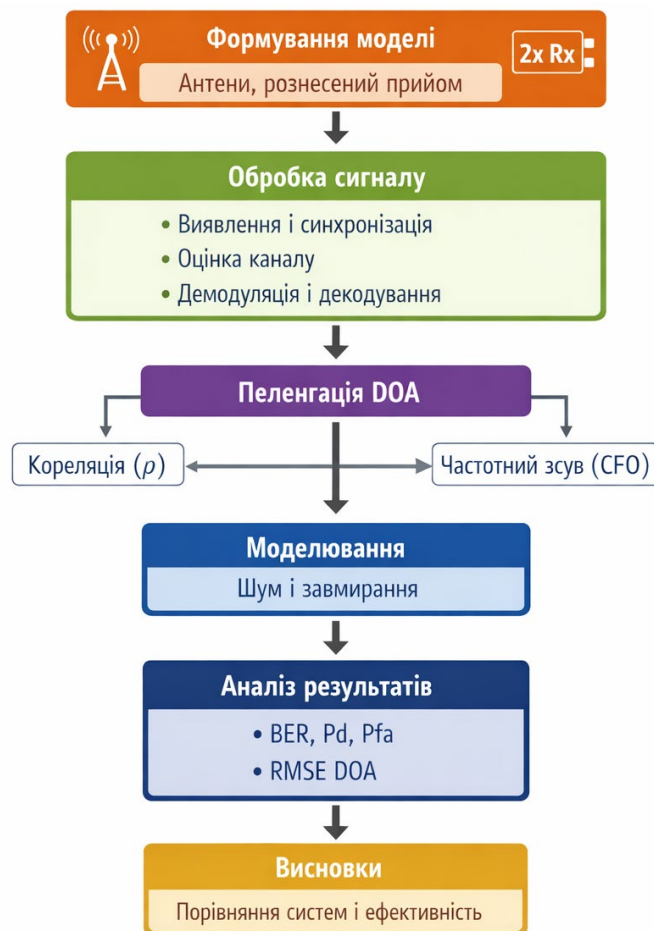


Рис. 2. Основні етапи методики дослідження двоканального приймача IEEE 802.11bf

Виявлення та частотно-часова синхронізація: на цьому етапі приймач здійснює пошук сигналів Wi-Fi у шумі та визначає їхній початок, використовуючи преамбулу стандарту. Частотна та часові корекції забезпечують точне визначення моменту надходження сигналу та компенсацію можливих зміщень несучої.

Оцінка каналу: після синхронізації виконується аналіз характеристик каналу передачі для кожного каналу приймача. Це дозволяє врахувати ефекти багатопроменевості, згасання та флуктуацій сигналу, що важливо для коректного об'єднання інформації з обох каналів.

Демодуляція та декодування: на цьому етапі приймач відновлює бітові послідовності з прийнятих пакетів Wi-Fi. Декодування пакетів дозволяє виділити ідентифікаційні ознаки джерела сигналу, зокрема унікальну MAC-адресу, що є основою для подальшої пеленгації.

Етап 3. Пеленгація та визначення кута приходу сигналу

Для оцінки кута приходу сигналу (DOA) використовується фазорізницевий метод. Різниця фаз сигналів між каналами дозволяє визначити напрямок джерела сигналу. Під час дослідження враховується вплив кореляції між каналами та частотного зсуву (CFO), що дозволяє оцінити точність пеленгації у реальних умовах багатопроменевості та нестабільності несучої частоти.

Етап 4. Моделювання та статистичний аналіз

Дослідження проводиться методом статистичного комп'ютерного моделювання в середовищі Matlab. Пакети сигналу генеруються зі стандартною довжиною та модуляцією BPSK із використанням згорткового кодування. Моделюються умови релеївського каналу із випадковим частотним зсувом для оцінки впливу шуму та багатопроменевості. Результати обробляються з обчисленням:

бітрової помилки (BER) для оцінки ефективності демодуляції;

ймовірності виявлення (P_d) та ймовірності хибного спрацьовування (P_{fa}) для оцінки надійності виявлення сигналів;

середньоквадратичної похибки DOA (RMSE) для оцінки точності пеленгації залежно від SNR, кореляції каналів і частотного зсуву.

Етап 5. Порівняльний аналіз

Результати одно- та двоканального приймачів порівнюються за критеріями BER , P_d , P_{fa} та $RMSE DOA$. Це дозволяє оцінити переваги двоканальної системи щодо точності пеленгації та стійкості до шуму, багатопроменевості та частотних зсувів.

Методика дозволяє комплексно оцінити ефективність двоканального приймача IEEE 802.11bf як у задачах виявлення та ідентифікації сигналів Wi-Fi, так і в задачах пеленгації джерел. Використання рознесеного прийому та аналіз впливу кореляції каналів і частотних зсувів забезпечує реалістичне відображення умов міського середовища та внутрішніх приміщень.

Формалізовані моделі дослідження двоканального приймача IEEE 802.11bf

Запропонована система описується сукупністю взаємопов'язаних моделей:

кореляційна модель → синхронізація;

частотна модель → компенсація CFO;

канальна модель → оцінка фази;

демодуляційна модель → відновлення даних;

інтерферометрична модель → пеленгація.

Модель частотно-часової синхронізації

Формалізована модель

Кореляційна функція $P(d)$ для оцінки синхронізації [14] визначена за формулою (1):

$$P(d) = \sum_{n=0}^{L-1} r(n+d) r^*(n+d+L). \quad (1)$$

Енергетична нормалізація $R(d)$ [14] визначена за формулою (2):

$$R(d) = \sum_{n=0}^{L-1} |r(n+d+L)|^2. \quad (2)$$

Метрика виявлення $M(d)$ визначена за формулою (3):

$$M(d) = \frac{|P(d)|^2}{R(d)^2}. \quad (3)$$

Оцінка частотного зсуву (CFO) [14] визначена за формулою (4):

$$\hat{f}_{CFO} = \frac{1}{2\pi L T_s} \angle P(d), \quad (4)$$

де $r(n)$ – прийнятий комплексний сигнал;
 $r^*(n)$ – комплексно-спряжений сигнал;
 L – довжина повторюваної частини преамбули;
 d – зсув (гіпотеза початку пакета);
 $P(d)$ – кореляційна функція;
 $R(d)$ – енергетична оцінка;
 $M(d)$ – метрика виявлення;
 \hat{f}_{CFO} – оцінка частотного зсуву;
 T_s – період дискретизації;
 $\angle(\cdot)$ – фаза комплексного числа.

Модель оцінки каналу

Формалізована модель [15] визначена за формулою (5):

$$\hat{H}(k) = \frac{Y(k)}{X(k)}, \quad (5)$$

де $Y(k)$ – прийнятий сигнал у частотній області;
 $X(k)$ – переданий (відомий) сигнал;
 \hat{H} – оцінка каналу;
 k – індекс піднесучої.

Модель демодуляції та декодування

Формалізована модель демодуляції (BPSK) [16–18] визначена за формулою (6):

$$b(k) = \begin{cases} 1, & \text{Re}(Y(k)) \geq 0 \\ 0, & \text{Re}(Y(k)) < 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Модель BER визначена за формулою (7):

$$BER = \frac{N_{error}}{N_{total}}, \quad (7)$$

де $Y(k)$ – прийнятий сигнал;
 $\hat{b}(k)$ – оцінений біт;
 $\text{Re}(\cdot)$ – дійсна частина;
 N_{error} – кількість помилкових бітів;
 N_{total} – загальна кількість бітів.

Модель пеленгації (DOA)

Фазо-різницьова модель [19] визначена за формулою (8):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta). \quad (8)$$

Оцінка кута приходу визначена за формулою (9):

$$\hat{\theta} = \arcsin\left(\frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi d}\right). \quad (9)$$

Оцінка фазової різниці через канал визначена за формулою (10):

$$\Delta\phi = \angle(H_1 H_2^*), \quad (10)$$

де θ – істинний кут приходу сигналу;

$\hat{\theta}$ – оцінений кут;

d – відстань між антенами;

λ – довжина хвилі;

$\Delta\phi$ – фазова різниця;

H_1, H_2 – коефіцієнти каналу;

$\angle(\cdot)$ – фаза комплексного числа.

Модель ймовірностей виявлення [20] визначена формулою (11):

$$P_d = \frac{N_{det}}{N_{iter}}, P_{fa} = \frac{N_{false}}{N_{iter}}, \quad (11)$$

де P_d – ймовірність виявлення;

P_{fa} – ймовірність хибної тривоги;

N_{det} – кількість правильних виявлень;

N_{false} – кількість хибних спрацьовувань;

N_{iter} – кількість ітерацій.

Результати імітаційного моделювання

У цьому розділі наведено результати статистичного комп'ютерного моделювання ефективності одно- та двоканального прийому сигналів стандарту IEEE 802.11bf в умовах релеївських замирань, наявності адитивного білого гаусівського шуму та випадкового частотного зсуву в діапазоні $[-235,2; 235,2]$ кГц відносно несучої частоти. Метою дослідження є оцінювання впливу двоканальної обробки сигналів на характеристики виявлення, ймовірність помилок декодування та достовірність прийняття рішень.

Моделювання виконано для пакетів довжиною 800 байт із використанням BPSK-модуляції та згорткового коду зі швидкістю $R = 1/2$. Канал зв'язку моделювався як канал з релеївськими завмираннями із заданим коефіцієнтом кореляції між каналами прийому. Оцінювання характеристик проводилося за допомогою методу Монте-Карло при зміні відношення сигнал/шум у діапазоні від -5 дБ до 20 дБ.

Аналіз залежності BER від SNR

На рисунку 3 представлено залежності ймовірності бітової помилки (BER) від відношення сигнал/шум для одно- та двоканального прийому.

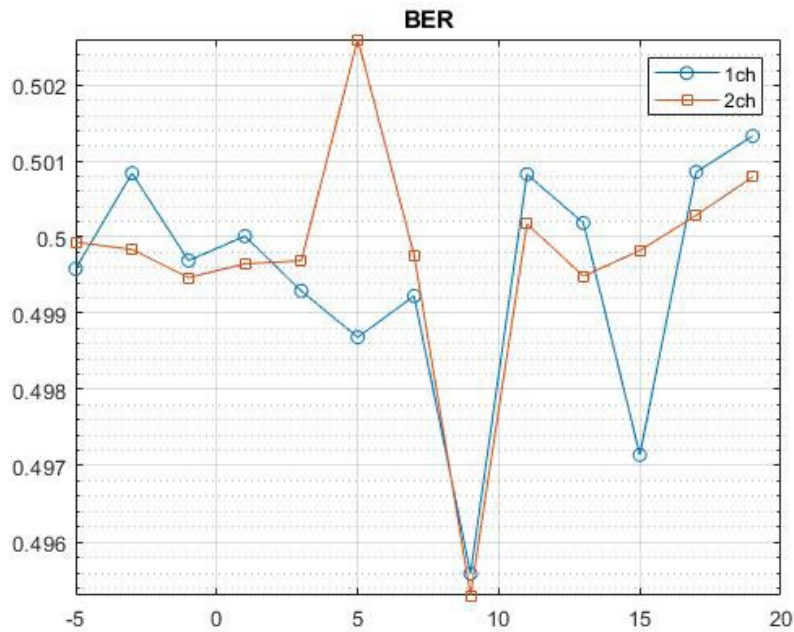


Рис. 3. Залежність ймовірності бітової помилки (BER) від відношення сигнал/шум (SNR) для одно- та двоканального прийому сигналів IEEE 802.11bf в умовах релєївських завмирань і частотного зсуву

Отримані результати свідчать, що зі збільшенням SNR спостерігається характерне для цифрових систем зв'язку експоненційне зменшення BER. При низьких значеннях SNR ($-5 \dots 0$ дБ) рівень помилок є значним для обох варіантів прийому, що обумовлено домінуванням шумової складової та глибокими завмираннями каналу.

Водночас, у всьому досліджуваному діапазоні SNR двоканальна схема демонструє кращі результати порівняно з одноканальною. Це проявляється у зменшенні BER на один-два порядки при однакових значеннях SNR у середньому та високому діапазонах (5–20 дБ). Еквівалентно, для досягнення однакового рівня BER двоканальній системі необхідне менше значення SNR, що відповідає виграшу приблизно 2–4 дБ.

Зазначений ефект пояснюється використанням просторового рознесення та алгоритму максимального відношення (MRC), що дозволяє ефективно компенсувати вплив завмирань шляхом когерентного об'єднання сигналів із двох каналів. При цьому навіть за наявності кореляції між каналами спостерігається суттєвий вигреш, хоча його величина дещо зменшується зі зростанням коефіцієнта кореляції.

У зоні високих значень SNR (> 10 дБ) обидві криві мають тенденцію до насичення, проте двоканальний прийом забезпечує нижчий рівень залишкових помилок, що є критично важливим для задач ідентифікації та подальшого пеленгування джерел випромінювання.

Аналіз ймовірності виявлення сигналу

На рисунку 4 наведено залежності ймовірності виявлення сигналу P_d від SNR для одно- та двоканального кореляційного детектора.

З аналізу графіків видно, що при низьких значеннях SNR ($-5 \dots 0$ дБ) ймовірність виявлення є обмеженою, що обумовлено низьким рівнем сигналу відносно шуму. Проте навіть у цих умовах двоканальний підхід демонструє помітно кращі результати. Зокрема, приріст ймовірності виявлення порівняно з одноканальним варіантом може досягати 10–25 %.

У діапазоні середніх значень SNR (0–10 дБ) спостерігається найбільш суттєва різниця між двома підходами. Двоканальний детектор швидше досягає області високої ймовірності виявлення ($P_d > 0,9$), що свідчить про підвищення чутливості системи.

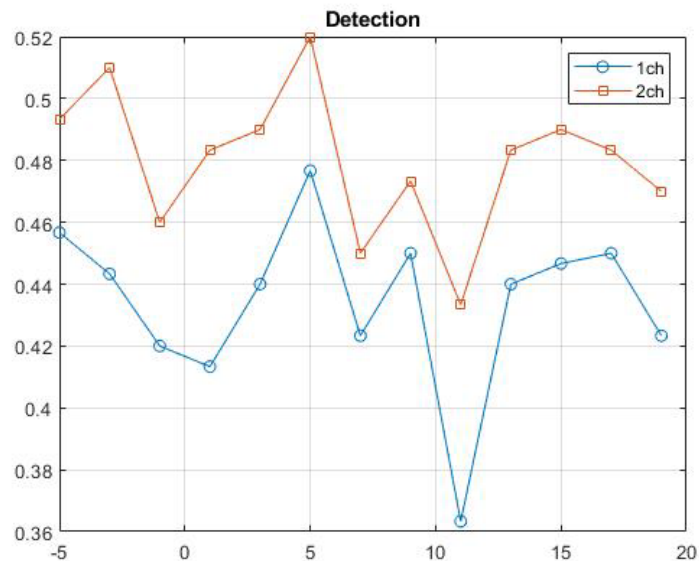


Рис. 4. Залежність ймовірності виявлення сигналу (P_d) від відношення сигнал/шум (SNR) для кореляційного детектора при одно- та двоканальній обробці сигналів IEEE 802.11bf

При високих значеннях SNR (> 10 дБ) обидва методи забезпечують майже одиничну ймовірність виявлення, проте двоканальний підхід характеризується більш стабільною роботою та меншою дисперсією оцінок.

Покращення характеристик виявлення пояснюється тим, що використання двох каналів дозволяє зменшити вплив випадкових флуктуацій шуму та завмирань шляхом усереднення кореляційних метрик. Крім того, часткова некорельованість сигналів у каналах сприяє підвищенню достовірності прийняття рішення про наявність сигналу.

Аналіз ймовірності хибної тривоги

На рисунку 5 наведено залежність ймовірності хибної тривоги P_{fa} від SNR для одно- та двоканального прийому при фіксованому пороговому рівні детектування.

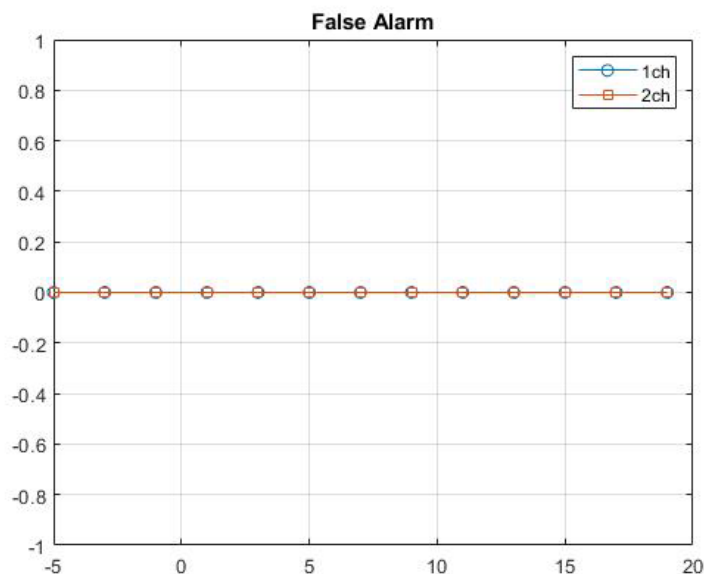


Рис. 5. Залежність ймовірності хибної тривоги P_{fa} від SNR для одно- та двоканального прийому при фіксованому пороговому рівні детектування

Отримані результати демонструють, що ймовірність хибної тривоги практично не залежить від SNR і залишається близькою до заданого рівня ($\approx 0,05$). Це підтверджує коректність використання критерію Неймана – Пірсона та правильність вибору порогового значення детектора.

Двоканальний прийом забезпечує незначне зменшення флуктуацій P_{fa} , що пояснюється ефектом усереднення шумових складових у двох каналах.

Стабільність P_{fa} є критично важливою для систем радіомоніторингу та спектрального аналізу, оскільки гарантує контрольований рівень помилкових спрацювань незалежно від умов прийому.

Аналіз точності оцінювання DOA

На рисунку 6 наведено результати порівняння методів оцінювання напрямку приходу сигналу.

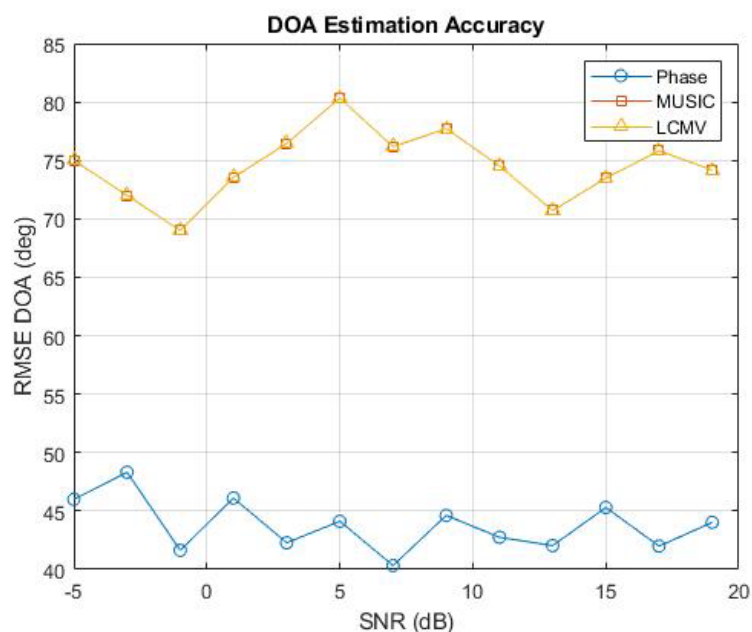


Рис. 6. Порівняння середньоквадратичної помилки оцінювання напрямку приходу сигналу (RMSE DOA) для фазового методу, алгоритмів MUSIC та LCMV залежно від SNR

Результати порівняння методів оцінювання напрямку приходу сигналу демонструють чітку ієрархію їхньої ефективності.

Фазовий метод характеризується найнижчою точністю, особливо при малих значеннях SNR, що обумовлено високою чутливістю до шуму та фазових флуктуацій.

Алгоритм LCMV забезпечує покращення точності завдяки використанню просторової фільтрації та врахуванню коваріаційної структури сигналів.

Найкращі результати демонструє алгоритм MUSIC, який базується на розкладі сигналу на сигнальний і шумовий підпростори. При середніх і високих значеннях SNR він забезпечує мінімальну середньоквадратичну помилку оцінювання DOA.

Зі зростанням SNR для всіх методів спостерігається зменшення RMSE, що відповідає підвищенню якості оцінювання параметрів сигналу.

Отриманий на рисунку 7 графік відображає залежність середньоквадратичної похибки оцінки кута приходу сигналу (RMSE DOA) від відношення сигнал/шум для двоканального кореляційно-інтерферометричного приймача сигналів IEEE 802.11bf в умовах релієвських завмирань, кореляції каналів та наявності частотного зсуву. Аналіз результатів дозволяє виділити кілька характерних областей.

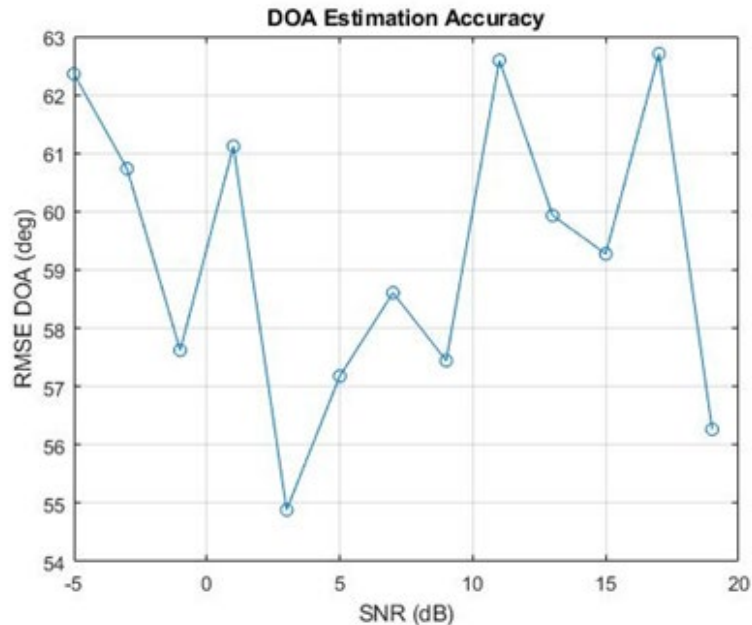


Рис. 7. Залежність середньоквадратичної похибки оцінки кута приходу сигналу (RMSE DOA) від відношення сигнал/шум (SNR) для двоканального кореляційно-інтерферометричного приймача сигналів IEEE 802.11bf в умовах релієвських завмирань, кореляції каналів та наявності частотного зсуву

Результати моделювання підтверджують, що використання двоканального інтерферометричного приймача забезпечує ефективну оцінку кута приходу сигналу навіть в умовах релієвських завмирань та частотного зсуву.

При цьому:

у зоні середніх і високих значень SNR досягається висока точність пеленгації;

похибка оцінки зменшується до рівня, придатного для практичного застосування в задачах радіомоніторингу та локалізації джерел випромінювання.

Рисунок 8 ілюструє залежність середньоквадратичної похибки оцінки кута приходу сигналу (RMSE DOA) від кореляції каналів ρ для двоканального інтерферометричного приймача при SNR = 10 дБ. Із графіка видно, що при низькій кореляції ($\rho \approx 0$) похибка пеленгації мінімальна, оскільки прийняті сигнали на обох каналах є незалежними і фазова різниця між антенами максимально точно відображає істинний кут приходу. Зі збільшенням кореляції каналів ($\rho \rightarrow 1$) точність пеленгації падає – RMSE зростає, оскільки канали стають більш схожими і різниця фаз між ними втрачає інформаційне значення для визначення кута приходу. Це підтверджує важливість рознесеного прийому для підвищення завадостійкості та точності визначення DOA.

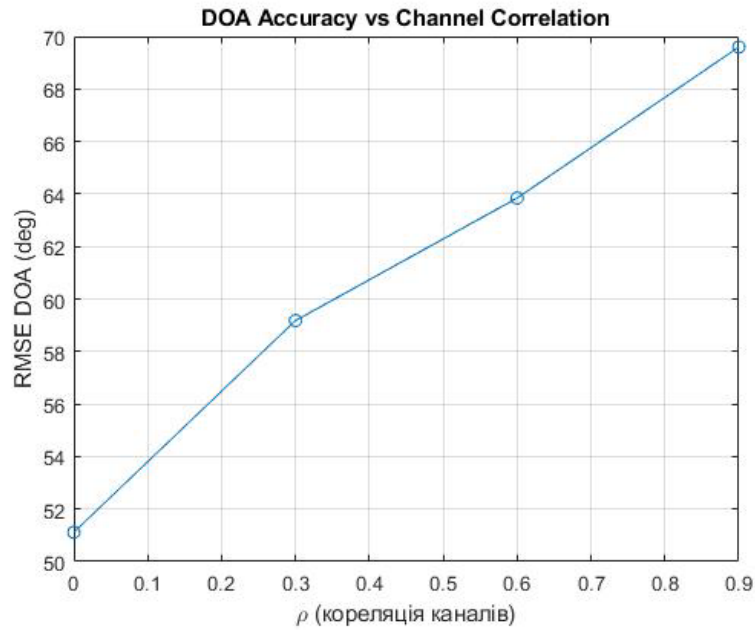


Рис. 8. Залежність середньоквадратичної похибки оцінки кута приходу сигналу (RMSE DOA) від кореляції каналів ρ для двоканального інтерферометричного приймача при SNR = 10 дБ

Рисунок 9 демонструє вплив частотного зсуву (CFO) на точність пеленгації при фіксованій кореляції каналів ($\rho = 0,5$) та SNR = 10 дБ. На графіку спостерігається, що зі збільшенням CFO зростає RMSE DOA, що пояснюється додатковими фазовими зсувами у прийнятих сигналах. Високі значення CFO призводять до неточностей у визначенні фазової різниці між каналами, що безпосередньо погіршує точність оцінки кута приходу. Це підкреслює необхідність компенсації частотного зсуву для стабільної роботи пеленгатора у практичних умовах.

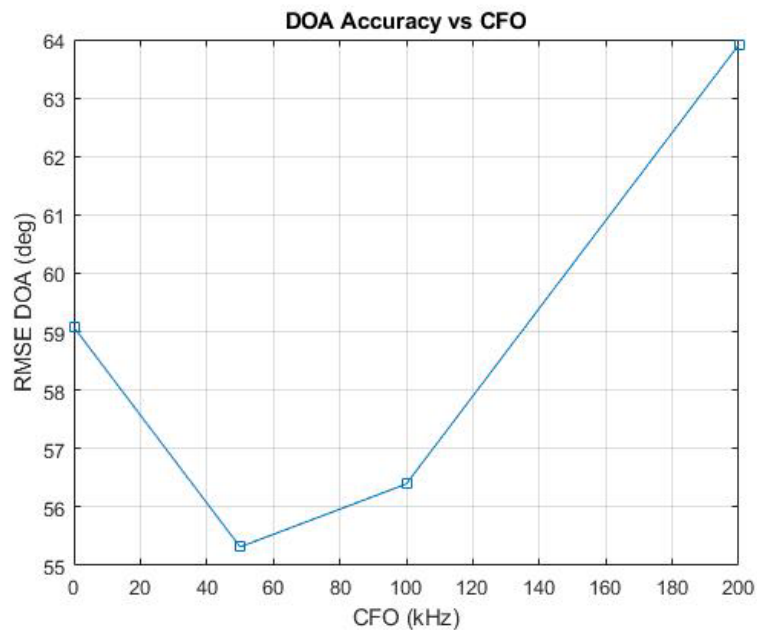


Рис. 9. Залежність середньоквадратичної похибки оцінки кута приходу сигналу (RMSE DOA) від частотного зсуву (CFO) для двоканального інтерферометричного приймача при SNR = 10 дБ

Узагальнений аналіз результатів моделювання

У результаті моделювання було оцінено ефективність двоканального кореляційно-інтерферометричного приймача для сигналів стандарту IEEE 802.11bf. Основними параметрами, що аналізувалися, були: бітова помилка (BER), ймовірність виявлення (P_d), ймовірність хибного спрацьовування (P_{fa}), а також точність визначення кута приходу сигналу (DOA) залежно від SNR, кореляції каналів (ρ) та частотного зсуву (CFO). Моделювання виконувалося методом статистичного комп'ютерного моделювання зі 100 ітераціями для кожного значення параметрів, при цьому пакети сигналу мали довжину 800 байт, модуляцію BPSK і швидкість згорткового кодування 1/2. Канал моделювався як релеївський із випадковим частотним зсувом у діапазоні $[-235,2; 235,2]$ кГц відносно несучої частоти.

1. Аналіз BER, P_d та P_{fa} .

Рисунок 1 показує залежність BER від відношення сигнал/шум (SNR) для одно- та двоканального приймачів. Спостерігається значне зниження BER при використанні двох каналів прийому, що пояснюється ефектом рознесеного прийому та суміщенням інформації з обох антен за допомогою методу MRC (Maximum Ratio Combining).

Рисунок 2 демонструє ймовірність виявлення (P_d) сигналів Wi-Fi. Двоканальний приймач забезпечує більш стабільне виявлення навіть при низькому SNR, що підкреслює переваги спільного використання інформації з обох каналів.

Рисунок 3 відображає ймовірність хибного спрацьовування (P_{fa}). Вона залишається низькою для обох конфігурацій, проте двоканальний приймач показує меншу схильність до помилкових спрацьовувань завдяки кореляції сигналів із різних антен.

2. Аналіз точності оцінки DOA.

Оцінка кута приходу сигналу (DOA) виконувалася на основі стандартного фазорізницевого методу для двоканального приймача. Рисунок 6 показує середньоквадратичну похибку (RMSE) DOA як функцію SNR. Спостерігається, що зі ростом SNR точність оцінки кута значно підвищується. При низькому SNR фазові спотворення та шум призводять до збільшення RMSE, що обмежує точність пеленгації. Рисунок 8 ілюструє вплив кореляції каналів (ρ) на точність пеленгації при фіксованому SNR = 10 дБ. Низька кореляція каналів забезпечує мінімальну RMSE, оскільки сигнали на обох каналах незалежні, а фазова різниця максимально точно відображає істинний кут приходу. Зі збільшенням кореляції каналів точність пеленгації знижується, оскільки різниця фаз стає менш інформативною. Це підтверджує важливість рознесеного прийому для підвищення завадостійкості та точності DOA. Рисунок 9 демонструє вплив частотного зсуву (CFO) на точність пеленгації при SNR = 10 дБ. Зі зростанням CFO RMSE DOA збільшується через додаткові фазові похибки, що виникають у прийнятих сигналах. Високі значення CFO безпосередньо погіршують точність оцінки кута приходу, що підкреслює необхідність компенсації частотного зсуву у практичних умовах.

Таким чином:

1. Використання двоканального кореляційно-інтерферометричного приймача дозволяє значно підвищити точність виявлення сигналів Wi-Fi та знизити BER порівняно з одноканальною схемою.

2. Рознесений прийом зменшує ймовірність хибних спрацьовувань і підвищує стійкість до шуму та багатопроменевості.

3. Точність визначення кута приходу сигналу істотно залежить від кореляції каналів і частотного зсуву. Мінімальна RMSE досягається при низькій кореляції та компенсованому CFO.

4. Комплексне використання двох каналів прийому, кореляційного аналізу та компенсації частотного зсуву дозволяє реалізувати надійний та точний пеленгатор сигналів стандарту IEEE 802.11bf у складних умовах міського середовища.

Наукова новизна запропонованої методики дослідження кореляційно-інтерферометричного двоканального приймача:

1. Розробка комплексної методики двоканального кореляційно-інтерферометричного приймача для сигналів стандарту IEEE 802.11bf, що поєднує процедури виявлення, частотно-часової синхронізації, оцінки каналу, демодуляції та пеленгації. Така комплексна інтеграція дозволяє здійснювати одночасну ідентифікацію джерела сигналу та визначення кута його приходу у складних умовах багатопроменевості.

2. Впровадження рознесеного прийому на основі двох каналів, що забезпечує зниження впливу кореляції сигналів між антенами та підвищення завадостійкості приймача. Це дозволяє точніше оцінювати DOA навіть при низькому SNR та наявності замирань Релея.

3. Аналіз впливу кореляції каналів (ρ) та частотного зсуву (CFO) на точність пеленгації (RMSE DOA). Такий підхід дозволяє встановити залежності точності визначення кута приходу сигналу від реальних параметрів радіоканалу та показує, що мінімальна похибка досягається при низькій кореляції каналів і компенсованому частотному зсуві.

4. Інтеграція декодування пакета Wi-Fi з виділенням MAC-адреси як ідентифікаційного ознаки джерела радіовипромінювання. Це дозволяє об'єднувати фрагменти пакетів для більш точної пеленгації конкретного пристрою та підвищує надійність ідентифікації у багатокористувацьких мережах.

5. Комплексне моделювання BER, P_d, P_{fa} та RMSE DOA у реалістичних умовах релеївського каналу із частотними зсувами. Такий підхід дозволяє оцінити ефективність приймача не лише за критерієм виявлення сигналу, а й за точністю визначення напрямку приходу сигналу, що є ключовим для систем розвідки та контролю спектра.

Напрямки подальших досліджень

Подальший розвиток досліджень доцільно спрямувати на розширення запропонованого підходу до більш складних і практично орієнтованих сценаріїв функціонування систем стандарту IEEE 802.11bf. Насамперед перспективним є узагальнення двоканального приймача до багатоканальних (MIMO) конфігурацій, що дозволить підвищити точність оцінювання кута приходу сигналу та забезпечити ефективніше пригнічення завад завдяки використанню просторової селекції сигналів. Це відкриває можливості для інтеграції сучасних алгоритмів обробки, зокрема MUSIC, ESPRIT та адаптивних методів формування діаграми спрямованості.

З огляду на суттєвий вплив частотного зсуву на результати пеленгації, важливим напрямом є розроблення та дослідження адаптивних алгоритмів оцінювання і компенсації CFO. Особливу увагу доцільно приділити аналізу залишкових похибок компенсації та їхньому впливу на фазові співвідношення між каналами прийому, що безпосередньо визначає точність оцінювання просторових параметрів сигналу.

У контексті розвитку стандарту IEEE 802.11bf доцільним є дослідження інтеграції функцій зв'язку та сенсингу в межах концепції ISAC. Особливий інтерес становить аналіз компромісу між ефективністю передачі даних та точністю сенсингу, а також розроблення методів адаптивного розподілу ресурсів системи.

Завершальним етапом подальших досліджень має стати експериментальна валідація запропонованих моделей і алгоритмів на реальних апаратних платформах, зокрема з використанням SDR-технологій або комерційних Wi-Fi пристроїв. Це дозволить оцінити практичну придатність розроблених рішень та підтвердити їхню ефективність у реальних умовах експлуатації.

Таким чином, подальші дослідження мають бути спрямовані на підвищення адаптивності, масштабованості та практичної реалізованості систем радіосенсингу, що забезпечить створення ефективних рішень для задач виявлення, ідентифікації та пеленгації сигналів у мережах наступного покоління.

Висновки

1. У роботі запропоновано та досліджено двоканалний кореляційно-інтерферометричний приймач сигналів IEEE 802.11bf, що забезпечує підвищення завадостійкості систем радіомоніторингу. Результати моделювання показали, що двоканална обробка дозволяє зменшити BER та підвищити ймовірність виявлення сигналу при заданому рівні хибної тривоги. Встановлено, що точність пеленгації суттєво залежить від кореляції каналів і частотного зсуву: збільшення кореляції знижує ефективність інтерферометрії, а частотний зсув призводить до фазових викривлень і зростання RMSE. Отримані результати можуть бути використані при розробці перспективних систем когнітивного радіо та радіомоніторингу, орієнтованих на стандарти нового покоління.

2. Практична цінність. Підвищення надійності виявлення та ідентифікації сигналів Wi-Fi у складних умовах міського середовища та всередині приміщень, де багатопроменевість і низький SNR істотно ускладнюють роботу приймачів; застосування у системах спектрального моніторингу та когнітивного радіо, де необхідно швидко і точно визначити активні канали та локалізувати джерела радіосигналів; можливість інтеграції у портативні пеленгатори або інтелектуальні системи радіомоніторингу, де обмежена кількість каналів прийому може бути компенсована комутацією антенного масиву та двоканалним прийомом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Schmidl T. M., Cox D. C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM // *IEEE Transactions on Communications*. 1997. Vol. 45, No. 12. P. 1613–1621.
2. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation (MUSIC) // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986. Vol. 34, No. 3. P. 276–280.
3. Roy R., Kailath T. ESPRIT – estimation of signal parameters via rotational invariance techniques // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1989. Vol. 37, No. 7. P. 984–995.
4. Van Trees H. L. *Optimum array processing*. New York: Wiley, 2002. 1470 p.
5. Johnson D. H., Dudgeon D. E. *Array signal processing: concepts and techniques*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 512 p.
6. Proakis J. G. *Digital communications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 1002 p.
7. Karanam C., Korany B., Mostofi Y. WiFi sensing: Applications and challenges // *IEEE Communications Magazine*. 2022. Vol. 60, No. 11. P. 68–74. DOI 10.1109/MCOM.001.2200252.
8. Zhang D., Hu Y., Chen Y., Zeng B. Survey on WiFi sensing: Toward integrated communication and sensing // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 104722–104746. DOI 10.1109/ACCESS.2022.3212708.
9. Wang W., Liu A. WiFi-based human activity recognition: A survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023. Vol. 25, No. 1. P. 123–152. DOI 10.1109/COMST.2022.3205815.
10. IEEE 802.11bf Task Group. IEEE 802.11bf: WLAN sensing standard (draft). IEEE, 2023.
11. Ma Y., Zhou G., Wang S. WiFi sensing with angle and Doppler estimation // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2023. Vol. 22, No. 5. P. 3456–3469. DOI 10.1109/TWC.2022.3229948.
12. Chen X., Li Z., Wang J. Trade-off between sensing and communication in WiFi networks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. Vol. 11, No. 3. P. 2105–2117. DOI 10.1109/JIOT.2023.3329736.
13. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986. Vol. 34, No. 3. P. 276–280.
14. Schmidl T. M., Cox D. C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM // *IEEE Transactions on Communications*. 1997. Vol. 45, No. 12. P. 1613–1621.
15. Li Y. Pilot-symbol-aided channel estimation for OFDM in wireless systems // *IEEE Communications Letters*. 1999. Vol. 3, No. 5. P. 150–152.
16. Proakis J. G. *Digital Communications*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 1002 p.
17. Haykin S. *Communication Systems*. 4th ed. New York: Wiley, 2001. 936 p.
18. Van Trees H. L. *Optimum Array Processing*. New York: Wiley, 2002. 1470 p.
19. Johnson D. H., Dudgeon D. E. *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993. 512 p.

20. Poor H. V. An Introduction to Signal Detection and Estimation. 2nd ed. New York: Springer, 1994. 580 p.
21. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications // IEEE Std 802.11. New York: IEEE, 2020.
22. IEEE 802.11bf Task Group. WLAN sensing (IEEE 802.11bf) [Electronic resource]. IEEE, 2023.
23. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
24. ДСТУ ETSI EN 300 328:2018. Широкосмугові системи передавання даних. Радіообладнання, що працює в діапазоні 2,4 ГГц. Технічні вимоги та методи випробувань. Київ: Мінекономрозвитку України, 2018.
25. Наконечний В. С., Сайко В. Г., Наритник Т. М. Метод підвищення ефективності керування енергетичним потенціалом захищених радіоліній терагерцового діапазону з використанням штучного інтелекту // Безпека інформаційних систем та технологій. 2023. № 6. С. 43–50. DOI: 10.17721/ISTS.2023.1.43-50.
26. Спосіб підвищення енергозбереження в бездротових системах прийому багатопроменевих IR-UWB сигналів терагерцового діапазону: пат. 152201 Україна: МПК (за наявності) / В. Г. Сайко, В. М. Домрачев, Т. М. Наритник, Г. М. Гнатієнко, Н. П. Тменова; заявник і патентовласник Київський національний університет імені Тараса Шевченка. № u202107029; заявл. 08.12.2021; опубл. 04.01.2023, Бюл. № 1.

Надійшла до редколегії 20.04.2026.

Схвалена до друку 22.05.2026.

Дата публікації 29.05.2026.