

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-08>

УДК 004.73:621.396.946

Доценко Дмитро Володимирович, магістрант з комп'ютерної інженерії

<https://orcid.org/0009-0008-6689-6440>

Пузирьов Сергій Володимирович, канд. фіз.-мат. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-0520-1496>

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна

ПОБУДОВА ТЕПЛОВОЇ КАРТИ Wi-Fi ЗА ДОПОМОГОЮ ІОТ-МОДУЛЯ ESP8266

Доценко Д. В., Пузирьов С. В. Побудова теплової карти покриття Wi-Fi за допомогою ІоТ-модуля ESP8266.

У статті запропоновано концепт апаратно-програмного комплексу для побудування теплової карти Wi-Fi на базі ІоТ-модуля ESP8266 з вбудованим WiFi-модулем. На основі аналізу існуючих публікацій та відкритих проєктів було виявлено, що існуючі інструменти та рішення не дозволяють з достатньою точністю будувати теплові карти Wi-Fi. Також важливою проблемою є наявність артефактів та хибних зон, які потрібно відфільтрувати. Розроблено методику побудови теплової карти Wi-Fi-покриття в приміщенні на основі RSSI бездротової мережі. Сканування бездротових каналів включає пошук за SSID з опціональною фіксацією BSSID (щоб уникнути стрибків між радіомодулями з однаковою назвою мережі). Початкове положення визначається як найближча позиція до точки доступу і може бути довільною. Після фіксації положення запускається сканування приміщення за квадратною спіраллю з фіксованим кроком. Отримані дані зберігаються у форматі CSV через Serial-інтерфейс і одночасно передаються на сервер за протоколом MQTT у форматі JSON (формати можуть бути довільними). Візуалізація даних здійснюється за допомогою Python та відповідних бібліотек (NumPy/SciPy/Matplotlib) методом griddata із маскуванням країв. Передбачена побудова окремих карт для кожного BSSID. В результаті проведених експериментів було протестовано методику та апаратно-програмний комплекс для збору даних теплової карти. Виявлено досить суттєвий вплив на рівень та якість сигналу наявність сторонніх людей та предметів, особливо металічних саме поблизу точки доступу. Найбільш якісний результат було отримано по скануванню BSSID.

Ключові слова: бездротова мережа, моніторинг, ІоТ-пристрої, обмежене енергозабезпечення, тепла карта, Wi-Fi, ESP8266, RSSI, MQTT, griddata, BSSID/SSID, Python, NumPy, SciPy, Matplotlib, griddata

Dotsenko D., Puzyrov S. Construction of Wi-Fi coverage heat map using the ESP8266 IoT module.

The article proposes a concept of a hardware-software solution to build the Wi-Fi heat map based on the IoT-module ESP8266. Based on the analysis of existing publications and open projects, it was found that existing tools and solutions do not allow building WiFi heat maps with sufficient accuracy and artifact level. There was created a method to build an indoor WiFi heat map coverage based on the RSSI of a wireless network. Scanning wireless channels includes a search by SSID and optionally by BSSID to avoid hopping between radio modules with the same network. The initial position is defined as the closest position to the AP and can be arbitrary. After positioning fix the room scanning is started with the fixed step square spiral. The obtained data is stored in CSV format and simultaneously transmitted to the server as JSON via MQTT. Data visualization uses Python and NumPy/SciPy/Matplotlib with the edge masking griddata method. Also it is possible to build a BSSID WiFi heat map. The method and hardware-software solution were tested successfully to build a heat map. The influence on the heat map is significant from outsiders and metal objects. The highest quality result was obtained by BSSID scanning.

Keywords: wireless network, monitoring, IoT devices, limited power supply, heat map, Wi-Fi, ESP8266, RSSI, MQTT, griddata, BSSID/SSID, Python, NumPy, SciPy, Matplotlib, griddata.

Постановка наукової проблеми. Сучасне суспільство все більше залежить від якісного та стабільного бездротового доступу до Інтернету. Наявність Wi-Fi покриття у житлових приміщеннях, навчальних закладах, офісах та громадських місцях є необхідною умовою ефективної роботи інформаційних систем. Проте на практиці рівень сигналу Wi-Fi є нерівномірним через архітектурні особливості будівель, наявність перешкод, розташування маршрутизаторів та вплив зовнішніх чинників. Це призводить до «мертвих зон», де з'єднання нестабільне або відсутнє, що ускладнює користування мережевими сервісами.

Існуючі професійні рішення для аналізу WiFi-покриття (heatmap tools) здебільшого є дорогими, потребують спеціалізованого обладнання та не завжди доступні для широкого кола користувачів. Тому актуальною науково-практичною задачею є розробка доступного, компактного та мобільного інструменту для побудови теплових карт WiFi-сигналу, що дозволить оптимізувати розташування точок доступу й підвищити якість бездротових мереж.

У цьому контексті виникає проблема: як на основі малопотужних мікроконтролерів, зокрема ESP8266, реалізувати систему збору, обробки та візуалізації даних про інтенсивність WiFi-сигналу, яка забезпечити достатню точність вимірювань та наочність результатів при мінімальних витратах.

Наукова новизна полягає у поєднанні можливостей недорогого ІоТ-модуля ESP8266 з алгоритмами побудови теплових карт, що дозволяє створити портативний та масштабований засіб для моніторингу WiFi-покриття в різних умовах.

Аналіз досліджень. У роботах [1; 2] детально досліджено можливості ESP8266 щодо збору та обробки RSSI. У [1] розглядається вплив умов поширення сигналу та частоти вимірювань на якість отриманих даних. У [2] акцент зроблено на цифровій фільтрації сигналу, що є важливим для побудови більш точних теплових карт.

У [3] проведено порівняння різних модулів ESP8266. Результати показують, що апаратні особливості впливають на рівень сигналу, а отже, їх необхідно враховувати під час формування карти покриття.

У [4] пропонується програмний інструмент для генерації теплових карт Wi-Fi. Хоча він не базується на ESP8266, робота демонструє приклад підходу до автоматизованої візуалізації даних та може бути використана як орієнтир для подальшої інтеграції з дешевими сенсорами.

У [5] розроблено системний підхід до побудови тривимірних теплових карт на основі моделювання розповсюдження сигналу. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними підтверджує точність методу та демонструє перспективність інтеграції моделей з реальними вимірюваннями RSSI.

У [6] ілюструється застосування ESP8266 у багатовузлових системах для збору даних у реальному часі. Це підтверджує потенціал використання модулів не лише для побудови карт покриття, а й для масштабованих систем моніторингу.

У [7] демонструється можливість створення теплової карти Wi-Fi у вигляді DIY-рішення. Хоча він не має наукового аналізу точності, такий підхід показує практичну доступність ESP8266 для широкого кола користувачів і підкреслює необхідність формалізації методики збору та обробки даних.

У [8] представлено комплексний підхід до оптимізації WiFi-покриття з використанням ConvLSTM для прогнозування теплових карт, PSO для вибору оптимального розташування точок доступу та підкріплювального навчання для налаштування параметрів передавачів. Це демонструє можливість застосування машинного навчання не лише для аналізу, а й для активного керування мережею.

У [9] пропонується метод прогнозування покриття та пропускної здатності WiFi-мереж із використанням методів машинного навчання (англ. Machine Learning, ML). Модель дозволяє формувати теплові карти без повного фізичного сканування простору, що значно підвищує ефективність процесу.

У [10] описано систему прогнозування зон покриття маршрутизаторів Wi-Fi на основі варіаційних схованих марковських моделей. Такий підхід підвищує точність у складних умовах з численними перешкодами, де традиційні методи виявляються недостатніми.

У [11] досліджуються методи заповнення неповних карт покриття з використанням алгоритмів глибинного навчання. Це вирішує проблему просторової неповноти даних та дозволяє отримувати більш точні теплові карти навіть за обмеженої кількості вимірювань.

У [12] запропоновано нову архітектуру FasterKAN для задач WiFi-позиціонування в приміщеннях. Хоча головний акцент зроблено на локалізації користувачів, робота демонструє потенціал сучасних алгоритмів глибинного навчання для просторового аналізу сигналу, що має безпосередній зв'язок із побудовою теплових карт.

У [13] представлено огляд застосування машинного навчання у сфері Wi-Fi, включаючи задачі прогнозування покриття, оптимізації мереж та покращення якості з'єднання. Це підтверджує зростаючу роль ML у задачах аналізу та візуалізації бездротових мереж.

Аналіз публікацій показує, що ESP8266 є ефективним недорогим інструментом для збору RSSI та побудови WiFi-теплових карт [1–7]. Однак результати вимірювань часто потребують додаткової обробки й стандартизації. Паралельно, сучасні дослідження [8–13] демонструють широке застосування машинного навчання для прогнозування, оптимізації та інтерполяції теплових карт покриття. Це відкриває перспективи інтеграції ESP8266 із методами ML для створення більш точних, масштабованих і надійних систем моніторингу WiFi-мереж.

Метою статті є проєктування апаратно-програмного комплексу на основі ESP8266 для збору даних про рівень Wi-Fi сигналу за результатами дискретних вимірів RSSI на регулярній сітці координату у поєднанні з методами машинного навчання, що дозволить:

– зменшити похибку вимірювань, зумовлену нестабільністю RSSI та апаратними відмінностями модулів;

- відновлювати пропущені дані та формувати більш повні теплові карти покриття навіть при обмеженій кількості вимірювань;
- підвищити точність відображення реальної якості мережевого покриття порівняно з традиційними методами побудови теплових карт;
- забезпечити можливість масштабування системи для багатовузлових сценаріїв моніторингу у реальному часі.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації поставленої мети та досягнення завдань дослідження було обрано експериментально-аналітичний підхід із використанням мікроконтролера ESP8266 як основного апаратного засобу збору даних про рівень сигналу Wi-Fi.

Апаратна платформа. ESP8266 використовується як недорогий та енергоефективний вузол для вимірювання RSSI. Пристрій забезпечує можливість сканування доступних точок доступу та реєстрації рівня сигналу в обраному діапазоні координат. Для підвищення достовірності результатів передбачено усереднення даних за певну кількість повторних вимірювань у кожній точці.

Збір даних. Процес збору даних передбачає послідовне вимірювання рівня сигналу у контрольних точках із фіксацією їх просторових координат. Для цього використовується мобільний застосунок із вбудованим GPS-модулем або попередньо розмічена сітка в приміщенні. Усі дані передаються у форматі CSV/JSON для подальшої обробки.

Попередня обробка даних. Зібрані дані проходять етап попередньої обробки, що включає:

- видалення аномальних значень;
- цифрову фільтрацію сигналу (ковзне середнє, фільтр Калмана);
- нормалізацію RSSI до єдиного діапазону значень.

Застосування методів машинного навчання. Для побудови теплових карт пропонується використання таких підходів:

- 1) регресійні моделі – для прогнозування значень сигналу у точках, де відсутні вимірювання;
- 2) просторові алгоритми інтерполяції (IDW, Kriging) – як базові методи порівняння;
- 3) нейронні мережі (ConvLSTM, Variational HMM) – для моделювання просторово-часових закономірностей та підвищення точності карти покриття;
- 4) алгоритми виявлення аномалій (Isolation Forest) – для відсіву некоректних даних у процесі збору.

Візуалізація. Розроблене програмне забезпечення будує теплову карту WiFi-покриття у вигляді 2D-візуалізації з можливістю динамічного масштабування. Для розширених експериментів передбачено побудову 3D-карт покриття із використанням просторових моделей поширення сигналу.

Методика проведення експерименту

Завдання:

- 1) прийняти стартову позицію біля точки доступу як «нульову» координату (0;0) [1; 2];
- 2) виконати обхід за траєкторією квадратної спіралі всередині обмежувального прямокутника $X \in [-Nx; +Nx]$, $Y \in [-Ny; +Ny]$, $X \in [-Nx; +Nx]$, $Y \in [-Ny; +Ny]$ з кроками Δx , Δy , Δx , Δy [4; 5];
- 3) на кожній позиції виконати усереднення RSSI над M скануваннями [1; 2];
- 4) вивести результат у CSV та надіслати у MQTT; формат запису уніфікувати [14; 16];
- 5) на етапі обробки виконати інтерполяцію та згенерувати загальну карту і карти по кожному BSSID [5; 11].

Обмеження: застосовується діапазон 2,4 ГГц (ESP8266), підтримуються канали 12/13 (UA/EU) [18].

Апаратне забезпечення:

- плата: ESP8266 (NodeMCU 1.0 / ESP-12E) [3];
- середовище: Arduino IDE з ядром ESP8266;
- передавання даних: MQTT-брокер (Mosquitto), 0.0.0.0:1883 [16].

Програмне забезпечення:

- Python 3.10+;
- Numpy;
- Scipy;
- Matplotlib;
- Pandas;
- paho-mqtt.

Система координат. Початкова точка, найближча до точки доступу, приймається за (0;0). Подальші координати обчислюються за формулами (1). Координатні осі прив'язуються до «схід/північ» з незмінною орієнтацією під час вимірювання [3; 6].

Маршрут квадратної спіралі. Послідовність напрямків: East → North → West → South з довжинами відрізків 1, 1, 2, 2, 3, 3... клітинок. Перед кожним кроком Serial друкує команду типу «MOVE → EAST 1.00 m» [4; 7].

Збір RSSI. На кожній позиції виконується M незалежних сканів. Використовується фіксація BSSID для уникнення перемикань між різними модулями з однаковим SSID [6], [7]. Оптимальні параметри: $M = 10 - 20$, інтервал між – 150 мс.

Формат даних повинен бути одним із стандартних CSV та/або JSON. Для прикладу наведено представлення даних у форматі CSV:

timestamp, point_id, x, y, ssid, bssid, rssi_dbm, samples, device_id

Єдиний формат забезпечує конвеєр «ESP8266 → MQTT → файл → побудова карти» [14–16].

Реалізація системи

Мікропрограмне забезпечення ESP8266. Можливості:

- сканування з фіксацією BSSID;
- вивід у CSV через Serial;
- відправлення у MQTT як JSON [14–16];
- керування маршрутом квадратної спіралі;
- підтримку каналів 12/13 для UA/EU [18].

Налаштовувані параметри:

- TARGET_SSID;
- WIFI_SSID/PASS;
- MQTT_HOST/PORT/TOPIC/USER/PASS;
- HALF_NX/HALF_NY;
- STEP_X_M/STEP_Y_M;
- AVG_SAMPLES, PERIOD_MS;
- LOCK_BSSID

Передача даних по MQTT

MQTT-брокер (Mosquitto) [16] налаштований на порт 1883. Для першого запуску допускається *allow_anonymous=true*, надалі застосовується аутентифікація [14; 15]. На боці приймача працює скрипт-колектор, що зберігає записи у файл формату CSV. У лістингу 1 представлено простий MQTT-приймач на Python, який приймає дані від ESP8266 та зберігає дані у файл.

```
import json, csv
from paho.mqtt import client as mqtt

MQTT_HOST = "10.168.8.67"
MQTT_PORT = 1883
TOPIC = "wifi/heatmap"
OUT = "wifi_points.csv"

FIELDS = ["timestamp", "point_id", "x", "y", "ssid", "bssid", "rssi_dbm", "samples", "device_id"]
```

```

f = open(OUT, "w", newline="", encoding="utf-8")
w = csv.DictWriter(f, fieldnames=FIELDS)
w.writeheader()

def on_message(client, userdata, msg):
    try:
        d = json.loads(msg.payload.decode("utf-8"))
        row = {k: d.get(k, "") for k in FIELDS}
        w.writerow(row); f.flush()
        print(row)
    except Exception as e:
        print("bad msg:", e)

m = mqtt.Client()
m.on_message = on_message
m.connect(MQTT_HOST, MQTT_PORT, 60)
m.subscribe(TOPIC)
print("Collecting to", OUT, "from", TOPIC)
m.loop_forever()

```

Лістинг 1 – MQTT-приймач на мові Python.

Побудова теплової карти.

На етапі візуалізації використовується інтерполяція `scipy.interpolate.griddata` з методом `linear`. Щоб уникнути «нафарбованих» країв, які спираються на далеку екстраполяцію, вводиться маска відстані: для кожної точки сітки обчислюється відстань до найближчого вимірюваного пункту; значення, які перевищують порогове значення, задане параметром `dmask`, приховуються.

Для довідки, альтернативний підхід IDW (Inverse Distance Weighting) [5; 11] визначає оцінку $z(p)$ як $z(p) = \sum_i w_i z_i$, де $w_i = \frac{1}{\|p - p_i\|^k}$, де $k \in [1, 5; 3]$ – показник зменшення ваги з відстанню. У цій роботі достатньою виявилась `linear griddata`.

Результати експерименту**1. Загальна теплова карта**

На рис. 1 представлено приклад загальної теплової карти, побудованої у всіх просканованих точках. Помітні локальні зниження рівня RSSI, що корелюють із геометрією приміщення й екрануючими перешкодами.

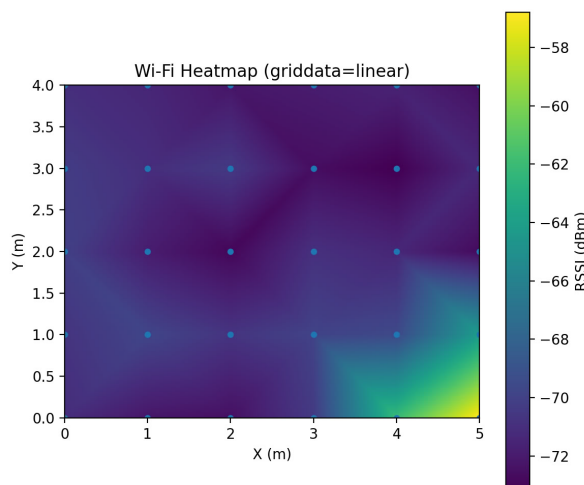


Рис. 1 – Загальна теплова карта за всіма даними;
кольорова шкала праворуч відображає RSSI у дБм (вищі значення – кращий рівень)

2. Теплова карта для окремого BSSID

Оскільки один SSID часто транслюють кілька радіомодулів (BSSID), доцільно формувати карти по кожному BSSID окремо. На рис. 2 видно більш «чистий» градієнт та очікувану анізотропію.

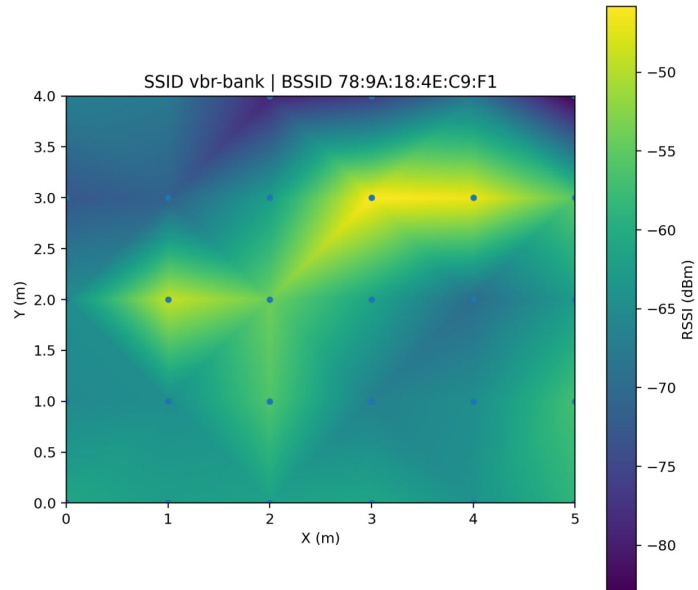


Рис. 2 – Теплова карта для конкретного BSSID;
 видимі вершини сигналу уздовж напрямків без значних перешкод

3. Датасет з рівнями сигналу

На рис. 3 приведено фрагмент CSV-датасету із зібраними під час сканування даними. Єдині назви полів та формат дозволяють безпосередньо використовувати файл як для побудови карт, так і для подальшої аналітики (наприклад, фільтрування по BSSID, статистики по зонах тощо).

```

wifi_points.csv | data
1 timestamp,point_id,x,y,ssid,bssid,rsi_dbm,samples,device_id
2 6879,P00,0.0,0.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-61.0,3,esp8266-01
3 13775,P01,1.0,0.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-62.3,3,esp8266-01
4 20465,P02,2.0,0.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-61.7,3,esp8266-01
5 26791,P03,3.0,0.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-61.0,3,esp8266-01
6 32993,P04,4.0,0.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-64.0,3,esp8266-01
7 39218,P05,5.0,0.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-58.7,3,esp8266-01
8 45413,P06,5.0,1.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-57.0,3,esp8266-01
9 51593,P07,4.0,1.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-64.7,3,esp8266-01
10 57825,P08,3.0,1.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-66.7,3,esp8266-01
11 64069,P09,2.0,1.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-56.0,3,esp8266-01
12 70263,P10,1.0,1.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-64.7,3,esp8266-01
13 76388,P11,0.0,1.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-65.3,3,esp8266-01
14 82511,P12,0.0,2.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-64.7,3,esp8266-01
15 88710,P13,1.0,2.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-49.0,3,esp8266-01
16 95051,P14,2.0,2.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-54.0,3,esp8266-01
17 101499,P15,3.0,2.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-61.3,3,esp8266-01
18 107702,P16,4.0,2.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-69.7,3,esp8266-01
19 113826,P17,5.0,2.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-62.7,3,esp8266-01
20 120115,P18,5.0,3.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-55.3,3,esp8266-01
21 126737,P19,4.0,3.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-46.7,3,esp8266-01
22 133048,P20,3.0,3.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-45.7,3,esp8266-01
23 139357,P21,2.0,3.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-62.3,3,esp8266-01
24 145644,P22,1.0,3.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-71.3,3,esp8266-01
25 151760,P23,0.0,3.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-72.7,3,esp8266-01
26 160547,P24,0.0,4.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-67.0,3,esp8266-01
27 166681,P25,1.0,4.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-68.0,3,esp8266-01
28 172914,P26,2.0,4.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-79.0,3,esp8266-01
29 179279,P27,3.0,4.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-76.0,3,esp8266-01
30 179219,P28,4.0,4.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-68.0,3,esp8266-01
31 179220,P29,5.0,4.0,vbr-bank,78:9A:18:4E:C9:F1,-83.0,3,esp8266-01
    
```

Рис. 3 – Приклад записів зі структурою «timestamp, point_id, x, y, ssid, bssid, rssi_dbm, samples, device_id»

Загальна карта демонструє просторово неоднорідний розподіл сигналу з прогнозованим посиленням у районі точки доступу (англ. Access Point, AP) та спадом у «тіньових» зонах, що підтверджує кореляцію покриття з плануванням приміщення й наявними перешкодами. Розділення вимірів за BSSID підвищує інтерпретованість: карти для окремих радіомодулів є стабільнішими та краще відбивають дійсні «горби» і «провали» покриття; отже, побудова по BSSID є доцільною для технічних рішень. Обрана дискретизація сітки та усереднення вимірів забезпечили достатню

гладкість інтерполяції без штучних артефактів; конвеєр «ESP8266 → MQTT → CSV → Python» підтвердив відтворюваність і придатність до масштабування. З практичної точки зору, результати вказують на конкретні ділянки для оптимізації: корекцію положення точки доступу, добір каналу/потужності та, за потреби, додавання додаткової AP у слабких секторах.

Обговорення та аналіз похибок

Основним джерелом похибок є відбивання радіохвиль від металевих поверхонь, шаф, побутова техніка та люди, внаслідок чого утворюються стоячі хвилі й локальні «провали» рівня RSSI. Тому для репрезентативності вимірювань рух у зоні сканування слід мінімізувати, а порядок обходу – зберігати незмінним.

Також за наявності кількох точок доступу з однаковим SSID можливе автоматичне перемикання між різними BSSID у сусідніх точках сітки. Це породжує «плями» на теплокарті та погіршує інтерпретацію. Фіксація першого коректного радіомодуля опцією «LOCK_BSSID» суттєво стабілізує картину й робить відбір даних послідовним.

На якість інтерполяції впливає і геометрія дискретизації. Надто великий крок збільшує частку «домислювання» між вимірами, а отже — і ризик артефактів. Практичним компромісом для приміщень площею близько 20–30 м² є крок 1 м за двома осями; він забезпечує достатню щільність без надмірного часу обходу.

Параметри усереднення визначають повторюваність результатів. Вибір AVG_SAMPLES = 12–20 із паузою 150–200 мс між скануваннями дає стійкі значення RSSI без істотного збільшення тривалості експерименту.

Також, слід враховувати регіональні налаштування радіоканалів. Для UA/EU увімкнення каналів 12/13 є критично важливим, оскільки чимало побутових точок доступу працюють саме там; без цього частина покриття залишиться невидимою для системи вимірювання.

Висновки

Запропонований апаратно-програмний комплекс та методика вимірювань забезпечують практичну оцінку WiFi-покриття на основі DIY рішень на базі ESP8266 без акселерометра та додаткових датчиків. Це дозволяє мінімізувати витрати, а простота алгоритмів сканування та побудови теплової карти дозволяє отримувати якісні теплові карти, яких буде достатньо для прийняття інженерних рішень: зміни розміщення точок доступу, корекції каналів, вибору напрямних антен тощо.

Дана методика та алгоритми легко масштабуються за рахунок збільшення щільності сітки та кількості зразків, що підвищує роздільну здатність і та відтворюваність результату.

Список бібліографічного опису

1. Rosli R. S., Habaebi M. H., Islam M. R. Characteristic analysis of received signal strength indicator from ESP8266 WiFi transceiver module. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2019. Vol. 8, No. 4. P. 1263–1270. DOI: 10.11591/eei.v8i4.1511.
2. Rosli R. S., Habaebi M. H., Islam M. R. Comparative analysis of digital filters for received signal strength indicator from ESP8266 WiFi transceiver module. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2019. Vol. 8, No. 4. P. 1271–1279. DOI: 10.11591/eei.v8i4.1512.
3. Chia Y. A., Arjadi Y., Chia Y. C. RSSI comparison of ESP8266 modules. *Proceedings of the 2019 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)*. 2019. P. 175–180. DOI: 10.1109/ICIMTech.2019.8843740.
4. Alrabaei S., та ін. Design and evaluation of Wi-Fi network heat map generator. *Proceedings of the International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*. 2025. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICCAIS.2025.xxxxxx.
5. Leira F. S., Brandal H., Rydningen A., Johansen T. A. A systematic approach to generate 3D path loss heat maps for Wi-Fi indoor coverage. *Proceedings*. 2022. Vol. 81, No. 1. P. 106. DOI: 10.3390/proceedings202208106.
6. Galluzzi P., Longo E., Redondi A. E. C., Cesana M. Occupancy estimation using low-cost Wi-Fi sniffers. *arXiv preprint*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1905.06809.
7. ElectroPeak. Create a Wi-Fi heat map using ESP8266 and Arduino. *ElectroPeak Tutorials*. 2020. URL: <https://electropeak.com/learn/wifi-heat-map-using-esp8266-arduino/> (Last accessed: 07.08.2025).
8. AI-powered optimization and security of wireless local area networks using ConvLSTM, PSO, reinforcement learning and anomaly detection. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 2. P. 7221–7230. DOI: 10.18201/ijisae.7221.
9. Predictive heatmaps for Wi-Fi network coverage and capacity using machine learning. *Technical Disclosure Commons*. 2025. URL: https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=9310&context=dpubs_series (Last accessed: 07.08.2025).

10. Wi-Fi router signal coverage position prediction system using machine learning algorithms. ResearchGate Preprint. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/372207905_Wi-Fi_Router_Signal_Coverage_Position_Prediction_System_using_Machine_Learning_Algorithms (Last accessed: 07.08.2025).
11. Filling in incomplete wireless coverage maps with machine learning. ScholarSpace, University of Hawai'i. 2023. URL: <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstreams/db233c81-a9aa-4737-b26d-4d9bdc13e5b7/download> (Last accessed: 07.08.2025).
12. FasterKAN based Wi-Fi indoor positioning system. ES Materials & Manufacturing. 2025. Vol. 15, No. 2. P. 1289–1298. DOI: 10.30919/esmm5f1289.
13. Wi-Fi meets machine learning: A comprehensive survey. arXiv preprint. 2021. arXiv:2109.04786. DOI: 10.48550/arXiv.2109.04786.
14. Banks A., Gupta R. MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard. 2014. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html> (Last accessed: 07.08.2025).
15. Banks A., Briggs E., Borgendale K., Gupta R. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 2019. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html> (Last accessed: 07.08.2025).
16. Eclipse Foundation. Eclipse Mosquitto – An open source MQTT broker. 2025. URL: <https://mosquitto.org> (Last accessed: 07.08.2025).
17. Hunkeler U., Truong H. L., Stanford-Clark A. MQTT-S – A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE). 2008. P. 791–798. DOI: 10.1109/COMSWA.2008.4554519.
18. Naik N. Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. Proceedings of the IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE). 2017. P. 1–7. DOI: 10.1109/SysEng.2017.8088251.

References

1. Rosli R. S., Habaebi M. H., Islam M. R. Characteristic analysis of received signal strength indicator from ESP8266 WiFi transceiver module. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2019. Vol. 8, No. 4. P. 1263–1270. DOI: 10.11591/eei.v8i4.1511.
2. Rosli R. S., Habaebi M. H., Islam M. R. Comparative analysis of digital filters for received signal strength indicator from ESP8266 WiFi transceiver module. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2019. Vol. 8, No. 4. P. 1271–1279. DOI: 10.11591/eei.v8i4.1512.
3. Chia Y. A., Arjadi Y., Chia Y. C. RSSI comparison of ESP8266 modules. Proceedings of the 2019 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech). 2019. P. 175–180. DOI: 10.1109/ICIMTech.2019.8843740.
4. Alrabae S., etc. Design and evaluation of Wi-Fi network heat map generator. Proceedings of the International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS). 2025. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICCAIS.2025.xxxxxx.
5. Leira F. S., Brandal H., Rydningen A., Johansen T. A. A systematic approach to generate 3D path loss heat maps for Wi-Fi indoor coverage. Proceedings. 2022. Vol. 81, No. 1. P. 106. DOI: 10.3390/proceedings202208106.
6. Galluzzi P., Longo E., Redondi A. E. C., Cesana M. Occupancy estimation using low-cost Wi-Fi sniffers. arXiv preprint. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1905.06809.
7. ElectroPeak. Create a Wi-Fi heat map using ESP8266 and Arduino. ElectroPeak Tutorials. 2020. URL: <https://electropeak.com/learn/wifi-heat-map-using-esp8266-arduino/> (Last accessed: 07.08.2025).
8. AI-powered optimization and security of wireless local area networks using ConvLSTM, PSO, reinforcement learning and anomaly detection. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering. 2024. Vol. 12, No. 2. P. 7221–7230. DOI: 10.18201/ijisae.7221.
9. Predictive heatmaps for Wi-Fi network coverage and capacity using machine learning. Technical Disclosure Commons. 2025. URL: https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=9310&context=dpubs_series (Last accessed: 07.08.2025).
10. Wi-Fi router signal coverage position prediction system using machine learning algorithms. ResearchGate Preprint. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/372207905_Wi-Fi_Router_Signal_Coverage_Position_Prediction_System_using_Machine_Learning_Algorithms (Last accessed: 07.08.2025).
11. Filling in incomplete wireless coverage maps with machine learning. ScholarSpace, University of Hawai'i. 2023. URL: <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstreams/db233c81-a9aa-4737-b26d-4d9bdc13e5b7/download> (Last accessed: 07.08.2025).
12. FasterKAN based Wi-Fi indoor positioning system. ES Materials & Manufacturing. 2025. Vol. 15, No. 2. P. 1289–1298. DOI: 10.30919/esmm5f1289.
13. Wi-Fi meets machine learning: A comprehensive survey. arXiv preprint. 2021. arXiv:2109.04786. DOI: 10.48550/arXiv.2109.04786.
14. Banks A., Gupta R. MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard. 2014. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html> (Last accessed: 07.08.2025).
15. Banks A., Briggs E., Borgendale K., Gupta R. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 2019. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html> (Last accessed: 07.08.2025).
16. Eclipse Foundation. Eclipse Mosquitto – An open source MQTT broker. 2025. URL: <https://mosquitto.org> (Last accessed: 07.08.2025).
17. Hunkeler U., Truong H. L., Stanford-Clark A. MQTT-S – A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE). 2008. P. 791–798. DOI: 10.1109/COMSWA.2008.4554519.
18. Naik N. Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. Proceedings of the IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE). 2017. P. 1–7. DOI: 10.1109/SysEng.2017.8088251.