

УДК 621.396.96  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/08>

**Бойко Ю.М.**

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>  
Хмельницький національний університет

**Пятін І.С.**

<https://orcid.org/0000-0003-1898-6755>  
Відокремлений структурний підрозділ  
«Хмельницький політехнічний фаховий коледж  
Національного університету «Львівська політехніка»»

**Єрмоєнко О.І.**

<https://orcid.org/0000-0001-5110-3761>  
Хмельницький національний університет

## МЕТОДИКА ВИСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ АБОНЕНТСЬКОГО ДОСТУПУ WI-FI 6/6E НА ОСНОВІ ОЦІНЮВАННЯ ЧАСУ ПРИБУТТЯ СИГНАЛІВ

*Стрімкий розвиток мереж абонентського доступу з підтримкою стандартів Wi-Fi 6/6E (IEEE 802.11ax/az) зумовлює появу нових сервісів, орієнтованих на контекстну обізнаність мережі, зокрема високоточне позиціонування абонентських станцій у приміщеннях та щільно забудованих середовищах. Актуальність роботи полягає у дослідженні методів визначення координат мобільної станції в умовах багатопроменевого поширення сигналів та обмеженого відношення сигнал/шум, характерних для реальних Wi-Fi мереж абонентського доступу.*

*У статті зосереджено увагу на методах позиціонування на основі оцінювання часу прибуття сигналів (Time of Arrival, ToA) з використанням процедур точного вимірювання часу Fine Timing Measurement (FTM) стандарту IEEE 802.11az та алгоритмів надвисокої роздільності. Запропоновано підхід до визначення відстані між мобільною станцією та точками доступу шляхом математичного моделювання багатопроменевого каналу передачі даних і застосування алгоритму Multiple Signal Classification (MUSIC) для оцінювання часових затримок окремих компонент сигналу.*

*У роботі виконано чисельне моделювання процесів оцінювання параметрів каналу та позиціонування мобільної станції в умовах функціонування мереж Wi-Fi 6/6E. Визначення координат здійснювалося на основі трилатерації з використанням оцінених відстаней між мобільною станцією та кількома точками доступу. Проведено аналіз впливу співвідношення сигнал/шум, кількості навчальних полів High Efficiency – Long Training Field (HE-LTF) та конфігурації Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO)-системи на точність визначення відстані та координат.*

*Результати моделювання показують, що застосування алгоритмів надвисокої роздільності у поєднанні з навчальними послідовностями фізичного рівня дозволяє істотно зменшити похибку позиціонування у порівнянні з класичними методами. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу та доцільність його використання у сучасних і перспективних мережах абонентського доступу Wi-Fi для задач внутрішньої навігації, моніторингу присутності користувачів та промислових Internet of Things (IoT)-систем.*

**Ключові слова:** Wi-Fi 6/6E, позиціонування абонента, Time of Arrival, MUSIC, трилатерація, багатопроменевий канал, MIMO.

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток мереж абонентського доступу на основі стандартів IEEE 802.11ax/az/be (Wi-Fi 6/6E/7) [1, 2] супроводжується не лише зростанням пропускної

спроможності та щільності підключень, але і появою принципово нових сервісів, орієнтованих на контекстну обізнаність мережі. Одним із ключових таких сервісів є високоточне позиціонування



абонентських станцій у приміщеннях та щільно забудованих середовищах, де супутникові навігаційні системи є малоефективними або повністю непридатними [3].

У сучасних мережах абонентського доступу Wi-Fi позиціонування розглядається як допоміжна, але критично важлива функція, що безпосередньо впливає на якість обслуговування (Quality of Service – QoS), ефективність радіо-ресурсів, енергоефективність клієнтських пристроїв, а також на реалізацію сервісів безпеки, моніторингу присутності, внутрішньої навігації та промислової автоматизації. Водночас умови функціонування Wi-Fi мереж істотно ускладнюють задачу точного визначення координат абонента через багатопроменеве поширення, змінну радіообстановку, наявність перешкод та обмежені апаратні ресурси абонентських станцій [2].

Традиційні методи Wi-Fi позиціонування, що ґрунтуються на індикаторі рівня прийнятого сигналу (Received Signal Strength Indicator – RSSI) або статичних радіокартах [4], демонструють обмежену точність та низьку стійкість до змін середовища, що є неприйнятним для сучасних сценаріїв абонентського доступу з високою мобільністю користувачів і динамічною топологією мережі. Методи зняття радіовідбитків (fingerprinting) [5], хоча і забезпечують прийнятну точність, потребують трудомісткого етапу калібрування та регулярного оновлення бази даних, що істотно ускладнює їх практичне впровадження в реальних мережах доступу.

Запровадження стандарту IEEE 802.11az відкриває нові можливості для високоточного позиціонування за рахунок використання процедур точного вимірювання часу (FTM), інформації про стан каналу (Channel State Information – CSI), оцінок часу прольоту сигналу (Time-of-Flight – ToF), а також кутових параметрів поширення хвиль (Angle of Arrival/Angle of Departure – AoA/AoD), зокрема у міліметровому діапазоні частот [5]. Проте практична реалізація таких методів у мережах абонентського доступу супроводжується низькою проблем, пов'язаних із завадостійкістю вимірювань, обмеженою кількістю доступних відліків, синхронізацією пристроїв, а також впливом шуму та багатопроменевості на точність оцінювання параметрів каналу.

Таким чином, актуальною науково-практичною проблемою є розробка та дослідження методів Wi-Fi позиціонування, адаптованих до умов мереж абонентського доступу, які поєднують високу точність визначення координат абонент-

ської станції із завадостійкою обробкою сигналів та прийнятною обчислювальною складністю. Особливого значення набуває аналіз методів оцінки часу прибуття сигналів та їх спектральних і надроздільних модифікацій у поєднанні з моделями реального Wi-Fi каналу, що дозволяє підвищити достовірність позиційних оцінок у складних радіоумовах.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

В останнє десятиліття проблема високоточного позиціонування у бездротових мережах Wi-Fi стала предметом інтенсивних наукових досліджень [1, 2]. Це зумовлено широким розповсюдженням Wi-Fi як базової інфраструктури абонентського доступу та зростаючою потребою у реалізації сервісів внутрішньої навігації, моніторингу активності користувачів, відстеження рухомого обладнання, а також автоматизації виробничих і логістичних процесів. Особливої актуальності такі задачі набувають у межах концепцій «розумних» будинків, промислового Інтернету речей (Industrial Internet of Things – IIoT) та кіберфізичних систем [6].

Традиційні методи позиціонування в Wi-Fi мережах ґрунтуються на аналізі індикатора рівня RSSI, часових характеристик сигналу (Time of Arrival /Time Difference of Arrival – ToA/TDoA), а також кутових параметрів – кутів приходу (AoA) та відправлення (AoD) сигналу [7]. Найпростішим з практичної точки зору є RSSI-підхід, який дозволяє оцінювати відстань між вузлами мережі на основі емпіричних моделей загасання. Проте в умовах внутрішніх приміщень його точність суттєво погіршується через багатопроменеве поширення, затінення та випадкові перешкоди, що, як правило, обмежує точність позиціонування рівнем кількох метрів [8].

Значним кроком уперед стало впровадження процедури FTM у стандарті IEEE 802.11mc, яка забезпечує можливість вимірювання часу поширення сигналу між точкою доступу та мобільною станцією. Використання FTM дозволило перейти до більш точних оцінок відстані на основі часу прибуття сигналу (ToF), що особливо важливо для задач локалізації у приміщеннях [3]. Водночас у мережах Wi-Fi 4/5/6, що функціонують переважно у діапазонах нижче 6 ГГц, вплив багатопроменевості залишається одним з ключових джерел похибки таких оцінок [8].

Подальший розвиток стандартів позиціонування пов'язаний із впровадженням IEEE 802.11az, який розширює механізми FTM та вводить підтримку на рівні CSI, а також просторових

параметрів сигналу – AoA та AoD [9]. Поєднання часових і кутових оцінок відкриває можливість суттєвого підвищення точності позиціонування, зокрема у складних багатопроблемних середовищах. Згідно з результатами сучасних досліджень, комбінування ToF та просторових характеристик дозволяє досягати сантиметрової точності визначення координат за умови достатнього відношення сигнал/шум та відповідної конфігурації антенної системи [10]. На рис. 1 схематично поданий сценарій багатопроблемного поширення сигналу та принципу вимірювання ToF у Wi-Fi мережі.

На практиці визначення координат мобільної станції в мережах Wi-Fi базується на вимірюванні часових, просторових та енергетичних параметрів сигналу. Одним із ключових параметрів є час прибуття сигналу (ToA), який безпосередньо пов'язаний з відстанню між передавачем та приймачем. За умови відомої швидкості поширення електромагнітної хвилі  $c$ , відстань може бути оцінена як:

$$d = c \cdot t_{ToA} \quad (1)$$

де  $t_{ToA}$  – виміряний час приходу сигналу.

У багатоточкових конфігураціях (три і більше точок доступу) оцінки відстаней або різниць часу приходу використовуються для подальших геометричних методів визначення положення, зокрема трилатерації або гіперболічної локалізації. Для підвищення точності у сучасних стандартах Wi-Fi додатково використовується інформація про кут прибуття та кут відправлення сигналу, що ілюструється на рис. 1.

Однією з фундаментальних проблем часових методів позиціонування є розділення сигналів, що надходять різними шляхами у багатопроблемному каналі. Класичні кореляційні підходи в таких умовах часто не забезпечують достатньої роздільної

здатності, особливо за низького відношення сигнал/шум. Для подолання цих обмежень застосовуються методи надвисокої роздільності (High Resolution Spectral Estimation – HRSE), серед яких одним із найвідоміших є алгоритм MUSIC [11].

Алгоритм MUSIC базується на спектральному розкладанні кореляційної матриці прийнятого сигналу та дозволяє відокремлювати сигнальні та шумові підпростори. У контексті Wi-Fi позиціонування він може бути адаптований як для оцінювання кутових параметрів (AoA), так і для визначення часу прибуття окремих компонент сигналу (ToA), що робить його особливо привабливим для стандартів IEEE 802.11az.

Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень свідчать, що використання MUSIC у поєднанні з FTM-процедурами дозволяє суттєво зменшити похибку позиціонування – до рівня менше кількох десятків сантиметрів за сприятливих умов прийому та адекватної геометрії антенного масиву [8]. Водночас застосування таких методів супроводжується зростанням обчислювальної складності, оскільки потребує обробки великих обсягів вибірок і виконання власного розкладу матриць, що може ускладнювати реалізацію на ресурсно обмежених мобільних пристроях.

Для реалізації кутових методів позиціонування (AoA/AoD) необхідною умовою є використання антенних решіток та алгоритмів формування променя [12]. Формування променя дозволяє просторово фільтрувати сигнали, що надходять з різних напрямків, і тим самим підвищити роздільну здатність системи в кутовій області.

У стандартах IEEE 802.11az та 802.11ay застосовується гібридне формування променя, яке поєднує аналогову та цифрову обробку сигналів. При цьому сигнали з різних антенних елементів зважуються комплексними коефіцієнтами,

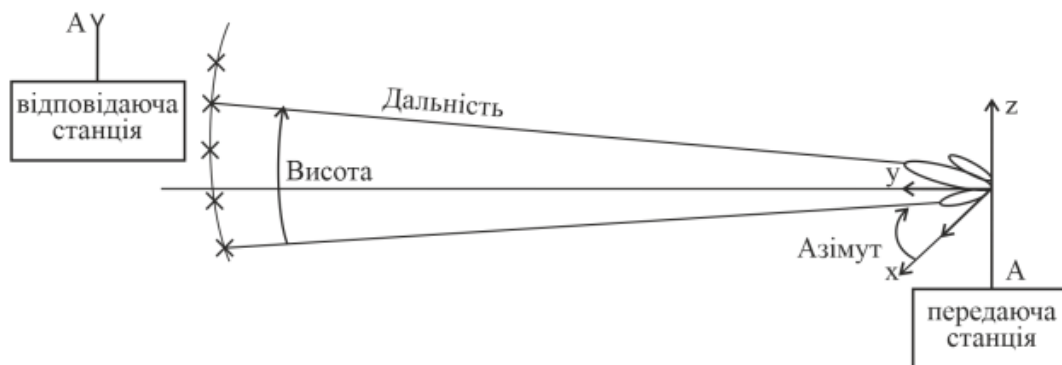


Рис. 1. Ілюстрація багатопроблемного поширення сигналу та принципу вимірювання ToF у Wi-Fi мережі

що дозволяє сформувати спрямований промінь у заданому напрямку. Узагальнено вихідний сигнал антенної решітки може бути представлений у вигляді:

$$y(t) = \mathbf{w}^H \cdot \mathbf{x}(t) \quad (2)$$

де  $\mathbf{x}(t)$  – вектор сигналів з антенних елементів;  $\mathbf{w}^H$  – вектор вагових коефіцієнтів формування променя.

Принцип роботи гібридного формування променя в системах Wi-Fi показано на рис. 2.

Альтернативним напрямом досліджень є методи позиціонування на основі відбитків каналу (fingerprinting), які використовують унікальні характеристики радіоканалу для конкретних просторових точок. У сучасних роботах такі підходи часто поєднуються з методами глибокого навчання, зокрема згортковими (Convolutional Neural Networks – CNN) та рекурентними (Recurrent neural network – RNN) нейронними мережами [9]. Як вхідні ознаки при цьому використовуються CSI, імпульсні відгуки каналу (Channel Impulse Response – CIR) або їх спектральні представлення.

Перевагою методів відбитків каналу є їхня відносна стійкість до багатопроменевості та можливість досягнення прийнятної точності навіть за низького відношення сигнал/шум. Разом із тим, такі підходи вимагають формування об'ємних навчальних баз даних, а також їх регулярного оновлення у разі зміни радіооточення, що ускладнює практичне впровадження у динамічних мережах абонентського доступу [10].

З урахуванням розглянутих методів позиціонування, сучасна система Wi-Fi геопозиціонування може бути подана у вигляді багаторівневої структури, яка включає етапи приймання сигналів, оцінювання параметрів каналу, визначення проміжних навігаційних величин (ToA, AoA, RSSI) та обчислення координат мобільної станції.

У загальному випадку задача позиціонування зводиться до оцінювання вектору координат:

$$\mathbf{p} = [x \quad y \quad z]^T, \quad (3)$$

на основі множини вимірних параметрів сигналу:

$$\theta = \{t_{ToA}, \phi_{AoA}, P_{RSSI}\} \quad (4)$$

В залежності від обраного підходу (пряма або непряма оцінка положення) ці параметри можуть використовуватися безпосередньо або після попередньої обробки.

Узагальнену структуру системи позиціонування в мережах Wi-Fi наведено на рис. 3.

В таблиці 1 ми представляємо систематизовану оцінку та порівняльний аналіз сучасних методів позиціонування.

Аналіз сучасних наукових джерел показує, що найбільш перспективним є комбінування кількох підходів, зокрема FTM-оцінок часу прибуття, алгоритмів надвисокої роздільності та використання каналної інформації CSI. Така інтеграція дозволяє досягти оптимального співвідношення між точністю, завадостійкістю та практичною реалізованістю, особливо в умовах низького відношення сигнал/шум ( $SNR < 10$  дБ) [2].

З урахуванням наведеного, у даній статті основну увагу приділено дослідженню методів оцінювання часу прибуття сигналів у мережах Wi-Fi 6/6E з використанням алгоритмів надвисокої роздільності, орієнтованих на застосування в мережах абонентського доступу.

**Постановка завдання.** У статті буде проведено дослідження та оцінку методів позиціонування мобільної станції у мережах абонентського доступу Wi-Fi на основі визначення часу приходу сигналу. Це буде досягнуто шляхом математичного моделювання багатопроменевого каналу передачі даних та застосування алгоритмів надвисокої роздільності для оцінювання часових затримок сигналів у межах стандарту IEEE 802.11az.

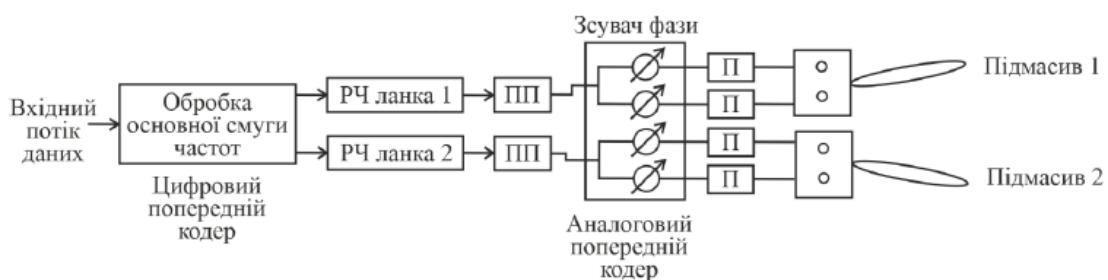


Рис. 2. Структурна схема гібридного формування променя: РЧ – радіочастотне коло; ПП – попередній підсилювач; П – вихідний підсилювач; Підмасив № – підмасив випромінювачів фазованих антенних решіток (ФАР)

Таблиця 1

Систематизована оцінка та порівняльний аналіз сучасних методів позиціонування

Метод	Переваги	Недоліки
RSSI	Простота реалізації	Низька точність у приміщеннях
FTM/ToF (802.11mc/az)	Покращена оцінка відстані	Чутливість до багатопроменевості
MUSIC	Надвисока роздільна здатність	Висока обчислювальна складність
Fingerprinting + DL	Висока практична точність	Потреба у навчальній базі
AoA/AoD	Покращена геометрична точність	Необхідність антенної решітки

Для перевірки ефективності обраного підходу буде реалізовано алгоритм оцінювання часу приходу сигналу з використанням методу MUSIC та виконано визначення координат мобільної станції на основі трилатерації. Буде проведено аналіз точності позиціонування за умов зміни відношення сигнал/шум, кількості навчальних послідовностей та конфігурації антенної системи MIMO. На основі результатів чисельного моделювання буде здійснено оцінку похибок визначення відстані та координат мобільної станції у бездротових мережах Wi-Fi.

**Виклад основного матеріалу.** Оцінювання часу приходу сигналу є одним із ключових методів визначення відстані між мобільною станцією (MS) та точками доступу (AsP) у бездротових мережах (рис. 3). У багатопроменевому середовищі точність таких оцінок значною мірою залежить від можливості розділення окремих компонент сигналу, що надходять із різними затримками. З використанням перетворення Фур'є математична модель каналу у частотній області може бути представлена у вигляді:

$$H(f) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \gamma_k e^{-j2\pi f \tau_k} \quad (5)$$

де  $\gamma_k$  – комплексні коефіцієнти загасання,  $\tau_k$  – затримки багатопроменевих компонент,  $L_p$  – кількість шляхів поширення.

При дискретизації за частотою та з урахуванням шумової складової  $\xi(n)$  з нульовим середнім та дисперсією  $\sigma_w^2$ , модель (5) може бути подана у векторній формі:

$$x_n = H_n + \xi_n \quad (6)$$

На основі отриманих вибірок формується автокореляційна матриця виду:

$$R_x(k) = \sum_{n=0}^{L-1-k} x_n^2 e^{j\frac{2\pi}{L}kn}, \quad (7)$$

спектральне розкладання якої дозволяє застосувати алгоритм MUSIC для оцінювання затримок багатопроменевих сигналів. Знаходження шуканих значень  $\tau_k$  здійснюється шляхом максимізації псевдоспектра:

$$P_{MUSIC}(\tau) = 1 / \mathbf{v}^T(\tau) R_w \mathbf{v}(\tau) \quad (8)$$

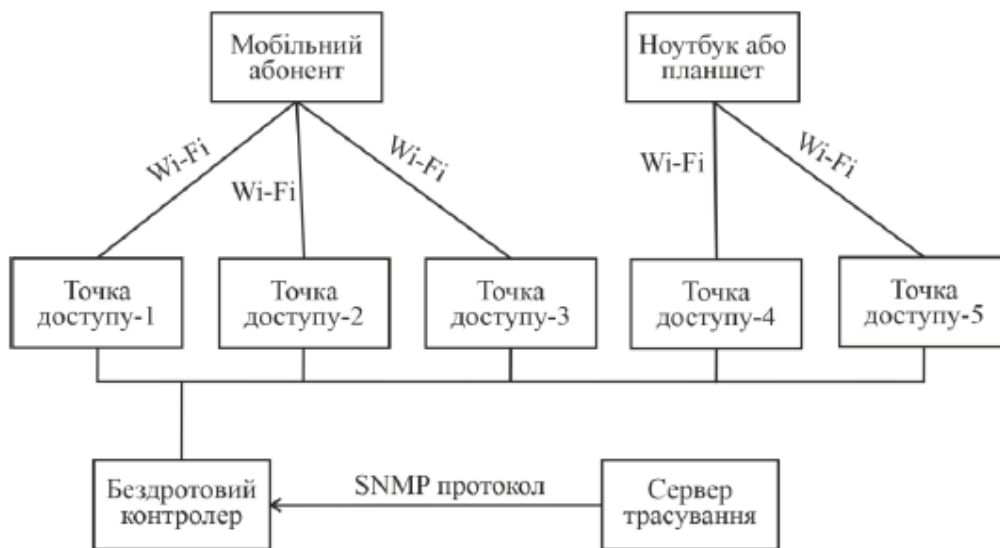


Рис. 3. Узагальнену структуру системи позиціонування в мережі абонентського доступу Wi-Fi: SNMP – Simple Network Management Protocol

де  $R_w$  – кореляційна матриця шумового підпростору,  $\mathbf{v}(\ddot{A})$  – вектор напрямку.

На рис. 4 представлено блок-схему приймача з високою часовою роздільною здатністю для оцінювання часу приходу сигналу.

На рис. 5 представлено структурну схему алгоритму оцінювання часу приходу сигналу з використанням MUSIC.

Рисунки 4 та 5 ілюструють взаємозв'язок між математичною моделлю оцінювання часу прибуття сигналу та її практичною реалізацією. Показано, як теоретичні співвідношення перетворюються на структурні схеми приймача та алгоритм обробки сигналів, зокрема з використанням методу MUSIC. Таким чином, наведені схеми демонструють апаратні та алгоритмічні етапи реалізації запропонованого підходу в мережах абонентського доступу Wi-Fi.

Після оцінювання відстаней між мобільною станцією та точками доступу задача позиціонування зводиться до геометричного визначення координат MS. У роботі використовується метод трилатерації, який передбачає наявність щонайменше трьох точок доступу, розміщених у відомих координатах.

Відстані між MS та відповідними точками доступу описуються рівняннями:

$$d_1^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2, \quad (9)$$

$$d_2^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2, \quad (10)$$

$$d_3^2 = (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2. \quad (11)$$

Після відповідних перетворень система рівнянь приводиться до лінійного вигляду (12), (13),

розв'язання якої дозволяє визначити координати мобільної станції.

$$2x_0(x_1 - x_3)^2 - 2y_0(y_1 - y_3)^2 = d_1^2 - d_3^2 - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (12)$$

$$2x_0(x_2 - x_3)^2 - 2y_0(y_2 - y_3)^2 = d_2^2 - d_3^2 - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \quad (13)$$

Додатково враховується модель втрат сигналу за рівнем:

$$U_d = U_{d_0} - 10n \lg d \quad (14)$$

де  $U_d$  – рівень прийнятого сигналу на відстані  $d$  від передавача, дБ;  $U_{d_0}$  – рівень сигналу на опорній відстані (звичайно  $d_0 = 1$  м), дБ;  $n$  – показник загасання середовища поширення, який залежить від типу середовища та умов розповсюдження сигналу;  $d$  – відстань між передавачем і приймачем, м.

На рис. 6 представлена блок-схема обробки каналу та визначення координат мобільної станції на основі трилатерації.

Для оцінювання ефективності запропонованого підходу було проведено чисельне моделювання каналу передавання даних з урахуванням умов функціонування мереж Wi-Fi 6/Wi-Fi 6E.

Блок-схема на рис. 6 ілюструє послідовність обробки сигналу для визначення координат мобільної станції на основі трилатерації. Сигнал генерується передавальним блоком та проходить через канал передачі, після чого виконується виявлення пакета даних і синхронізація. Далі застосовуються процедури демодуляції тренувального поля та оцінювання характеристик каналу, що

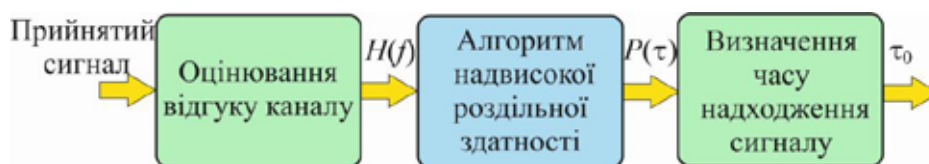


Рис. 4. Блок-схема приймача з високою часовою роздільною здатністю

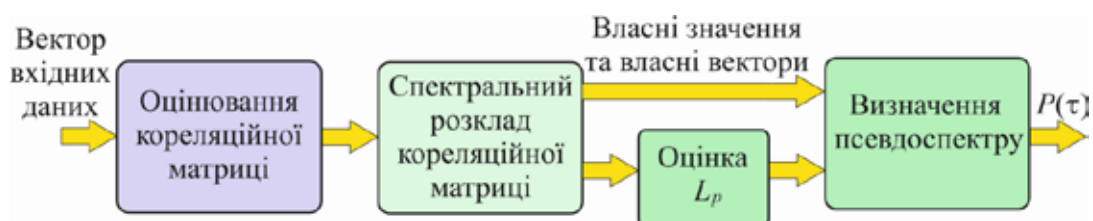


Рис. 5. Структурна схема алгоритму оцінювання часу приходу сигналу з використанням MUSIC



Рис. 6. Блок-схема обробки сигналу та визначення координат мобільної станції на основі трилатерації

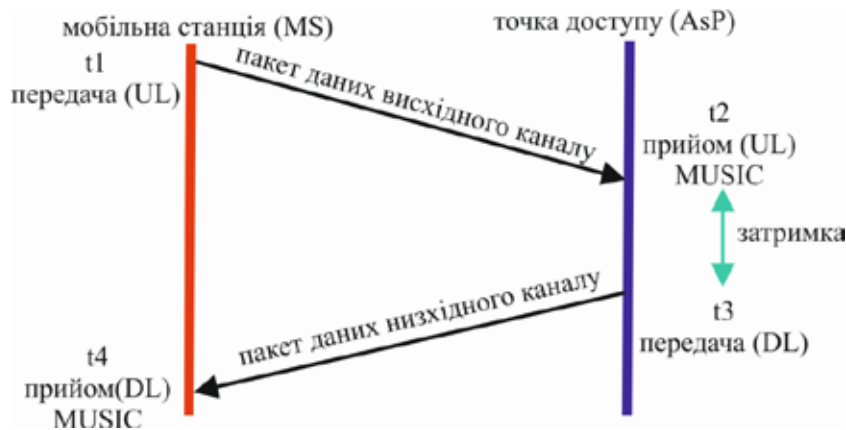


Рис. 7. Сема що ілюструє особливості зондувальних вимірювань між MS та As:  
UL – висхідний канал; DL – низхідний канал

дозволяє визначити довжину траєкторії сигналу. На завершальному етапі, використовуючи отримані часові та амплітудні оцінки, здійснюється визначення місцезнаходження абонента, що забезпечує точне позиціонування у просторі.

Моделювання виконувалося для мережі, організованої відповідно до умов функціонування мереж Wi-Fi 6/Wi-Fi 6E, яка включала мобільну станцію (MS) та кілька точок доступу (AsP). Для однозначного визначення положення MS необхідна наявність щонайменше трьох точок доступу. Процедура імітаційного моделювання передбачала обмін вимірюваннями дальності під час виявлення MS, після чого на основі отриманих результатів здійснювалася трилатерація положення мобільної станції відповідно до рівнянь (9–11). Загалом моделювання проводилося у вигляді серії ітерацій з урахуванням співвідношення сигнал/шум. На рис. 7 наведено схему, що ілюструє особливості зондувальних вимірювань між MS та AsP.

Оцінювання часу приймання–передавання сигналу виконувалося за виразом (див. рис. 7):

$$T_E = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) \quad (15)$$

Після цього відстань між MS і AsP визначається за формулою:

$$d = T_E / 2 \cdot \vartheta_c \quad (16)$$

де  $\vartheta_c$  – швидкість поширення електромагнітної хвилі у середовищі (м/с).

Отже у випадку застосування методології MUSIC послідовно виконуються такі етапи:

- 1) Інтерполяція піднесучих у частотній області за умови їх рівномірного розміщення;
- 2) Обчислення кореляційної матриці (див. формулу (7));
- 3) Декореляція впливів багатопроменевого приймання із використанням методу просторового згладжування;
- 4) Усереднення кореляційної матриці;
- 5) Спектральний розклад кореляційної матриці з формуванням підпросторів сигналу та шуму, а також оцінювання профілю затримок на основі сукупності вимірних реалізацій;
- 6) Визначення часу поширення затримок сигналу на підставі положення піків у доступному багатопроменевому профілі.

На рис. 8 представлена частотна передавальна характеристика каналу. На рис. 9 представлена

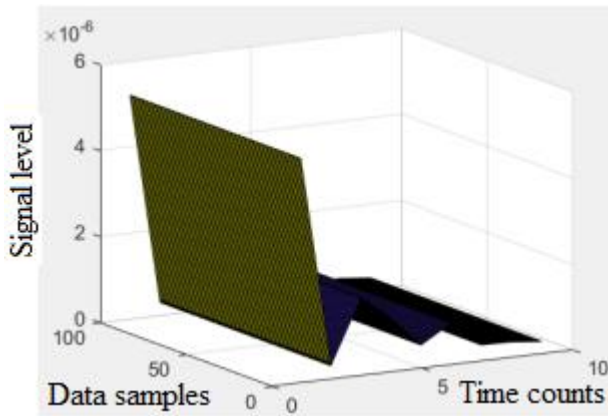


Рис. 8. Частотна передавальна характеристика каналу

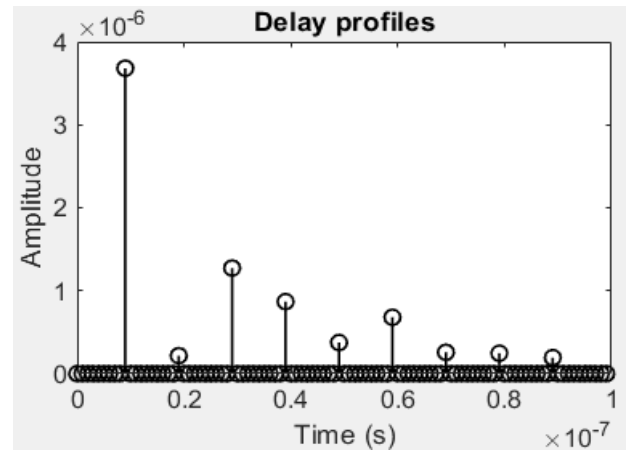


Рис. 9. Імпульсна характеристика каналу зв'язку

імпульсна характеристика каналу зв'язку. Просторові характеристики коефіцієнтів каналу представлено на рис. 10.

Програмна оцінка характеристик каналу зв'язку наведена на рис. 11. На основі експериментальних результатів на рис. 12 наведено порівняння оціненого профілю затримок, отриманого методом MUSIC у процесі моделювання каналу Wi-Fi, та реального профілю багатопроменевого поширення. Загалом, ефективність позиціонування в частотному діапазоні нижче 6 ГГц (міліметровий діапазон) досягається з використанням наявної інформації про формування променя (beamforming) [12].

На рис. 13 показано результати просторового позиціонування мобільної станції на основі трилатерації з використанням кількох точок доступу.

Пунктирні кола на рис. 13 відповідають областям можливого розташування MS, визначеним за вимірними відстанями до окремих точок

доступу, тоді як їх перетин формує оцінене положення станції. Порівняння реального положення MS з оціненим свідчить про високу точність локалізації, що підтверджує коректність оцінювання профілю затримок каналу та ефективність застосованого алгоритму. Незначне відхилення між реальним та оціненим положенням зумовлене впливом багатопроменевого поширення та похибками вимірювання часу проходження сигналу, однак у цілому отримані результати демонструють працездатність запропонованого підходу для задач позиціонування в бездротових мережах Wi-Fi.

Для оцінювання точності позиціонування було сформовано кумулятивну функцію розподілу абсолютної похибки визначення відстані, отриману на основі результатів вимірювань дальності для всіх ітерацій моделювання та всіх пар «AsP-MS». Визначення положення мобільної станції здійснювалося методом трилатерації з викорис-

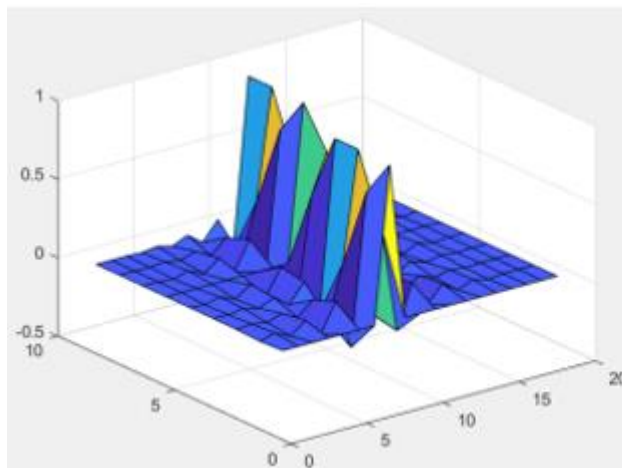


Рис. 10. Просторові характеристики коефіцієнтів каналу

```

SampleRate: 1.0000e+09
DelayProfile: 'Model-B'
ChannelBandwidth: 'CBW20'
CarrierFrequency: 5.2500e+09
EnvironmentalSpeed: 0.0890
TransmitReceiveDistance: 3
NormalizePathGains: true
UserIndex: 0
TransmissionDirection: 'Downlink'
NumTransmitAntennas: 4
TransmitAntennaSpacing: 0.5000
NumReceiveAntennas: 2
ReceiveAntennaSpacing: 0.5000
LargeScaleFadingEffect: 'Pathloss'
NumPenetratedFloors: 4
NumPenetratedWalls: 0
WallPenetrationLoss: 5
NormalizeChannelOutputs: true
ChannelFiltering: true
    
```

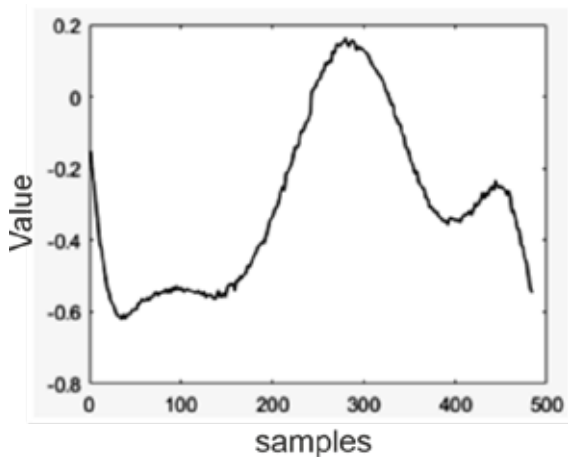


Рис. 11. Характеристики каналу зв'язку, отримані шляхом програмної оцінки

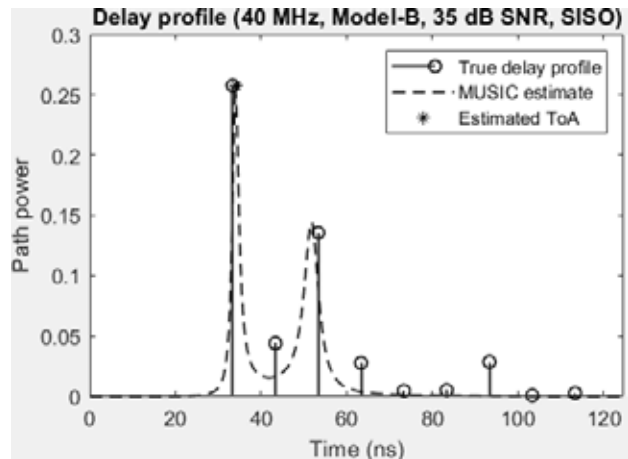


Рис. 12. Оцінювання профілю затримок каналу за допомогою методу MUSIC

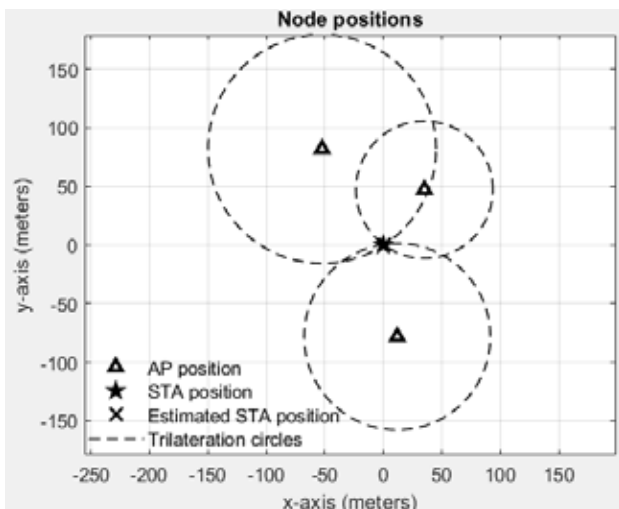


Рис. 13. Результати просторового позиціонування мобільної станції

танням оцінених відстаней, після чого ітеративно обчислювалася середньоквадратична похибка (RMS) оцінки координат MS. На рис. 14 наведено експериментальну залежність середньої абсолютної похибки визначення положення, отриману за результатами ітеративного моделювання вимірювань дальності для всіх пар «AsP–MS» за різних значень співвідношення сигнал/шум. На рис. 15 наведено залежність цієї похибки від рівня співвідношення сигнал/шум, що дозволяє проаналізувати вплив умов приймання на точність локалізації.

На рис. 16 та 16 представлено результати оцінювання похибки дальності. Тут використаний механізм Long Training Field (LTF) тобто навчальних послідовностей фізичного рівня стандартів IEEE 802.11, які використовуються для оцінювання каналу, синхронізації та вимірювання

параметрів сигналу. Ми використали LTF для підвищення точності позиціонування шляхом зміни частоти його повторення, що дало змогу зменшити похибку визначення дальності та координат мобільної станції. Щоб оцінити вплив LTF на якість позиціонування, було змінено частоту його повторення. Дослідження показують, що похибка визначення дальності для MS має тенденцію до зменшення зі зростанням частоти LTF (див. рис. 16).

При визначенні залежність функції розподілу ймовірності (рис. 16) під кількістю полів HE-LTF розуміється число тренувальних символів у преамбулі кадру, які використовуються для оцінювання каналу та визначення часової затримки сигналу. Зі збільшенням кількості HE-LTF підвищується точність оцінки каналу, що приводить до зменшення похибки визначення дальності як ми бачимо з рисунку. Крім того, як видно з рис. 16 кумулятивна функція розподілу (CDF) відображає ймовірність того, що абсолютна похибка позиціонування не перевищує заданого значення. Використання CDF у кумулятивному форматі дало можливість наочно порівнювати ефективність різних конфігурацій системи за рівнем досяжної точності.

На рис. 17 представлено дослідження впливу конфігурацій MIMO на точність позиціонування шляхом порівняння кумулятивних функцій розподілу абсолютної похибки для різної кількості передавальних і приймальних антен. Отримані результати показують, що зі збільшенням розмірності MIMO-системи істотно зменшується похибка визначення координат, що зумовлено підвищенням просторового рознесення та якості оцінки каналу. Таким чином, використання бага-

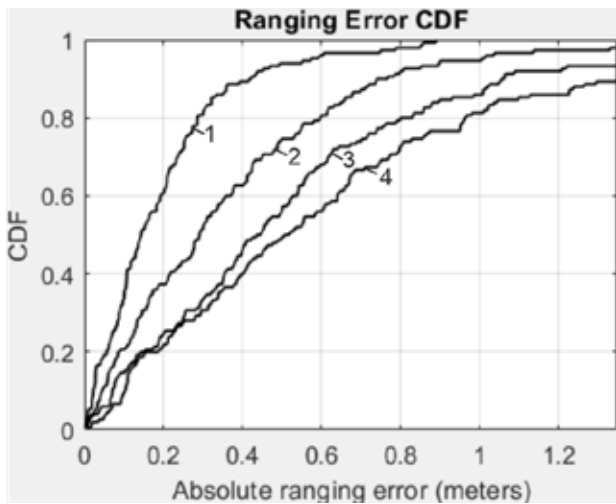


Рис. 14. Залежність функції щільності ймовірності від абсолютної похибки позиціонування для 50 ітерацій: 1 – С/Ш = 40 дБ; 2 – С/Ш = 30 дБ; 3 – С/Ш=20 дБ; 4- С/Ш = 10 дБ

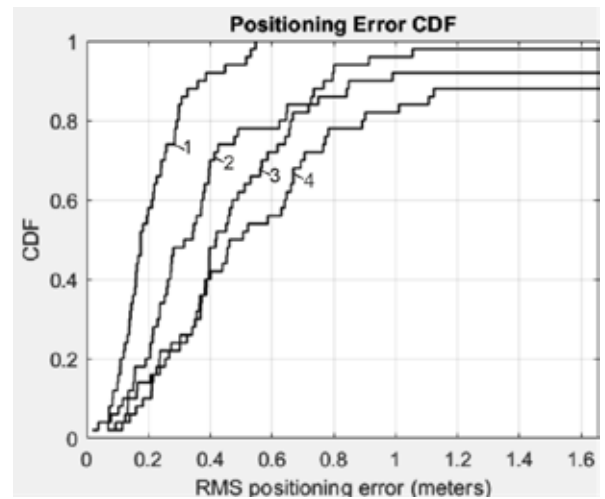


Рис. 15. Залежність функції щільності ймовірності від середньоквадратичної похибки позиціонування: 1 – С/Ш = 40 дБ; 2 – С/Ш = 30 дБ; 3 – С/Ш=20 дБ; 4 – С/Ш = 10 дБ

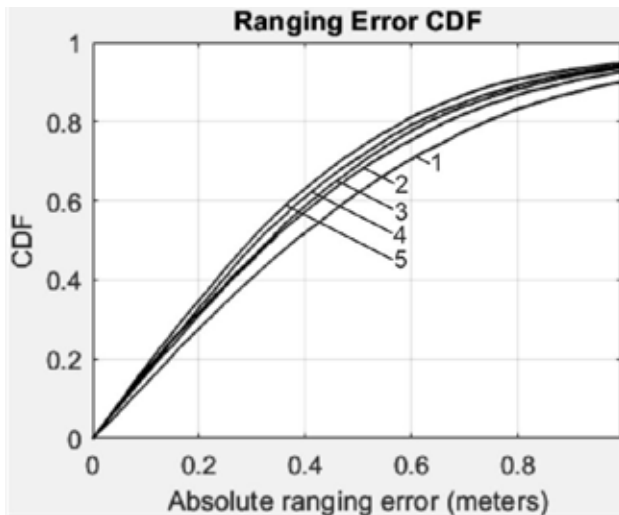


Рис. 16. Залежність функції розподілу ймовірності (у кумулятивному форматі) від абсолютної похибки визначення місцеположення MS: 1 – 1 поле HE-LTF; 2 – 2 поля HE-LTF; 3 – 3 поля HE-LTF; 4 – 4 поля HE-LTF; 5 – 5 полів HE-LTF

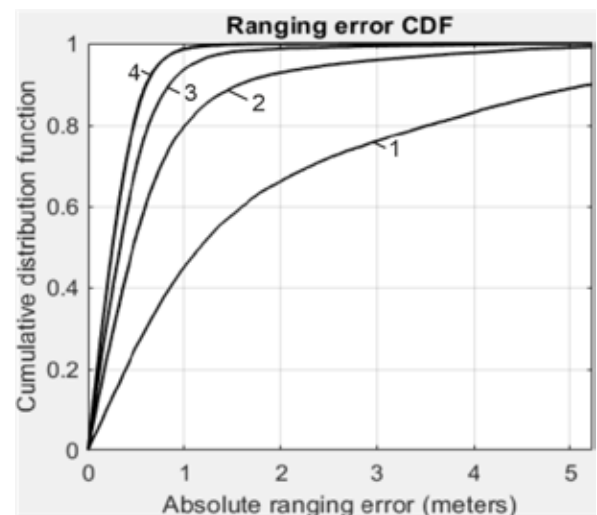


Рис. 17. Залежність функції щільності ймовірності від абсолютної похибки позиціонування для різної кількості передавальних і приймальних антен: 1 – 1×1; 2 – 2×2; 3 – 2×3; 4 -3×3

токанальних конфігурацій є ефективним засобом підвищення точності позиціонування.

На рис. 18 та рис. 19 показано залежність точності Wi-Fi-позиціонування від відношення сигнал/шум при оцінюванні середньої абсолютної похибки та середньоквадратичної (RMS) похибки визначення координат. Видно, що зі зростанням відношення сигнал/шум обидва показники похибки монотонно зменшуються, що свідчить про підвищення надійності та точності позиціонування в кращих умовах радіоканалу.

Отримані результати показують чітку залежність точності Wi-Fi-позиціонування від відно-

шення сигнал/шум, а саме зі зростанням рівня сигнал/шум як середня абсолютна похибка, так і RMS-похибка визначення координат суттєво зменшуються. Це підтверджує, що за сприятливих умов радіоканалу Wi-Fi-системи здатні забезпечувати високу точність позиціонування, достатню для практичних застосувань. Такі результати є особливо корисними для перспективних рішень у сфері моніторингу активів на підприємствах, відстеження персоналу та обладнання, логістики, розумних фабрик, а також для навігації мобільних роботів і автономних платформ у приміщеннях тобто для 6G сценаріїв, де потрібне надійне та

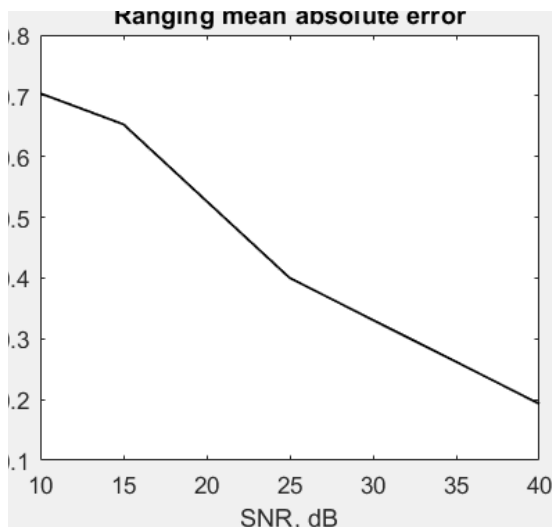


Рис. 18. Оцінювання середньої абсолютної похибки

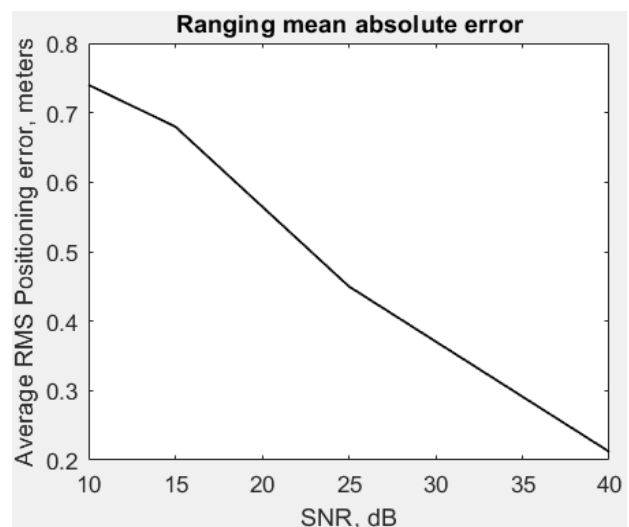


Рис. 19. Оцінювання середньоквадратичної (RMS) похибки

недороге рішення без використання спеціалізованої інфраструктури.

**Висновки.** У запропонованій роботі представлено результати дослідження методів високоточного позиціонування мобільних станцій у мережах абонентського доступу Wi-Fi 6/6E на основі оцінювання часу прибуття сигналів. Проведено аналіз сучасних підходів до локалізації, зокрема методів ToF, AoA/AoD та алгоритмів надвисокої роздільності, і обґрунтовано доцільність їх застосування в умовах багатопроменевого поширення сигналів.

Запропоновано та досліджено підхід до визначення координат абонентської станції із використанням алгоритму MUSIC для оцінювання часових затримок у поєднанні з процедурою FTM стандарту IEEE 802.11az. На основі результатів чисельного моделювання показано, що застосування методів надвисокої роздільності дозволяє істотно зменшити похибку визначення відстані та координат у порівнянні з класичними кореляційними підходами, особливо за складних умов багатопроменевості та низького відношення сигнал/шум.

Окрему увагу приділено аналізу впливу навчальних послідовностей HE-LTF на точність визначення відстані. Встановлено, що зі збільшенням кількості полів HE-LTF у преамбулі кадру підвищується якість оцінки каналу, що приводить

до зменшення похибки визначення відстані та покращення точності позиціонування мобільної станції. Це підтверджено результатами аналізу кумулятивних функцій розподілу похибки.

Досліджено також вплив конфігурацій MIMO на ефективність позиціонування. Показано, що збільшення кількості передавальних і приймальних антен забезпечує зростання просторового рознесення та покращення оцінки параметрів каналу, що безпосередньо приводить до зменшення середньоквадратичної та абсолютної похибок локалізації. Отримані результати підтверджують доцільність використання багатоканальних антенних систем у задачах високоточного Wi-Fi позиціонування.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проектуванні та модернізації реальних мереж абонентського доступу, орієнтованих на сервіси внутрішньої навігації, моніторингу присутності користувачів, автоматизації виробничих процесів, систем безпеки та управління ресурсами в «розумних» будинках і промислових IoT-середовищах. Запропонований підхід може бути інтегрований у перспективні рішення стандартів Wi-Fi 6/6E/7 без істотного ускладнення апаратної частини, що робить його привабливим для практичного впровадження у сучасних системах бездротового доступу.

#### Список літератури:

1. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L., Kasslin M., Doppler K. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax. *IEEE Communications Magazine*. 2019. Vol. 57. № 9. Pp. 113–119. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338>.

2. Бойко Ю. М., Пятін І. С. Визначення продуктивності LDPC кодів засобами HDL в системах зв'язку технології Wi-Fi 6. *Вчені записки*. 2024. Т. 35 (74). № 1. С. 19–26. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/03>.
3. Kunhoth J., Karkar A., Al-Maadeed S., et al. Indoor positioning and wayfinding systems: a survey. *Human-centric Computing and Information Sciences*. 2020. Vol. 10. Article 18. <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00222-0>.
4. Kawecki R., Hausman S., Korbel P. Performance of Fingerprinting-Based Indoor Positioning with Measured and Simulated RSSI Reference Maps. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. № 9. Article 1992. <https://doi.org/10.3390/rs14091992>.
5. Dai J., Wang M., Wu B., Shen J., Wang X. A Survey of Latest Wi-Fi Assisted Indoor Positioning on Different Principles. 2023. *Sensors*. Vol. 23, No. 18. Art. 7961. <https://doi.org/10.3390/s23187961>.
6. Boiko J., Druzhynin V., Pyatin I., Karpova L. Software Modeling and Implementation of Information Network for Smart Home Technology. 2024. *CEUR Workshop Proceedings*. Vol. 3909. P. 296–310. Available online: [https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper\\_24.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper_24.pdf).
7. Bahl P., Padmanabhan V. N. RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System. *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications: Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Tel Aviv, 26–30 March 2000)*. Israel, 2000, Vol. 2, Pp. 775–784. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2000.832252>.
8. Gu Y., Lo A., Niemegeers I. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks. 2009. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 11, No. 1. P. 13–32. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090103>.
9. Dardari D., Conti A., Ferner U., Giorgetti A., Win M. Z. Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments. 2009. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 97, No. 2. P. 404–426. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008846>.
10. Zhao B., Hu K., Gong Y., Shen Y. A Tensor-Based Joint AoA and ToF Estimation Method for Wi-Fi Systems. 2021. *IEEE Wireless Communications Letters*. Vol. 10, No. 11. P. 2543–2546. <https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3106699>.
11. Boquet G., Boquet-Pujadas A., Pisa I., Dabak A., Vilajosana X., Martinez B. Indoor Position Estimation Using Angle of Arrival Measurements: An Efficient Multi-Anchor Approach With Outlier Rejection. 2024. *Internet of Things*. Vol. 26. Art. 101236. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101236>.
12. Бойко Ю., Пятін І., Гавронський В., Коротун М. Моделювання процесу розгортки променя під час початкового доступу в мережах 5G NR. 2025. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. Т. 359, № 6.1. С. 70–75. <https://elar.khmnpu.edu.ua/handle/123456789/20291>.

### **Boiko J.M., Pyatin I.S., Eromenko O.I. A HIGH-ACCURACY POSITIONING METHODOLOGY FOR WI-FI 6/6E ACCESS NETWORKS BASED ON TIME-OF-ARRIVAL ESTIMATION**

*The rapid development of subscriber access networks based on Wi-Fi technologies, particularly Wi-Fi 6 and Wi-Fi 6E (IEEE 802.11ax/az), has enabled the emergence of new context-aware services, among which high-precision positioning of subscriber stations in indoor and dense urban environments plays a key role. The relevance of this research is determined by the need to improve positioning accuracy in Wi-Fi networks operating under multipath propagation conditions and limited signal-to-noise ratio, which are typical for real deployment scenarios of subscriber access networks.*

*This paper focuses on positioning techniques based on Time of Arrival (ToA) estimation using Fine Timing Measurement procedures introduced in the IEEE 802.11az standard and ultra-high-resolution signal processing algorithms. A method for estimating the distance between a mobile station and access points is proposed, which is based on mathematical modeling of a multipath wireless channel and the application of the MUSIC (Multiple Signal Classification) algorithm for precise estimation of individual signal path delays. The use of frequency-domain channel response sampling enables the formation of a correlation matrix, whose eigenstructure is exploited to separate closely spaced multipath components and enhance temporal resolution.*

*Numerical simulations were conducted to evaluate the performance of the proposed approach under Wi-Fi 6/6E operating conditions. Subscriber station coordinates were determined using trilateration based on the estimated distances to multiple access points. The impact of key system parameters, including signal-to-noise ratio, the number of HE-LTF training fields, and MIMO antenna configurations, on distance estimation accuracy and overall positioning error was thoroughly analyzed. The simulation results demonstrate that increasing the number of training fields and antenna elements significantly improves delay estimation accuracy and reduces positioning error.*

*The obtained results confirm that the integration of ultra-high-resolution algorithms with physical layer training sequences provides a substantial improvement in positioning accuracy compared to conventional*

*methods. The proposed approach is shown to be effective and practically feasible for implementation in modern and next-generation Wi-Fi subscriber access networks, enabling reliable indoor navigation, user activity monitoring, and location-based services for industrial IoT and smart infrastructure applications.*

**Keywords:** *Wi-Fi 6/6E, subscriber positioning, Time of Arrival, MUSIC algorithm, trilateration, multipath channel, MIMO systems.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026