

---

# КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

---

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.1>

## ЛОКАЛЬНЕ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПО WI-FI З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

---

**Артюхов В. Г.** – кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри системного проектування  
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: 0000-0003-1752-9106

**Бритов О. А.** – старший викладач кафедри системного проектування  
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: 0000-0002-5944-703X

**Горгізова-Гай В. Ш.** – кандидат технічних наук,  
доцент кафедри системного проектування  
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: 0000-0001-6224-3532

**Кірюша Б. А.** – кандидат технічних наук,  
доцент кафедри системного проектування  
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: 0000-0001-7343-1387

**Стіканов В. Ю.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
доцент кафедри системного проектування  
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: 0000-0001-9908-9591

**Титоренко О. В.** – магістр з комп'ютерних наук  
кафедри системного проектування  
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: 0000-0003-4121-5609

---

Системи відстеження розташування всередині приміщень за допомогою Wi-Fi (Wi-Fi Positioning System – WPS) знаходять все більше застосування в багатьох сферах господарства для моніторингу розташування людей і активів.

В статті приведено огляд методів, які застосовуються в сучасних комерційних системах внутрішнього насивного позиціонування за допомогою Wi-Fi (Wi-Fi Positioning System – WPS). На основі проведеного аналізу робиться висновок, що більшість WPS для визначення місцеположення об'єктів спостереження використовують вимірювання інтенсивності прийнятого сигналу (RSSI). Основною перевагою метода є використання вже розгорнутої Wi-Fi мережі і відсутність необхідності в додатковому обладнанні. Однак подальший аналіз алгоритмів позиціонування на базі RSSI, показує, що всі вони для забезпечення достатньої для практичних задач точності висувають до існуючої інфраструктури Wi-Fi мережі додаткові вимоги. А ці вимоги потребують досить значних додаткових витрат на модернізацію інфраструктури.

Пропонується підхід до побудови WPS на основі використання IoT модулів в якості прослуховувачих пристроїв Wi-Fi мережі, які працюють у режимі постійного моніторингу її каналів. Підхід дозволяє зменшити додаткові витрати на систему позиціонування завдяки відсутності додаткових вимог до існуючої мережевої інфраструктури і її обладнання.

В статті описано архітектуру прототипу системи позиціонування. Для побудови прототипу системи було обрано: Wi-Fi модуль ESP8266, мікроконтролер Arduino Uno та Ethernet модуль ENC28J60. Після аналізу пакету створюється json файл зі структурованими даними, які містять значення RSSI, MAC-адресу ТД і відправника. Далі ці дані передаються через послідовний порт мікроконтролеру Arduino, який відправляє їх на сервер за допомогою модуля ENC28J60. Для визначення місцеположення об'єктів спостереження обрано метод побудови радіо карти приміщення і метод K найближчих сусідів (KNN). У функції серверу входить збір, обробка і збереження даних від мікроконтролерів, обробка запитів оператора, побудова радіо карти, позиціонування об'єктів та їх відображення на плані приміщення. Експерименти, проведені на прототипі системи позиціонування показали, що запропонований підхід дозволяє забезпечити можливості позиціонування, аналогічні системам на базі точок доступу.

**Ключові слова:** системи локального позиціонування, бездротові мережі Wi-Fi, ідентифікатор потужності сигналу RSSI, радіо карта, методи позиціонування, прослуховування радіоефіру, Wi-Fi модулі Інтернету речей.

#### **Artuhov V. G., Brytov O. A., Hiorhizova-Hai V. S., Kyriusha B. A., Stikanov V. J., Tytorenko A. V. Wi-Fi indoor positioning using microcontrollers**

*Indoor Wi-Fi Positioning Systems (WPS) are used in many areas of the economy to monitor the location of people and assets.*

*The paper provides an overview of the methods that are used in modern commercial positioning systems. Based on the analysis, it was concluded that most WPS use received signal strength measurement (RSSI) to find out the location of observation objects. The main advantage of this method is the use of an existing Wi-Fi network with no additional equipment. However, further analysis of positioning algorithms based on RSSI shows that all of them impose additional requirements on the existing Wi-Fi network infrastructure to ensure accuracy sufficient for practical tasks. And these requirements impose significant additional costs for infrastructure modernization.*

*An approach is proposed for building a WPS based on the use of IoT modules as Wi-Fi network listening devices that operate in the mode of continuous monitoring of its channels. This approach allows to reduce additional costs for the positioning system due to the absence of additional requirements for the existing network infrastructure and its equipment.*

*The paper describes the architecture of the positioning system prototype based on a microcontrollers. The ESP8266 Wi-Fi module, Arduino Uno microcontroller and ENC28J60 Ethernet module were chosen to build a prototype system. The ESP8266 module tapes Wi-Fi client packets and parses them. After parsing a packet, a json file is created with structured data that contains the RSSI values, the AP MAC address, the sender MAC address and the timestamp. Next, the data is transmitted via the serial port to the Arduino microcontroller, which sends it to the server using the ENC28J60 module. To determine the location of observation objects, the method for building a radio map of the room and the method of K nearest neighbors (KNN) were chosen. The functions of the server include collecting, processing and storing data from microcontrollers, processing operator requests, building a radio map, positioning objects and displaying them on the floor plan.*

*Experiments carried out on a prototype positioning system showed that the proposed approach provides location capabilities similar to systems based on access points.*

**Key words:** indoor positioning systems, Wi-Fi wireless networks, RSSI signal strength identifier, radio map, positioning methods, network traffic sniffing, Wi-Fi modules of the Internet of Things.

**Вступ.** Завдяки широкому розповсюдженню мобільних пристроїв системи відстеження розташування всередині приміщень за допомогою Wi-Fi (Wi-Fi Positioning System – WPS) знаходять все більше застосування у різних господарських сферах, таких як торгівля, логістика, промислове виробництво, управління персоналом, охорона здоров'я, безпека та багато інших. На їх основі будуються різноманітні додатки для моніторингу місцезнаходження людей і активів, для збору та обробки аналітичних даних, для залучення клієнтів та оптимізації маркетингових стратегій на підприємствах, в торгових центрах, офісах, виставках, музеях.

Такі системи розділяють на активні, коли мобільний клієнт за допомогою встановленого на ньому додатка визначає своє місцеположення, та пасивні, коли система визначає місцеположення об'єктів спостереження. Дана стаття орієнтована на пасивні системи локалізації.

Популярності побудови систем позиціонування на основі технології Wi-Fi сприяє її поширеність, можливість використання готової мережної інфраструктури, значна зона покриття (близько 100м), можливість позиціонування як усередині приміщень так і зовні, легкість масштабування та обслуговування, можливість комбінування з іншими технологіями (наприклад, Bluetooth) для підвищення точності. Додавання точок доступу Bluetooth, радіус дії яких менше, ніж у Wi-Fi, дозволяє коригувати оцінки координат об'єктів у тих зонах, де оцінка Wi-Fi виявляється занадто грубою.

Відомі комерційні WPS-системи [1-7] працюють за принципом визначення координат клієнтських пристроїв за допомогою Wi-Fi точок доступу (ТД), розташування яких заздалегідь відоме. ТД приймають радіосигнали від клієнтських пристроїв, вимірюють їх параметри, такі як потужність отриманого сигналу (RSS), час поширення сигналу на відстань від джерела до приймача (TOA) або кут прибуття сигналу від джерела до приймача (AOA). Положення мобільного пристрою відносно точок доступу можна отримати з цих даних. В залежності від застосованого методу вимірювання ТД передають відповідні параметри радіосигналів клієнтів разом з їх MAC-адресами та часовими відмітками вимірів на центральний сервер. Далі алгоритми позиціонування обробляють показники розташування та оцінює інформацію про місцезнаходження. Нарешті, система відображення перетворює інформацію про місцезнаходження у відповідний формат для візуалізації на плані приміщення або для аналітичної обробки [1].

З огляду на складну природу внутрішнього середовища, розробка техніки локалізації в приміщенні завжди пов'язана з рядом проблем, таких як непряма видимість, багатопроменеве розповсюдження (при відбитті сигналів перешкодами та інтерференції), шумові перешкоди та інші фактори. Вплив перешкод, таких як стіни, двері, обладнання, рух людей, радіо перешкоди від сторонніх пристроїв, призводять до нерівномірного розповсюдження радіосигналів всередині приміщення. Для подолання цих проблем в системах внутрішньої локалізації реалізуються різні методи і підходи, які впливають на їх складність, продуктивність і вартість.

## **ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ**

### **Методи позиціонування**

Методи, які використовуються для задач позиціонування в сучасних WPS-системах [1-7], представлені в таблиці 1. Для досягнення вищої точності локалізації об'єктів системи позиціонування можуть комбінувати кілька методів для компенсації слабких сторін одного з них перевагами іншого. Наприклад, відома система Stanley/healthcare використовує для локалізації методи TOA і RSSI.

Таблиця 1

## Методи, що застосовуються в системах позиціонування

Метод	Принцип позиціонування	Точність	Додаткові вимоги до обладнання	Особливості
Received Signal Strength indicator (RSSI)	Оцінка розташування визначається на підставі потужності прийнятого сигналу	Загалом середня. В залежності від алгоритмів і розташування ТД може наблизитись до високої і низької.	Немає	З використанням радіо карт мало вразливий до впливу багатопроменевого розповсюдження сигналу і непрямой видимості. Вразливий до затінення, коливань потужності сигналу в часі, низького відношення сигнал/шум.
Angle of Arrival (AoA)	Оцінка розташування будувється у межах площі трикутника, одержуваного внаслідок перетину осей спрямованості антен трьох найближчих БС. Основою визначення напрямку, в якому знаходиться об'єкт є різниця фаз хвиль, які приймаються масивом антен, рознесених на фіксовану відстань.	Загалом висока. Від високої до середньої.	Потребує спеціальні антенні решітки на ТД. Але потрібна менша кількість ТД.	Вразливий до впливу багатопроменевого згасання сигналу, тому краще працює в умовах прямої видимості.
Методи на основі вимірювання часу Time of Flight (ToF)	Оцінка розташування визначається на підставі визначення відстаней між об'єктом та точками доступу. Оцінка відстані базується на часі розповсюдження сигналу між об'єктом і ТД, який розраховується по міткам часу в пакетах запитів і відповідей.	Від високої до середньої	Деякі методи потребують синхронізації годинників об'єкта і ТД (ToA – Time of Arrival) або всіх ТД (TDoA - Time Difference of Arrival). Стандарт IEEE 802.11.mc (FTM/ RTT – Fine Time Measurement/ Round Time Trip) не потребує синхронізації, але потрібна підтримка стандарту об'єктом і ТД.	Вразливі до впливу багатопроменевого розповсюдження сигналу і наявності предметів на шляху сигналу, матеріал яких збільшує час розповсюдження сигналу. Тому особливо ефективні в умовах прямої видимості на відкритих площадках та у великих приміщеннях. Створюють додаткове навантаження на ТД.

Варто зауважити, що точність методів залежить від їх реалізації в конкретних системах позиціонування, використовуваних алгоритмів обробки даних, кількості і розташування ТД, середовища проведення експериментів (ідеальності умов проведення експериментів). Тому в таблиці 1 будемо використовувати такі оцінки точності: висока – похибка 1-2 м і менше, середня – похибка 3-5 м, низька – похибка 5-10 м і більше.

Системи на базі методів AoA і ToF можуть забезпечити більшу точність позиціонування ніж на базі RSSI. Але на сьогодні реалізація AoA потребує додаткового коштовного апаратного забезпечення, а впровадження стандарту IEEE 802.11.mc просувається дуже повільно і потребує встановлення ТД топ рівня та реалізації повної версії протоколу на мобільних пристроях, чого поки ще немає [4]. Тому більшість систем покладаються на методику на основі RSSI, яка також може забезпечити хорошу точність позиціонування для багатьох практичних застосувань і реалізується дешевше.

### **Локалізація на основі RSSI**

Принцип локалізації з використанням RSSI полягає у встановленні відповідності між місцем розташування об'єкту та його RSSI. Проте рівень RSS зменшується з відстанню між передавачем і приймачем нелінійно, особливо в приміщенні через багатопроменеве розповсюдження. RSS чутливий до затінення (локальні середні втрати під час поширення сигналу), низького співвідношення сигнал/шум (SNR) та поширення в непрямій видимості (NLOS). Рух людей в приміщенні (оскільки тіло людини на 50% складається з води) і інші зовнішні впливи призводять до флуктуацій RSS у часі. Ці фактори негативно впливають на точність локалізації на основі RSSI.

#### Алгоритми позиціонування на основі RSSI

У літературі представлено багато алгоритмів локалізації на основі RSSI, серед яких можна виділити: алгоритми на основі моделі поширення сигналу, метод радіочастотного зняття відбитків пальців, позиціонування на основі близькості та ймовірнісна оцінка [2; 3].

#### Місцеположення на основі близькості

Це простий підхід, який дає уявлення про те, що мобільний телефон знаходиться у межах зони покриття певної точки доступу, якщо він до неї підключений. Якщо зона покриття точки доступу невелика і зони сусідніх ТД перетинаються, така інформація допомагає звузити області можливого розташування об'єкту і в подальшому скоротити обсяг роботи більш точних алгоритмів локалізації.

#### Місцеположення на основі моделі поширення сигналу

Локалізація з використанням цього підходу включає два етапи. На першому етапі розраховуються відстані  $D_i$  між мобільним пристроєм і як мінімум трьома ТД, розташування яких відоме. Для цього точки доступу роблять виміри RSSI прийнятих від об'єкту сигналів. Відстань від об'єкту до ТД вираховується за допомогою рівнянь, які описують залежність між затуханням потужності сигналу і відстанню. На наступному етапі за допомогою алгоритмів латерації визначається місцеположення мобільного пристрою як точка або область перетину кіл з центрами у місцях розташування ТД і та радіусами, які дорівнюють  $D_i$ .

Перевагою цього типу локалізації є простота реалізації. Проте різні середовища, точки доступу, апаратне забезпечення смартфонів можуть призвести до різних співвідношень в моделі поширення сигналу між вимірами RSSI та відстанями. Проблемою також є коливання RSSI в часі. Отже, точність та стабільність трилатераційного позиціонування обмежуються зовнішніми перешкодами

для сигналів Wi-Fi. А оскільки RSSI змінюється з відстанню нелінійно, то похибка оцінки відстані експоненційно збільшується з відстанню.

Умовами підвищення точності позиціонування є впевнений прийом клієнтом сигналів щонайменше від трьох ТД; збільшення щільності розташування ТД, які повинні розставлятися по периметру будівлі та у шаховому порядку; між трьома ТД та клієнтом бажана пряма видимість. Такі умови вимагають суттєвого збільшення вартості Wi-Fi інфраструктури організації, яка хоче використовувати її ще для задач позиціонування. При цьому точність позиціонування лежить у межах від 3,5 до 10 м [6].

#### Метод радіочастотних (RF) відбитків пальців

Оскільки побудова моделі поширення сигналу може виявитися важким завданням через складність внутрішнього середовища, метод RF відбитків пальців пропонує альтернативою підхід.

RF-дактилоскопія складається із двох етапів; офлайн-фаза та онлайн-фаза. У офлайн-фазі область приміщення покривається умовною сіткою. В клітинах сітки збирається багато RSSI з навколишніх точок доступу, які далі усереднюються для усунення часових флуктуацій сигналу. Усереднені значення RSSI з відповідним розташуванням (так звані опорні точки – RP) зберігаються в базі даних, яка називається Radio map. На етапі онлайн фази збираються вимірювання RSSI з невідомих місць. Ці вимірювання порівнюються з базою даних офлайн фази для визначення розташування об'єктів. Один з можливих методів визначення місця розташування об'єктів – оцінка найменшої евклідової відстані між вимірами з невідомих точок та підпростором радіо карти. Інші підходи визначення місцеположення засновані на різних методах машинного навчання. Рівень досягнутої точності залежить від того, скільки точок доступу і RP використовується. Типова точність 2-3м (наприклад, система RADAR [2]). Недоліком цього підходу є необхідність періодичного оновлення радіо карти для врахування змін радіо середовища, особливо при змінах у плануванні приміщення або кількості працюючих ТД.

Додавання більшої кількості RP покращить роздільну здатність, однак це збільшує трудовитрати. Додавання більшої кількості точок доступу зменшує можливість отримання неоднозначних результатів і покращує локалізацію. Також згідно опублікованих досліджень системи з невеликою кількістю RP можуть забезпечувати хорошу точність за наявності достатньої кількості точок доступу в системі.

#### Оцінка максимальної правдоподібності чи ймовірнісний

Цей підхід аналогічний RF- відбитків пальців, з тією відмінністю, що поведінка RSSI моделюється як випадкова величина. На етапі складання радіо карти на територію, що вивчається, наноситься умовна сітка. Далі вимірювання RSSI, зібрані з сітки, обробляються для отримання ймовірнісного розподілу поведінки сили сигналу в кожному місці. На етапі позиціонування збираються RSSI для кожного об'єкту з оточуючих ТД та зберігаються у векторах. Потім розташування мобільного пристрою виводиться на основі максимальної правдоподібності.

Алгоритм показує точний аналіз даних, проте вимагає великих обчислень. Також може використовуватися менша кількість RP, головною умовою є унікальність RF-покриття від ТД, оскільки точність позиціонування ґрунтується не тільки на силі, а й на різниці рівнів сигналів. Точність такі систем лежить у межах 1м – 3м (прикладі – системи, Nogus [5], EkaHau [7]). Для підвищення точності методика EkaHau додатково враховує попередню позицію об'єкту та можливий шлях його пересування на плані території закладу.

### Частота вимірювань

Для застосувань, пов'язаних з аналізом переміщення об'єктів спостереження, таких як аналітика поведінки клієнтів, управління персоналом, навігація по приміщенню, надсилання повідомлень з урахуванням розташування клієнта та ін., важливо визначати місцезположення об'єктів у реальному часі. Точність позиціонування рухомих об'єктів визначається не тільки точністю застосовуваних методів і алгоритмів, а й частотою вимірювання і оновлення їх координат.

Для вимірювання RSSI клієнтів системи позиціонування широко використовують керуючі кадри (probe requests) протоколу IEEE 802.11 (Wi-Fi), які посилаються на максимальній потужності і на найнижчій швидкості передачі. Поки клієнтський пристрій не підключений до мережі, він періодично надсилає серії зондуючих кадрів (probe requests) послідовно по всіх RF каналах. Наприклад, повне сканування каналів на Android може зайняти 2,5–3,5 с [4].

Після отримання відповідей від точок доступу (probe response) клієнт підключається до ТД з найсильнішим сигналом і налаштовується на її RF канал. Перебуваючи у зоні впевненого прийому однієї ТД, пристрій все одно продовжує періодично відправляти на всі канали Probe request. При переміщенні клієнта частота зондування зазвичай збільшується, особливо безпосередньо перед процедурою роумінгу (переходу від ТД зі слабким сигналом до іншої ТД із сильним сигналом).

Отже, незалежно від підключення присутність пристрою може бути виявлена, поки він знаходиться в межах досяжності мережі і його WiFi-антена включена.

Інтервали запиту зондування сильно різняться залежно від типу пристроїв, ОС (iOS, Android та ін.), активності клієнта, режиму енергоспоживання, встановлених додатків, і можуть становити від 5-10 секунд до 10 хвилин. Коли підключений клієнт генерує трафік, інтервали між посилкою серій Probe Request в середньому складають 1 хв. При рівномірному переміщенні пристрою і перед його можливою процедурою роумінгу інтервали запитів зменшуються в середньому до 10-15 с. Для забезпечення локалізації у реальному часі при переміщенні об'єкту потрібно, щоб інтервали між вимірюваннями не перевищували значення подвійної похибки та були рівномірними. Якщо вважати, що для людини середня швидкість руху 5км/год (1.4 м/с), то для забезпечення точності позиціонування 3-5 м потрібно приблизно 4-7 с, для точності 5-10 м – потрібно 7- 14 с. Таким чином, в загальному випадку частота зондування Probe Request для позиціонування в реальному часі є недостатньою.

Для підвищення частоти визначення координат розробники Cisco реалізували метод позиціонування пристрою по трафіку даних (Data RSSI) для підключених користувачів. Система FastLocate дозволяє збільшити частоту вимірювань до 6-8 разів на хвилину, чого достатньо для встановлення маршруту переміщення клієнта. Інтервали сканування RF каналів при моніторингу можуть бути як рівномірними, так і різними (більший час витрачається на інфраструктурні канали) [8].

### Вимоги до інфраструктури

Збір інформації для розрахунку координат об'єктів точками доступу вимагає, щоб вони, крім обслуговування клієнтів і моніторингу власного RF каналу, додатково здійснювали моніторинг сусідніх каналів власної мережі (для підключених користувачів) а також інших каналів (для непідключених користувачів). Для реалізації такого моніторингу можливі два варіанти. ТД має періодично виходити з режиму обслуговування своїх клієнтів (клієнти мають переключатись на інші ТД) та перемикається в режим сканування інших каналів. Це реалізація на основі компромісу між певним зниженням продуктивності мережі і збільшенням

інтервалів для збору даних позиціонування. Більш оптимально збір даних для позиціонування може бути реалізований з додаванням до інфраструктури мережі певної кількості спеціальних ТД з додатковим радіо модулем, який буде постійно в режимі моніторингу прослуховувати всі канали [6].

Попередній аналіз систем і алгоритмів позиціонування також показує, що всі вони висувають додаткові вимоги до наявної інфраструктури Wi-Fi мережі для забезпечення заявленої точності. Ці вимоги потребують значного збільшення кількості ТД і щільності їх розташування. Вимога до розташування ТД по периметру приміщень призводить до неповного використання покриття точок доступу з круговими антенами та виходу сигналу за межі будівлі.

Таким чином, позиціонування, базоване на вимірюванні RSSI, хоч і використовує існуючу інфраструктуру Wi-Fi мережі, але все одно потребує значних витрат на додаткове обладнання.

### РЕАЛІЗАЦІЯ WPS З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

Пропонується підхід до побудови WPS на основі недорогих мікроконтролерів, які можуть бути встановлені у потрібній кількості на периметрі приміщення, працювати у режимі постійного моніторингу, збирати виміри RSSI з об'єктів спостереження і відправляти їх на сервер системи позиціонування для визначення місцеположення об'єктів. Інфраструктурні ТД Wi-Fi мережі можуть працювати у звичайному режимі обслуговування клієнтів, додаткових вимог до їх апаратного і програмного забезпечення не висувається.

В залежності від задач і призначення системи позиціонування та потрібної точності визначення місцеположення об'єктів даний підхід дозволяє реалізувати в системі різні алгоритми, налаштувати різні часові інтервали між переключенням RF каналів при скануванні, різну частоту оновлення позицій об'єктів.

#### Прототип системи позиціонування

Було створено прототип системи позиціонування, орієнтованої на підключених клієнтів. Структура системи (рисунок 1) включає Wi-Fi мережу з ТД і клієнтськими пристроями, мікроконтролери, які перехоплюють пакети клієнтів, виконують розборку пакетів і передають дані на сервер позиціонування.



Рис. 1. Структура системи позиціонування

Функціонально сервер позиціонування складається з сервера для обробки Wi-Fi даних, який приймає і обробляє дані від мікроконтролерів на інтервалах вимірювання та зберігає їх у базі даних, сервера БД та веб-сервера, який оброблює запити оператора, використовується для налаштування плану приміщення, калібрування радіо карти, визначення місцезнаходження об'єктів та відображення їх на плані приміщення.



Для визначення місцеположення об'єктів було обрано метод RF відбитків пальців і метод К найближчих сусідів (KNN), який забезпечує за [2,9] гарну продуктивність і точність від середньої до високої.

Для побудови прототипу системи було обрано популярні IoT модулі: Wi-Fi модуль ESP8266 [10], Ethernet модуль ENC28J60 [11] та мікроконтролер Arduino Uno. Було обрано плату розробника Arduino UNO Wi-Fi R3 від RobotDyn [12] з вже встановленим на ній модулем ESP8266.

Для перехоплення пакетів IEEE 802.11 модуль ESP8266 налаштовується на безладний режим. Для аналізу полів отриманого пакету використовується функція зворотного виклику сніфера. Після розбору пакету створюється json файл зі структурованими даними (значення RSSI, MAC-адреса ТД і клієнта). Далі ці дані передаються через послідовний порт UART мікроконтролеру Arduino, який передає його на сервер за допомогою модуля ENC28J60.

Для підвищення кількості вимірювань від активних клієнтів перехоплюються пакети Probe Request і Data. Але, як було розглянуто раніше, пристрої, що знаходяться в сплячому режимі та не переміщуються, надсилають Probe Request зрідка (через 1 хв, 5 хв і навіть 9 хв. за нашими спостереженнями).

Вибір частоти вимірювань для системи позиціонування залежить від багатьох факторів: призначення системи, особливостей інфраструктури, типу клієнтів. Для визначення конкретних значень доцільно проводити експериментальні випробування системи в конкретних умовах застосування.

Робота системи складається з кількох етапів:

- Завантаження схеми приміщення і позначення на ньому місць розташування мікроконтролерів і внесення їх MAC адрес.
- Послідовне завантаження калібрувальних вимірів по точках радіо карти від мікроконтролерів. За одне вимірювання у точці карти потрібно отримати не менше 100 значень RSSI від тестового об'єкту. Після чого виміри від кожного мікроконтролера усереднюються і зберігаються. Для отримання більшої достовірності варто повторювати вимірювання в різні дні і різний час і усереднювати їх з попередніми.
- Позиціонування об'єктів спостереження на основі порівняння даних, отриманих від мікроконтролерів і побудованої радіо карти. Дані про місцеположення об'єктів можуть візуалізуватись на плані приміщення у реальному часі або зберігатись для подальшого аналізу.

#### **Експериментальне випробування**

**Метою дослідження** було порівняння результатів, отриманих за допомогою запропонованого підходу, з відомими системами на базі точок доступу. Тому мікроконтролери були розташовані біля ТД і відгравали роль додаткового радіо модуля для них.

Тестування роботи системи проводилось в приміщенні із 3-х кімнат, розділених коридором. В кімнатах знаходились електронні пристрої, м'які та дерев'яні меблі. Було налаштовано 3 Wi-Fi роутери TP-LINK Archer A9, (на рисунку 2 показано штриховими кружечками). Біля роутерів встановлено по мікроконтролеру та під'єднано до них по Ethernet. В якості об'єкта позиціонувати було взято смартфон Samsung Galaxy A20.

Модулі моніторингу послідовно з інтервалом 1,5 с обходять 3 інфраструктурні канали (1, 6 і 11), забезпечуючи інтервали між вимірюваннями RSSI 4,5с. Цей час має відповідати середній точності позиціонування для об'єктів, які пересуваються.

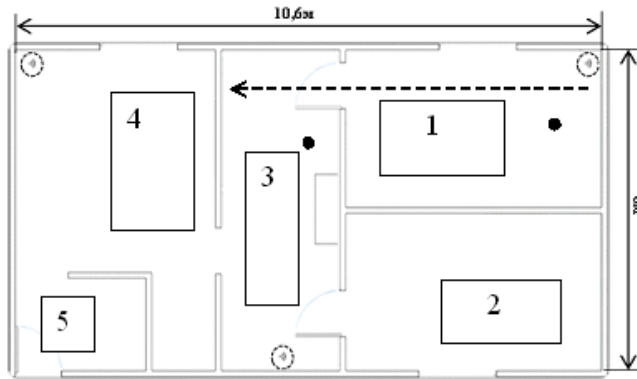


Рис. 2. План приміщення

Далі було створено макет приміщення і проведено калібрування радіо карти. Вимірювання проводились у вузлах умовної сітки 1,5 м x 1,5 м. На смартфоні, який використовується для досліду, було ввімкнено відео з Youtube для постійного передавання даних. При калібруванні смартфон знаходився на висоті 1 м від полу. Дистанція зберігалась у пікселях.

По результатах вимірювань видно, що зміна значень RSSI не завжди відповідає відстані від джерела і залежить від середовища. Як приклад, в таблиці 2 наведені усереднені значення RSSI від 700 вимірювань з лівого верхнього мікроконтролера для точок по горизонталі і вертикалі плану приміщення.

Таблиця 2

#### Результати вимірювань з лівого верхнього роутера

Відстань від роутера	Середнє значення RSSI
1 м вертикаль	-57.6271
2 м	-62.6551
3 м	-65.8900
4 м	-66.1984
1 м горизонталь	-53
2 м	-62
3 м	-56.5483
4 м	-61.9333

У випробуванні визначались позиції об'єкту у зонах приміщення, показаних на рисунку 2 прямокутниками 1-5. Варто зауважити, що через коливання потужності сигналу в часі вимірювання позиції навіть статичних об'єктів змінюються між інтервалами їх оновлення. Тому в таблиці 3 надано середні значення відхилень протягом 1 хв. Абсолютна похибка вимірювалася за такою формулою:

$$\varepsilon = \sqrt{\left( \frac{x_{\text{точка вимірювання}} * B_{\text{приміщення}}}{B_{\text{в пікселях}}} - \frac{x_{\text{результату}} * B_{\text{приміщення}}}{B_{\text{в пікселях}}} \right)^2 + \left( \frac{y_{\text{точка вимірювання}} * L_{\text{приміщення}}}{L_{\text{в пікселях}}} - \frac{y_{\text{результату}} * L_{\text{приміщення}}}{L_{\text{в пікселях}}} \right)^2} \quad (1)$$

Таблиця 3

## Середні відхилення позиції об'єкту від реальної

Номер зони вимірювань	1	2	3	4	5
	2,1 м	2,2 м	1,4 м	3,1 м	1,7 м

Результати таблиці 3 показують відповідність аналогічним системам, побудованим на базі точок доступу. Чорними кружечками на рисунку 2 показано дві позиції, визначені під час переміщення телефону в напрямі стрілки, що дозволяє отримати уявлення про траєкторію пересування об'єкту і також вкладається в межі середньої точності аналогічних систем.

**Висновки.** Відомі комерційні системи позиціонування по Wi-Fi, хоча і базуються на наявній інфраструктурі мережі передачі даних, але для забезпечення прийнятної точності висувають до неї додаткові вимоги, які потребують досить значних додаткових витрат на її модернізацію.

Запропонований підхід на основі використання IoT модулів в якості прослуховуючих пристроїв Wi-Fi мережі дозволяє зменшити додаткові витрати на систему позиціонування завдяки відсутності додаткових вимог до існуючої мережевої інфраструктури і її обладнання. В той же час підхід дозволяє забезпечити можливості позиціонування, аналогічні системам на базі точок доступу.

Експерименти, проведені на прототипі системи позиціонування, мали на меті тільки показати принципові можливості запропонованого підходу у порівнянні з WPS на базі точок доступу. Для побудови комерційної системи потрібно проводити додаткові експериментальні дослідження для врахування різних факторів, які впливають на точність позиціонування в залежності від задач позиціонування, таких як вплив різних типів клієнтських пристроїв і масштабу і особливостей приміщення, підбір оптимальних алгоритмів і інтервалів вимірювань, підбір кількості і розташування прослуховуючих пристроїв та ін. Всі ці питання не є специфічними для запропонованого підходу, їм присвячено достатньо опублікованих досліджень, результати яких слід використовувати при побудові комерційної системи позиціонування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Khaoula Manna, Noura Benhadjyoussef, Mohsen Machhout, Jesus Urena. Location and Positioning Systems: Performance and Comparison. Proceedings of 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT-2016) Tunisia, Hammamet, December, 16-18, 2016. 6 pages.
2. Huthaifa Obeidat, Wafa Shuaieb, Omar Obeidat, Raed Abd-Alhameed. A Review of Indoor Localization Techniques and Wireless Technologies. Published online: 19 February 2021. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11277-021-08209-5.pdf> (Дата звернення 15.05.2022)
3. Zahid Farid, Rosdiadee Nordin, and Mahamod Ismail. Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System Journal of Computer Networks and Communications Volume 2013, Article ID 185138, 12 pages. URL: <https://www.hindawi.com/journals/jcnc/2013/185138/> (Дата звернення 18.05.2022)
4. Horn Berthold K.P. Indoor Localization Using Uncooperative Wi-Fi Access Points. Sensors 2022, 22(8), 3091. URL: [https://www.researchgate.net/publication/360055519\\_Indoor\\_Localization\\_Using\\_Uncooperative\\_Wi-Fi\\_Access\\_Points](https://www.researchgate.net/publication/360055519_Indoor_Localization_Using_Uncooperative_Wi-Fi_Access_Points) (Дата звернення 18.05.2022)
5. Youssef M., Agrawala A. The Horus WLAN Location Determination System. Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Ser-

- vices (MobiSys 2005), June 6-8, 2005, Seattle, Washington, USA. 12 pages. URL: [https://www.cs.umd.edu/~moustafa/papers/horus\\_usenix.pdf](https://www.cs.umd.edu/~moustafa/papers/horus_usenix.pdf) (Дата звернення 18.05.2022)
6. Cisco Meraki. Location Analytics. Jan 5, 2022 URL: [https://documentation.meraki.com/MR/Monitoring\\_and\\_Reporting/Location\\_Analytics](https://documentation.meraki.com/MR/Monitoring_and_Reporting/Location_Analytics) (Дата звернення 11.05.2022)
7. Ekahau. The Solution to Design, Validate, and Maintain High-Performing Wi-Fi. URL: <https://www.ekahau.com/> (Дата звернення 05.05.2022)
8. Алексей Белоусов. Все о Cisco FastLocation. URL: <https://habr.com/ru/post/311722/> (Дата звернення 10.04.2022)
9. Peng Dai, Yuan Yang, Manyi Wang, and Ruqiang Yan. Combination of DNN and Improved KNN for Indoor Location Fingerprinting. *Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2019*, Article ID 4283857, 9 pages. URL: <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2019/4283857/> (Дата звернення 05.05.2022)
10. Marco Schwartz. *Internet of Things with ESP8266*. Packt Publishing, 2016, 226 pages.
11. Microchip. Microchip ENC28J60. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/ENC28J60#document-table> (дата звернення 20.05.2022).
12. МікроАмпер. RobotDyn UNO WIFI ESP2866 32Mb. URL: [https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=60&product\\_id=864&gclid=EAIaIQobChMI06q0t\\_yO-AIVDNiyCh0sYwWGEAYASABEgJMxvD\\_BwE](https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=60&product_id=864&gclid=EAIaIQobChMI06q0t_yO-AIVDNiyCh0sYwWGEAYASABEgJMxvD_BwE) (дата звернення 20.05.2022).

#### REFERENCES:

1. Khaoula Manna, Noura Benhadjyoussef, Mohsen Machhout, Jesus Urena. Location and Positioning Systems: Performance and Comparison. *Proceedings of 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT-2016) Tunisia, Hammamet, December, 16-18, 2016*. 6 pages.
2. Huthaifa Obeidat, Wafa Shuaieb, Omar Obeidat, Raed Abd-Alhameed. A Review of Indoor Localization Techniques and Wireless Technologies. Published online: 19 February 2021. Retrieved from: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11277-021-08209-5.pdf> (accessed 15.05.2022)
3. Zahid Farid, Rosdiadee Nordin, and Mahamod Ismail. Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System *Journal of Computer Networks and Communications Volume 2013*, Article ID 185138, 12 pages. Retrieved from: <https://www.hindawi.com/journals/jcnc/2013/185138/> (accessed 18.05.2022)
4. Horn Berthold K.P. Indoor Localization Using Uncooperative Wi-Fi Access Points. *Sensors* 2022, 22(8), 3091. Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/360055519\\_Indoor\\_Localization\\_Using\\_Uncooperative\\_Wi-Fi\\_Access\\_Points](https://www.researchgate.net/publication/360055519_Indoor_Localization_Using_Uncooperative_Wi-Fi_Access_Points) (accessed 18.05.2022)
5. Youssef M., Agrawala A. The Horus WLAN Location Determination System. *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2005)*, June 6-8, 2005, Seattle, Washington, USA. 12 pages. Retrieved from: [https://www.cs.umd.edu/~moustafa/papers/horus\\_usenix.pdf](https://www.cs.umd.edu/~moustafa/papers/horus_usenix.pdf) (accessed 18.05.2022)
6. Cisco Meraki. Location Analytics. Jan 5, 2022. Retrieved from: [https://documentation.meraki.com/MR/Monitoring\\_and\\_Reporting/Location\\_Analytics](https://documentation.meraki.com/MR/Monitoring_and_Reporting/Location_Analytics) (accessed 11.05.2022)
7. Ekahau. The Solution to Design, Validate, and Maintain High-Performing Wi-Fi. Retrieved from: <https://www.ekahau.com/> (accessed 05.05.2022)
8. Alexey Belousov (2016) Vse o Cisco FastLocation [All about Cisco FastLocation]. Retrieved from: <https://habr.com/ru/post/311722/> (accessed 10.04.2022)
9. Peng Dai, Yuan Yang, Manyi Wang, and Ruqiang Yan. Combination of DNN and Improved KNN for Indoor Location Fingerprinting. *Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2019*, Article ID 4283857, 9 pages. Retrieved from: <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2019/4283857/> (accessed 05.05.2022)

10. Marco Schwartz. Internet of Things with ESP8266. Packt Publishing, 2016, 226 pages.
  11. Microchip. Microchip ENC28J60. Retrieved from: <https://www.microchip.com/en-us/product/ENC28J60#document-table> (accessed 20.05.2022).
  12. MikroAmper. RobotDyn UNO WIFI ESP2866 32Mb. Retrieved from: [https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=60&product\\_id=864&gclid=EAIaIQobChMI06q0t\\_yO-AIVDNiyCh0sYwWGEAYYASABEgJMXvD\\_BwE](https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=60&product_id=864&gclid=EAIaIQobChMI06q0t_yO-AIVDNiyCh0sYwWGEAYYASABEgJMXvD_BwE) (accessed 20.05.2022).
-