



DOI 10.28925/2663-4023.2025.29.920

УДК 004.052

Соколов Володимир Юрійович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурачка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0002-9349-7946
v.sokolov@kubg.edu.ua

**ТЕХНОЛОГІЯ ВІДСЛІДКУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ АБОНЕНТІВ
ТЕРИТОРІЄЮ ПІДПРИЄМСТВА КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

Анотація. У статті розглядається актуальна проблема забезпечення надійного позиціонування абонентів на об'єктах критичної інфраструктури в умовах можливого спуфінгу або глушіння GPS-сигналів. Запропоновано інноваційну методику відслідковування переміщення абонентів за допомогою технології Bluetooth Low Energy (BLE) маячків як ефективної альтернативи супутниковому позиціонуванню. Основою розробленої системи є мережа стратегічно розміщених BLE-маячків, які передають попередньо встановлені GPS-координати через дані у рекламних пакетах з оптимальним інтервалом 100 мс, що забезпечує баланс між точністю та енергоспоживанням. Для практичної реалізації експерименту використовувалося загальнодоступне апаратне забезпечення на базі мікроконтролерів ESP32 з вбудованими OLED-дисплеями, що демонструє доступність та економічну ефективність рішення. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для передавачів (маячків) та приймача (абонента) з реалізацією комплексу алгоритмів позиціонування, включаючи методи триангуляції з градієнтним спуском, адаптивний фільтр Калмана та метод зважених найменших квадратів (WLS). Система також включає веб-інтерфейс для відображення результатів у реальному часі та API для інтеграції з існуючими системами безпеки. Експериментальні дослідження проводилися в реальних умовах приміщення площею 110 м² з підвищеною щільністю розміщення маячків (один на 15 м²) та наявністю близько 20 активних BLE-пристроїв для моделювання типового офісного середовища. Проведено детальне калібрування системи з визначенням стандартного загасання сигналу на рівні мінус 83 дБмВт на основі більше 3 тис. вимірювань. Результати показали, що для стаціонарних об'єктів система забезпечує задовільну точність позиціонування 1–2 метри без застосування додаткових цифрових фільтрів, тоді як для рухомих абонентів необхідне використання фільтра Калмана та WLS, що збільшує обчислювальне навантаження на мікроконтролер на 30–35%, але суттєво покращує якість трекінгу. Система успішно демонструє можливість створення автономного високоточного позиціонування в умовах відсутності або ненадійності супутникових сигналів з використанням доступних технологій та стандартних компонентів.

Ключові слова: BLE-маячки; внутрішнє позиціонування; критична інфраструктура; триангуляція; фільтр Калмана; ESP32; RSSI; GPS-спуфінг.

ВСТУП

Внутрішнє позиціонування за допомогою BLE-маячків є широко дослідженим рішенням для визначення місцезнаходження всередині будівель, особливо там, де сигнал системи глобального позиціонування 'Global Positioning System' (GPS) неефективний. Позиціонування в центрі приміщень, таких як великі кімнати або відкриті простори, базується на стратегічному розміщенні та використанні маячків BLE, обробці сигналів та відповідних алгоритмах для досягнення точності та надійності. Завдяки низькому енергоспоживанню, компактності та високій точності, BLE маячки дозволяють створювати гнучкі та економічно ефективні рішення для навігації та відстеження об'єктів у реальному часі, що робить її привабливою для досліджень та практичного



впровадження. Незважаючи на значний потенціал, технологія позиціонування на основі BLE стикається з низкою викликів, зокрема впливом шумів, багатошляховим поширенням сигналу та необхідністю оптимізації алгоритмів для підвищення точності. Ці проблеми потребують комплексного підходу до аналізу та вдосконалення методів обробки даних, що надходять від маячків. Метою даної роботи є розробка методу для вирішення проблеми позиціонування абонентів на об'єктах критичної інфраструктури, а також пропонуються технічні рішення на загальнодоступному апаратному забезпеченні.

Постановка проблеми. Для контролю переміщення по території підприємств критичної інфраструктури та всередині будівель через забезпечення безпеки може використовуватися спуфінг сигналів супутникових сузір'їв глобального позиціонування. В такому режимі роботи застосування стандартних методів позиціонування ускладнюється, навіть якщо системи спуфінгу працюють нерегулярно. Тому для забезпечення трекінгу співробітників, транспорту та обладнання можна використовувати системи локального забезпечення позиціонування. Для цього можна використовувати технології локального розгортання, наприклад, в загальнодоступних частотних діапазонах та із застосуванням безпроводових існуючих технологій. Але для забезпечення інтеграції з існуючими системами можна використовувати передавання тих самих GPS-координат, але із застосуванням інших безпроводових технологій.

Розробка і впровадження комплексу заходів з інформаційної безпеки та геопозиціонування абонентів на території об'єктів критичної інфраструктури дозволяє забезпечити систему автономного позиціонування в умовах глушіння супутникових сигналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У попередніх дослідженнях [1] і [2] були розглянуті питання стійкості низькоенергетичних BLE-маячків до атаки з глушенням та моделювання атаки «людина посередині» на низькоенергетичних бездротових пристроях з використанням програмно-визначеного радіо. В роботах [3] – [6] розглянуті методи трилатерація та мультилатерація для оцінки положення пристрою шляхом вимірювання відстаней від декількох маячків за допомогою сили прийнятого сигналу (RSSI). Інший підхід використовує заздалегідь зібрану карту потужності сигналу, так звані, «відбитки пальців» в різних місцях. Він ефективний для складних середовищ і може забезпечити високу точність, але вимагає початкового картографування і чутливий до змін навколишнього середовища [7] – [9]. З іншого боку, поєднання педестрового навігаційного розрахунку 'pedestrian dead reckoning' з даними маячків BLE може виправити дрейф і підвищити точність, особливо в центрі великих приміщень [10] – [12]. Сучасні дослідження вказують на активний пошук універсального рішення, але точність визначення положення абонента лишається досить низькою.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

У даній статті проведено експериментальне дослідження системи позиціонування на основі BLE-маячків для об'єктів критичної інфраструктури. Об'єктом дослідження є процес визначення координат абонентів в умовах можливого впливу на супутникові системи позиціонування. Для проведення експерименту була розроблена система з використанням восьми BLE-маячків та одного приймача на базі ESP32, розміщених в приміщенні площею 110 м². Методика включає калібрування взаємного впливу маячків та абонента на відстані одного метра, розробку алгоритмів тріангуляції з застосуванням градієнтного спуску, фільтра Калмана та методу зважених найменших квадратів, а також аналіз точності позиціонування для стаціонарних та рухомих об'єктів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Схема експерименту

Для нашого експерименту була обрана система із застосуванням BLE-маячків, які передають через однакові проміжки часу свої GPS-координати, які попередньо визначені та встановлені. Кожен маячок прив'язаний безпосередньо до свого поточного місцезнаходження та не має GPS-приймачів. При потребі перенесення маячка в нього прописуються нові GPS-координати.

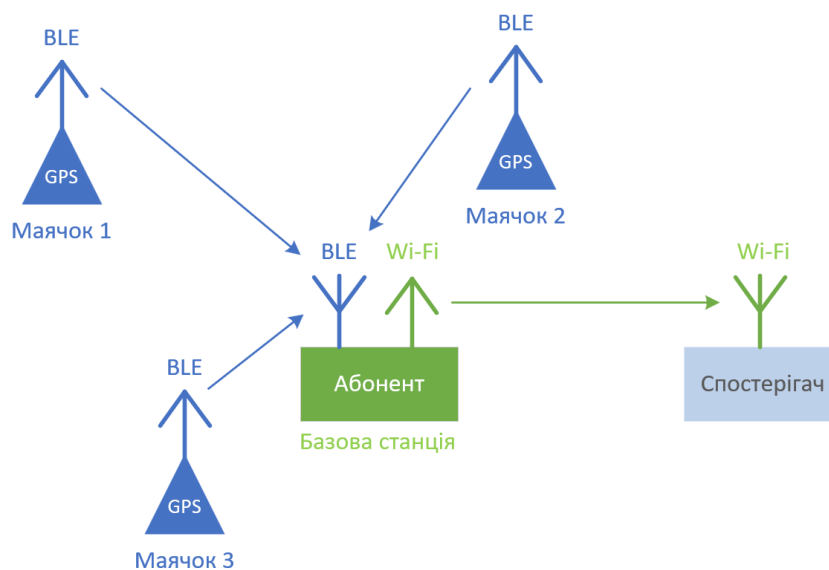


Рис. 1. Схема експерименту

Спостерігач отримує дані із затримкою на час формування JSON-відповідей та оновлення сторінки, але не довше однієї секунди.

Точність та фактори навколишнього середовища

Точність знижується через багатопроміньове затухання, перешкоди та інтерференції, що є типовим для центральних зон великих приміщень. Адаптивні алгоритми та попередня обробка сигналу можуть допомогти зменшити ці ефекти [13], [14].

В [14] і [15] в реальних умовах можна досягти середньої похибки 1–2 метри (точність може знижуватися в переповнених або складних просторах), що відповідає результатам експерименту без застосування додаткової фільтрації.

Розміщення та щільність маячків

Точність позиціонування в центрі приміщень залежить від щільності маячків та їх стратегічного розміщення. Щільність одного маячка на 30–40 м² часто називають балансом між вартістю та точністю, при цьому за межами цієї межі спостерігається зменшення віддачі [8], [14], [16], [17]. Відомі алгоритми та інструменти для оптимізації розміщення маячків з урахуванням потреб у покритті та локалізації, а також для мінімізації кількості маячків, необхідних для однозначного позиціонування [16], [17]. Для нашого експерименту розгортання мережі маячків буде більш щільним, приблизно один на 15 м², але розташування проводилося лише із розрахунків зручності, тому на деяких участках одночасно було доступні від трьох до восьми пристроїв. Точність покращується з збільшенням кількості маячків та їх ретельним розміщенням, особливо в центрі простору, але на неї впливають перешкоди сигналу та фактори навколишнього середовища.

Вибір апаратного забезпечення

В якості апаратної платформи була вибрана ESP32 із пристроями, які мають вбудовані OLED (див. табл. 1), достатньої для відображення переданих та отриманих даних для спрощення об'єктивного контролю та проведення експерименту.

Таблиця 1

Порівняння апаратного забезпечення ESP32 для експерименту

Параметр	LILYGO® TTGO T-Display [18]	ABRobot ESP32-C3 0.42 OLED [19]
Роль	Абонент	Маячок (×8)
Мікроконтролер	ESPRESSIF-ESP32 Xtensa® dual-core 32-bit LX6	RISC-V SoC
Тактова частота, МГц	240	160
ПЗП, МБ	4	4
ОЗП, кБ	520	400
Розширення дисплею	135×240	72×40
Тип антени	планарна	керамічна

Для забезпечення сталої роботи системи кількість маячків обмежена вісьмома. На рис. 2 показаний приклад абонента із інформацією про отримані пакети та поточне місцезнаходження, а також маячок. Так як передавач та приймач знаходяться в ближній зоні, тому втрачені пакети призводять до зниження якості та вказано якість на рівні «FAIR», хоча рівень отриманого пакету склав мінус 39 дБмВт.



Рис. 2. Приклад реалізації абонента та маячка

На емуляторі абонента піднімається Wi-Fi точка доступу, а також веб-сервер із дуже простою веб-сторінкою (див. рис. 3), яка оновлюється кожен раз після розрахунку координат. Так як розрахунки тріангуляції, точка доступу та веб-сервер значно навантажують процесор приймача, тому для коректної роботи краще застосовувати варіанти ESP32 плат без додаткового екрану, бо обов'язково має використовуватися разом із додатковим радіатором.



ESP32 GPS

Kalman: OFF | WLS: OFF | RSSI Cal: OFF

Lat: 50.914500, Lon: 7.564729

Algorithm: Enhanced trilateration with distance smoothing and reliability weighting

ID	DateTime	Lat	Lon	Sources
9	2025-07-27T20:22:00.000Z	50.914500	7.564729	98:88:e0:ee:61:7e (50.914456, 7.564645, -73dBm, 0.50m, 174s, σ^2 :27.2, R:0.42) 98:88:e0:e7:83:6e (50.914512, 7.564674, -50dBm, 0.10m, 175s, σ^2 :1.0, R:0.95) 98:88:e0:e7:9a:7e (50.914476, 7.564723, -82dBm, 1.05m, 171s, σ^2 :31.3, R:0.39) 98:88:e0:e7:7d:b2 (50.914460, 7.564816, -72dBm, 0.37m, 175s, σ^2 :11.7, R:0.63) 98:88:e0:e7:75:a6 (50.914540, 7.564773, -71dBm, 0.35m, 174s, σ^2 :9.8, R:0.67) 50:78:7d:42:31:ea (50.914544, 7.564666, -89dBm, 1.61m, 37s, σ^2 :4.7, R:0.81) 98:88:e0:e7:96:da (50.914548, 7.564802, -88dBm, 1.68m, 11s, σ^2 :7.7, R:0.72)
8	2025-07-27T20:22:00.000Z	50.914500	7.564729	98:88:e0:ee:61:7e (50.914456, 7.564645, -70dBm, 0.36m, 172s, σ^2 :3.8, R:0.84) 98:88:e0:e7:83:6e (50.914512, 7.564674, -49dBm, 0.10m, 173s, σ^2 :2.2, R:0.90) 98:88:e0:e7:9a:7e (50.914476, 7.564723, -82dBm, 1.03m, 169s, σ^2 :31.3, R:0.39) 98:88:e0:e7:7d:b2 (50.914460, 7.564816, -72dBm, 0.42m, 173s, σ^2 :14.3, R:0.58) 98:88:e0:e7:75:a6 (50.914540, 7.564773, -73dBm, 0.40m, 172s, σ^2 :17.0, R:0.54) 50:78:7d:42:31:ea (50.914544, 7.564666, -89dBm, 1.74m, 36s, σ^2 :3.3, R:0.86) 98:88:e0:e7:96:da (50.914548, 7.564802, -89dBm, 1.83m, 10s, σ^2 :7.2, R:0.74)
7	2025-07-27T20:22:00.000Z	50.914500	7.564729	98:88:e0:ee:61:7e (50.914456, 7.564645, -76dBm, 0.57m, 167s, σ^2 :48.8, R:0.29) 98:88:e0:e7:83:6e (50.914512, 7.564674, -48dBm, 0.10m, 168s, σ^2 :3.3, R:0.86) 98:88:e0:e7:9a:7e (50.914476, 7.564723, -80dBm, 0.71m, 164s, σ^2 :26.0, R:0.43) 98:88:e0:e7:7d:b2 (50.914460, 7.564816, -72dBm, 0.36m, 168s, σ^2 :7.2, R:0.74) 98:88:e0:e7:75:a6 (50.914540, 7.564773, -72dBm, 0.40m, 167s, σ^2 :11.5, R:0.63) 50:78:7d:42:31:ea (50.914544, 7.564666, -86dBm, 1.42m, 31s, σ^2 :0.3, R:0.99) 98:88:e0:e7:96:da (50.914548, 7.564802, -90dBm, 1.83m, 8s, σ^2 :1.8, R:0.92)

Рис. 3. Приклад веб-сторінки із результатами вимірювання

Так як результати вимірів важко акумулювати на абоненті, тому дані розрахунків передаються у вигляді JSON пакетів, які зберігаються в локальному сховищі браузера, приклад представлений на лістингу 1.

Лістинг 1. Формат відповіді JSON-форматі

```
[
  {
    "id": "9",
    "mac": "00:00:00:00:00:00",
    "dateTime": "2025-07-27T20:22:00.000Z",
    "latitude": 50.9145,
    "longitude": 7.564729,
    "kalmanEnabled": false,
    "wlsEnabled": false,
    "rssiCalibration": false,
    "sources": [
      {
        "mac": "98:88:e0:ee:61:7e",
        "latitude": 50.914456,
        "longitude": 7.564645,
        "rssi": -73,
        "distance": 0.498341,
        "samples": 174,
        "variance": 27.2,
        "reliability": 0.423729
      },
      {
        "mac": "98:88:e0:e7:83:6e",
        "latitude": 50.914512,
        "longitude": 7.564674,
```



```
"rssi": -50,  
"distance": 0.1,  
"samples": 175,  
"variance": 1,  
"reliability": 0.952381  
},  
<...>  
]  
}  
]
```

Для даного експерименту стандартні протоколи (наприклад, GeoJSON) обміну геопозиційними даними не були задіяні через потребу в розширеному представленні даних про задіяні маячки.

Калібрування взаємного впливу маячка та абонента

Відстань до маячка обчислюється за формулою загасання радіосигналу у вільному просторі:

$$d = 10^{\frac{P_{TX} - P_{RSSI}}{10n}}, \quad (1)$$

де d — відстань до маячка, метри; P_{TX} — потужність передавача на відстані 1 м, або стандартне загасання, дБмВт; P_{RSSI} — виміряна потужність сигналу, дБмВт; n — показник загасання середовища [20].

Калібрування на відстані одного метра дозволяє уточнити стандартне загасання P_{TX} (яке складає мінус 59 дБмВт для напівхвильового диполя). Виявилося, що для різних маячків вийшло різне значення через неточність збірки, тому для визначення стандартного загасання був проведений експеримент із трьома маячками із керамічними антенами та абонентом із планарною антеною, які були розташовані в горизонтальній площині для узгодження за поляризацією. За результатами 3162 вимірів було визначене середнє значення у мінус (83,11±3,45) дБмВт (а також були розраховані медіана мінус 83,00 дБмВт і мода мінус 81 дБмВт, яке відповідає 16,5% від повної послідовності). Тому в якості стандартного загасання для поточного експерименту було обране значення у мінус 83 дБмВт.

Підготовка програмного забезпечення передавача

Код реалізує GPS-маячок на базі мікроконтролера ESP32C3, який передає координати через BLE та відображає інформацію на OLED-дисплеї. Пристрій працює як BLE-маячок, постійно транслюючи GPS-координати (див. лістинг 2) у спеціальному форматі через manufacturer-specific data в BLE-рекламних пакетах.

Лістинг 2. Функція формування пакету із координатами

```
void init_advertising() {  
    pAdvertising = BLEDevice::getAdvertising();  
    pAdvertising->stop();  
    BLEAdvertisementData advData;  
  
    // Створюємо специфічні дані виробника  
    uint8_t manufacturerData[12];  
    uint16_t manufacturerId = 0xFFFF; // Використовуємо 0xFFFF  
    manufacturerData[0] = manufacturerId & 0xFF;  
    manufacturerData[1] = (manufacturerId >> 8) & 0xFF;
```



```
// Конвертуємо float у представлення з фіксованою комою (множимо на 1000000
для збереження 6 знаків після коми)
int32_t latInt = (int32_t)(LATITUDE * 1000000);
int32_t lonInt = (int32_t)(LONGITUDE * 1000000);

// Кодуємо широту (4 байти)
manufacturerData[2] = latInt & 0xFF;
manufacturerData[3] = (latInt >> 8) & 0xFF;
manufacturerData[4] = (latInt >> 16) & 0xFF;
manufacturerData[5] = (latInt >> 24) & 0xFF;

// Кодуємо довготу (4 байти)
manufacturerData[6] = lonInt & 0xFF;
manufacturerData[7] = (lonInt >> 8) & 0xFF;
manufacturerData[8] = (lonInt >> 16) & 0xFF;
manufacturerData[9] = (lonInt >> 24) & 0xFF;

// Кодуємо версію (MAJOR.MINOR)
manufacturerData[10] = MAJOR;
manufacturerData[11] = MINOR;

// Конвертуємо дані виробника в Arduino String
String manufacturerString = String();
for (size_t i = 0; i < sizeof(manufacturerData); i++) {
    manufacturerString += (char)manufacturerData[i];
}

// Встановлюємо специфічні дані виробника
advData.setManufacturerData(manufacturerString);

// Додаємо UUID service
advData.setCompleteServices(BLEUUID(SERVICE_UUID));

// Встановлюємо дані
pAdvertising->setAdvertisementData(advData);

// Встановлюємо канали реклами (37, 38, 39)
pAdvertising->setMinPreferred(0x06);
pAdvertising->setMaxPreferred(0x06);

// Встановлюємо інтервал (100 мс)
pAdvertising->setMinInterval(0xA0); // 100мс в одиницях по 0.625мс
pAdvertising->setMaxInterval(0xA0);

pAdvertising->start();
}
```

Створюється 12-байтовий масив для передачі GPS-даних:

- ID виробника 0xFFFF для тестування (перші 2 байти);
- широта, конвертована в ціле число шляхом множення на 1 000 000 (4 байти);
- довгота в аналогічному форматі (4 байти);
- версія прошивки MAJOR.MINOR (останні 2 байти).

Координати конвертуються з формату float у 32-бітні цілі числа для компактної передачі. Це дозволяє зберегти точність до шести знаків після коми при значно меншому розмірі даних. Кожна координата розбивається на чотири байти з використанням бітових



операцій. Також налаштовуються 37, 38 і 39 стандартні BLE-канали і встановлюється інтервал відправки 100 мс для балансу між енергоспоживанням та швидкістю виявлення.

Використовується шрифт *u8g2_font_4x6_tr* для компактного відображення максимальної кількості інформації. Код оптимізований для мінімального енергоспоживання — BLE-реклама працює автономно, а основний цикл містить лише оновлення дисплея з невеликою затримкою. Також структура коду дозволяє легко додати реальний GPS-модуль замість статичних координат, а також розширити пакет додатковою інформацією.

Підготовка програмного забезпечення абонента

Код абонента реалізує систему внутрішнього позиціонування ‘indoor positioning system’ також на базі мікроконтролера ESP32. Система призначена для визначення координат приймача шляхом аналізу сигналів від стаціонарних BLE передавачів з відомими координатами. Система включає основні компоненти: BLE сканер для прийому сигналів від маячків, алгоритм тріангуляції для обчислення позиції, фільтр Калмана для згладжування координат, веб-інтерфейс для відображення результатів та Wi-Fi точку доступу для зв’язку із спостерігачем.

Система підтримує декілька режимів роботи, які контролюються препроцесорними директивами та основними параметрами:

```
#define USE_KALMAN_FILTER false // Увімкнення фільтра Калмана
#define USE_WEIGHTED_LEAST_SQUARES false // Використання зваженого найменшого
квадрата 'weighted least square' (WLS)
#define USE_RSSI_CALIBRATION false // Калібрування RSSI

TX_POWER_DBM = -83.0f // Потужність передавача на відстані 1 метр (із
попереднього експерименту)
PATH_LOSS_EXPONENT = 2.5f // Показник загасання сигналу
DISTANCE_SMOOTHING_ALPHA = 0.3f // Коефіцієнт експоненційного згладжування
MIN_DEVICES_FOR_TRILATERATION = 3 // Мінімальна кількість маячків для
тріангуляції
MAX_DISTANCE_THRESHOLD = 10.0f // Максимальна відстань до маячка
```

Для статистичного аналізу сигналу використовується ковзне вікно RSSI значень:

```
struct RSSIWindow {
    int8_t values[RSSI_WINDOW_SIZE]; // Масив значень RSSI
    uint8_t index; // Поточний індекс
    uint8_t count; // Кількість зразків
}
```

При увімкненому калібруванні застосовуються корекційні коефіцієнти:

```
if (distance < 1.0f) {
    distance *= 0.8f; // Близькі відстані переоцінюються
} else if (distance > 5.0f) {
    distance *= 1.2f; // Далекі відстані недооцінюються
}
```

Для зменшення впливу шуму застосовується експоненційне згладжування:

$$d_{\text{smooth}}(n) = \alpha \cdot d(n) + (1 - \alpha)d_{\text{smooth}}(n - 1), \quad (2)$$

де $\alpha = 0,3$ — коефіцієнт згладжування.



Якість сигналу оцінюється на основі середнього RSSI та дисперсії:

- EXCELLENT: RSSI > -80 дБмВт і дисперсія < 25;
- GOOD: RSSI > -85 дБмВт і дисперсія < 40;
- FAIR: RSSI > -90 дБмВт і дисперсія < 60;
- POOR: інші випадки.

В попередньому експерименті показаний приклад гарного рівні сигналу, але низької дисперсії, тому рівень вказаний, як «FAIR».

Вага кожного маячка для алгоритмів позиціонування обчислюється як

$$w = (w_{\text{RSSI}} k_{\text{RSSI}} + w_{\text{stability}} k_{\text{stability}} + w_{\text{reliability}} k_{\text{reliability}}) w_{\text{age}} w_{\text{samples}}, \quad (3)$$

де $w_{\text{RSSI}} = \frac{1}{1+e^{\frac{-\text{RSSI}+85}{5}}}$ — вага на основі сили сигналу, $w_{\text{stability}} = \frac{1}{1+\text{variance}/30}$ — вага на основі стабільності, $w_{\text{age}} = e^{\frac{t_{\text{last}}-t_{\text{current}}}{1000}}$ — вага на основі давності, $w_{\text{samples}} = \min(1, \text{samples}/3)$ — вага на основі кількості зразків.

При недостатній кількості маячків використовується зважений центроїд:

$$\begin{aligned} x &= \sum_i x_i w_i / \sum_i w_i, \\ y &= \sum_i y_i w_i / \sum_i w_i, \end{aligned} \quad (4)$$

де (x_i, y_i) — координати i -го маячка, w_i — його вага.

Основний алгоритм мінімізує функцію похибки методом градієнтного спуску:

$$F(x, y) = \sum_i w_i \left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - d_i \right)^2. \quad (5)$$

Градієнт функції:

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dx} &= 2 \sum_i w_i (dist_i - d_i) \frac{x - x_i}{dist_i}, \\ \frac{dF}{dy} &= 2 \sum_i w_i (dist_i - d_i) \frac{y - y_i}{dist_i}. \end{aligned} \quad (6)$$

Ітераційне оновлення координат:

$$\begin{aligned} x(n+1) &= x(n) - \eta \frac{dF}{dx}, \\ y(n+1) &= y(n) - \eta \frac{dF}{dy}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $\eta = 0,00005$ — швидкість навчання.

При увімкненому режимі WLS система розв'язує лінеаризовану систему рівнянь:

$$\mathbf{H}^T \times \mathbf{W} \times \mathbf{H} \times \Delta = -\mathbf{H}^T \times \mathbf{W} \times \mathbf{r}, \quad (8)$$

де $\mathbf{H}$ — матриця Якобі розміром $n \times 2$, $\mathbf{W}$ — діагональна матриця ваг, $\mathbf{r}$ — вектор нев'язок, $\Delta = [\Delta x, \Delta y]^T$ — поправки до координат.



Елементи матриці Якобі:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}[i, 0] &= \frac{x - x_i}{dist_i}, \\ \mathbf{H}[i, 1] &= \frac{y - y_i}{dist_i}. \end{aligned} \quad (9)$$

І визначення нев'язки:

$$r[i] = dist_i - d_i. \quad (10)$$

Фільтр Калмана використовує модель з постійною швидкістю:

$$\mathbf{X} = [x, v_x]^T. \quad (11)$$

Із матрицею переходу стану $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Рівняння передбачення:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k|k-1) &= \mathbf{F} \times \mathbf{X}(k-1|k-1), \\ \mathbf{P}(k|k-1) &= \mathbf{F} \times \mathbf{P}(k-1|k-1) \times \mathbf{F}^T + \mathbf{Q}, \end{aligned} \quad (12)$$

де $\mathbf{X}(k|k-1)$ — передбачений стан, $\mathbf{P}(k|k-1)$ — передбачена коваріаційна матриця, $\mathbf{Q}$ — матриця шуму процесу.

Матриця шуму процесу:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{pos}dt^2 & Q_{vel}dt \\ Q_{vel}dt & Q_{vel} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Рівняння корекції:

$$\begin{aligned} K &= \mathbf{P}(k|k-1) \times \mathbf{H}^T \times (\mathbf{H} \times \mathbf{P}(k|k-1) \times \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \\ \mathbf{X}(k|k) &= \mathbf{X}(k|k-1) + K(z - \mathbf{H} \times \mathbf{X}(k|k-1)), \\ \mathbf{P}(k|k) &= (\mathbf{I} - K\mathbf{H}) \times \mathbf{P}(k|k-1), \end{aligned} \quad (14)$$

де K — коефіцієнт Калмана, z — вимірне значення, $\mathbf{H} = [1, 0]$ — матриця спостереження, $\mathbf{R}$ — дисперсія шуму вимірювань

Параметри фільтра Калмана:

```
KALMAN_PROCESS_NOISE = 0.0001 // шум процесу  
KALMAN_MEASUREMENT_NOISE = 0.005 // шум вимірювань
```

Основні функції системи:

- `updateDevice()` оновлює інформацію про маячок або додає новий маячок до списку (додавання нового RSSI значення до вікна, обчислення відстані за формулою загасання, експоненційне згладжування відстані, оновлення коефіцієнта надійності та управління часовими мітками);
- `calculateCoordinatesEnhanced()` є головною функцією обчислення координат, яка перевіряє кількість доступних маячків, вибирає алгоритм (центроїд, градієнтний спуск або WLS), виконує ітераційні обчислення, валідує результат відносно позицій маячків і застосовує фільтр Калмана (за потреби);

- calculateWeight() обчислює вагу маячка для алгоритмів позиціонування на основі сили (RSSI) і стабільності сигналу (дисперсія), давності останнього прийому, кількості накопичених зразків і коефіцієнта надійності;
- cleanOldDevices() видаляє маячки, від яких не надходили сигнали протягом трьох секунд, забезпечуючи актуальність даних;
- startBLEScan() ініціює сканування BLE маячків.

JSON API повертає структуровані дані з координатами, списком маячків та їх характеристиками (RSSI, відстань, дисперсія, надійність).

Результати збору даних та отримання трекінгу

Експеримент проводився в приміщенні загальною площею близько 110 м², яке відповідає мінімальній площі офісного приміщення чи окремого відділу. Також одночасно із роботою системи працювало близько 20 BLE пристроїв в звичайному режимі розсилки службових пакетів для того, щоб наблизити експеримент до реальних умов застосування.

На рис. 4 представлені розраховані за допомогою тріангуляції траєкторії проходження. Красними точками проказані розраховані положення, а синіми лініями представлені переходи між положеннями. Трикутниками позначені положення BLE маячків. Координати на вісях показані в метрах. Накопичення пакетів та усереднення все одно не дозволяє в повній мірі відтворити реальну траєкторію абонента, показану зеленою пунктирною лінією.

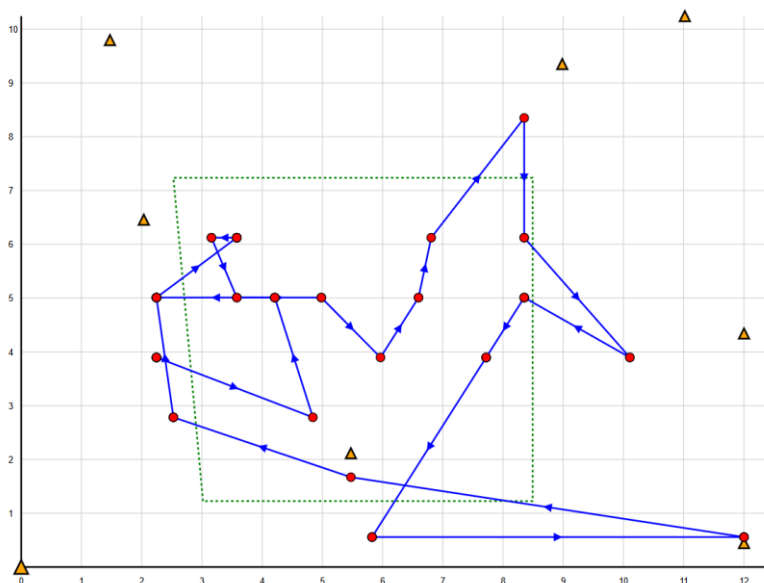


Рис. 4. Траєкторія тріангуляції без застосування фільтрів

Як видно із рисунка, траєкторія лише умовно показує переміщення абонента. Такі випадки не дозволяють повноцінно застосовувати даний підхід для рухових абонентів. Лише накопичення та усереднення статистично значущої кількості пакетів дозволяє оцінити положення стаціонарного абонента. Зменшення затримки між відправленими пакетами впливає на точність в незначній мірі, а лише збільшує навантаження на розрахунки, що призводить до втрат пакетів. Тому найкращі результати отримані при інтервалах в надсиланні пакетів від 50 до 100 мс.

Тому було вирішено застосувати цифровий фільтр Калмана та WLS [21], результати роботи яких показані на рис. 5.

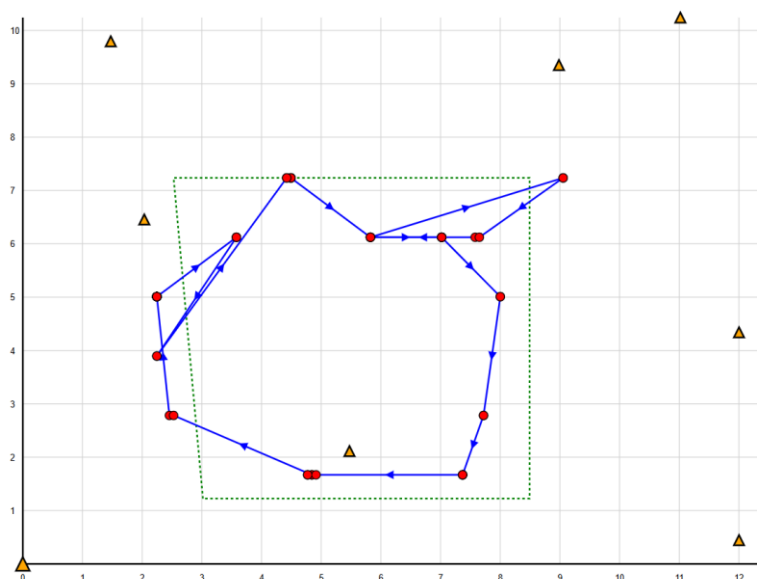


Рис. 5. Траєкторія тріагуляції із застосуванням фільтрів

Після застосування фільтрів точність позиціонування покращилася, зменшилась кількість зациклень та випадів, але швидкодія та кількість ресурсів на розрахунки збільшилася на 30–35%

ОБГОВОРЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ

Системи на основі BLE є недорогими та простими у впровадженні, але для досягнення найкращих результатів вимагають ретельного планування розміщення маячків та постійного технічного обслуговування [11], [16], [22]. Окремим питанням є протидія електромагнітним завадам на частотах роботи локальної системи. Так як критичні підприємства мають контур фізичної безпеки, який часто є більшим за максимальну відстань роботи маячків (100 метрів), то такого плану атаки є вкрай складні до реалізації.

Для використання маячків всередині та назовні треба виставляти різні налаштування цифрових фільтрів, наприклад, показник втрат ззовні має бути близько 3,0, а в середині приміщень 2,0..2,5. Звичайно сигнал від одного і того самого маячка може розповсюджуватися за межі свого основного застосування, але це незначно зменшує точність позиціонування.

Також можна вводити пріоритезацію маячків з вищим рівнем сигналу для зменшення впливу похибок від слабких маячків в результуючому сигналі.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Визначення місцезнаходження в середині приміщення за допомогою маячків BLE є можливим і ефективним при використанні відповідних алгоритмів та оптимального розміщення маячків. Точність залежить від щільності маячків, факторів навколишнього середовища та обраного методу визначення місцезнаходження, причому гібридні та адаптивні підходи забезпечують найкращі результати в складних внутрішніх приміщеннях.

Як видно з результатів експерименту систему позиціонування можна зробити на звичайних вбудованих системах. Для цього не потрібно окремо розробляти плати, лише на



стороні абонента відслідковувати завантаження мікроконтролера та використовувати додаткові радіатори за необхідності. Система добре працює для малорухомих об'єктів без використання додаткових цифрових фільтрів, а для рухомих абонентів краще застосовувати фільтр Калмана та WLS, застосування яких збільшує завантаженість мікроконтролера на 30–35% при частоті відправки пакетів у 100 мс, а розрахунку положення кожену одну секунду.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку нових алгоритмів підвищення точності позиціонування абонентів, боротьби із природними завадами, внутрішньо каналною інтерференцією та зовнішнім електромагнітним впливом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Astapenya, V. (2023). Bluetooth Low-Energy Beacon Resistance to Jamming Attack. In *2023 IEEE 13th Int. Conf. on Electronics and Information Technologies (ELIT)* (pp. 270–274). <https://doi.org/10.1109/ELIT61488.2023.10310815>
2. TajDini, M., Sokolov, V., & Buriachok, V. (2019). Men-in-the-Middle Attack Simulation on Low Energy Wireless Devices using Software Define Radio. In *8th Int. Conf. on "Mathematics. Information Technologies. Education: " Modern Machine Learning Technologies and Data Science*, vol. 2386 (pp. 287–296).
3. Pakanon, N., Chamchoy, M., & Supanakoon, P. (2020). Study on Accuracy of Trilateration Method for Indoor Positioning with BLE Beacons. In *2020 6th Int. Conf. on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*. <https://doi.org/10.1109/iceast50382.2020.9165464>
4. Duong, N.-S., & Dinh Thi, T.-M. (2021). Smartphone Indoor Positioning based on Enhanced BLE Beacon Multi-Lateration. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(1), 51. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v19i1.16275>
5. Sun, J. (2024). A Hospital Positioning System based on BLE Beacons. In Y. Li, H. Yao, & X. Liu (Eds.). In *2nd Int. Conf. on Informatics, Networking, and Computing (ICINC 2023)* (p. 37). <https://doi.org/10.1117/12.3024735>
6. Zhu, W., Kim, S., Hong, J., & Kim, C. (2017). Analysis of Indoor Positioning Based on BLE. In *Studies in Computational Intelligence* (pp. 421–430). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56660-3_36
7. Skýpalová, E., Boroš, M., Loveček, T., & Veřas, A. (2025). Innovative Indoor Positioning: BLE Beacons for Healthcare Tracking. *Electron.*, 14(10), 2018. <https://doi.org/10.3390/electronics14102018>
8. Faragher, R., & Harle, R. (2015). Location Fingerprinting with Bluetooth Low Energy Beacons. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 33(11), 2418–2428. <https://doi.org/10.1109/jsac.2015.2430281>
9. Aranda, F. J., Parralejo, F., Álvarez, F. J., & Torres-Sospedra, J. (2020). Multi-Slot BLE Raw Database for Accurate Positioning in Mixed Indoor/Outdoor Environments. *Data*, 5(3), 67. <https://doi.org/10.3390/data5030067>
10. Zuo, Z., Liu, L., Zhang, L., & Fang, Y. (2018). Indoor Positioning Based on Bluetooth Low-Energy Beacons Adopting Graph Optimization. *Sens.*, 18(11), 3736. <https://doi.org/10.3390/s18113736>
11. Dinh, T.-M. T., Duong, N.-S., & Sandrasegaran, K. (2020). Smartphone-based Indoor Positioning using BLE iBeacon and Reliable Lightweight Fingerprint Map. *IEEE Sens. J.*, 20(17), 10283–10294. <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2989411>
12. Ciabattini, L., Foresi, G., Monteriù, A., Pepa, L., Pagnotta, D. P., Spalazzi, L., & Verdini, F. (2017). Real Time Indoor Localization Integrating a Model based Pedestrian Dead Reckoning on Smartphone and BLE Beacons. *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12652-017-0579-0>
13. Ramirez, R., Huang, C.-Y., Liao, C.-A., Lin, P.-T., Lin, H.-W., & Liang, S.-H. (2021). A Practice of BLE RSSI Measurement for Indoor Positioning. *Sens.*, 21(15), 5181. <https://doi.org/10.3390/s21155181>
14. Kluge, T., Groba, C., & Springer, T. (2020). Trilateration, Fingerprinting, and Centroid: Taking Indoor Positioning with Bluetooth LE to the Wild. In *2020 IEEE 21st Int. Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*. <https://doi.org/10.1109/wowmom49955.2020.00054>
15. Ivanov, R. (2021). Accuracy analysis of BLE beacon-based localization in smart buildings. *J. Ambient Intell. Smart Environ.*, 13(4), 325–344. <https://doi.org/10.3233/ais-210607>
16. Tian, Y., Huang, B., Jia, B., & Zhao, L. (2020). Optimizing AP and Beacon Placement in WiFi and BLE hybrid localization. *J. Netw. Comput. Appl.*, 164, 102673. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102673>



17. He, W., Ho, P.-H., & Tapolcai, J. (2017). Beacon Deployment for Unambiguous Positioning. *IEEE IoT J.*, 4(5), 1370–1379. <https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2708719>
18. Lilygo (2025). T-Display. ESP32 WiFi Bluetooth Development Board. <https://lilygo.cc/products/lilygo%C2%AE-ttgo-t-display-1-14-inch-lcd-esp32-control-board>
19. Zephyr Project (2025). ESP32C3 0.42 OLED https://docs.zephyrproject.org/latest/boards/01space/esp32c3_042_oled/doc/index.html
20. Etzlinger, B., Nusbaumuller, B., Peterseil, P., & Hummel, K. A. (2021). Distance Estimation for BLE-based Contact Tracing—A Measurement Study. In *2021 Wireless Days (WD)* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/wd52248.2021.9508280>
21. Hernandez, C., & Maya-Ortiz, P. (2015). Comparison between WLS and Kalman Filter method for power system static state estimation. In *2015 Int. Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)* (pp. 47–52). IEEE. <https://doi.org/10.1109/sedst.2015.7315181>
22. Misal, S. R., Prajwal, S. R., Niveditha, H. M., Vinayaka, H. M., & Veena, S. (2020). Indoor Positioning System (IPS) using ESP32, MQTT and Bluetooth. In *2020 4th Int. Conf. on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)* (pp. 79–82). <https://doi.org/10.1109/iccmc48092.2020.iccmc-00015>
23. Kostiuk, Yu. V., Skladannyi, P. M., Bebashko, B. T., Khorolska, K. V., Rzaieva, S. L., & Vorokhob, M. V. (2025). *Information and communication systems security*. [Textbook] Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.
24. Kostiuk, Yu. V., Skladannyi, P. M., Hulak, H. M., Bebashko, B. T., Khorolska, K. V., & Rzaieva, S. L. (2025). *Information security systems*. [Textbook] Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.
25. Hulak, H. M., Zhyltsov, O. B., Kyrychok, R. V., Korshun, N. V., & Skladannyi, P. M. (2023). *Enterprise information and cyber security*. [Textbook] Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.

**Volodymyr Sokolov**

Ph.D., Associate Professor

Associate Professor of the Department of Information and Cyber Security

named after Professor Volodymyr Buriachok

Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-9349-7946

v.sokolov@kubg.edu.ua**TECHNOLOGY FOR TRACKING THE MOVEMENT OF SUBSCRIBERS
WITHIN THE TERRITORY OF A CRITICAL INFRASTRUCTURE ENTERPRISE**

Abstract. The article discusses the pressing issue of ensuring reliable positioning of subscribers at critical infrastructure facilities in conditions of possible spoofing or jamming of GPS signals. An innovative method for tracking subscriber movement using Bluetooth Low Energy (BLE) beacon technology is proposed as an effective alternative to satellite positioning. The developed system is based on a network of strategically placed BLE beacons that transmit pre-set GPS coordinates via data in advertising packets at an optimal interval of 100 ms, which ensures a balance between accuracy and energy consumption. For the practical implementation of the experiment, publicly available hardware based on ESP32 microcontrollers with built-in OLED displays was used, demonstrating the accessibility and cost-effectiveness of the solution. Specialized software was developed for transmitters (beacons) and receivers (subscribers) with the implementation of a set of positioning algorithms, including gradient descent triangulation methods, adaptive Kalman filters, and the weighted least squares (WLS) method. The system also includes a web interface for displaying results in real time and an API for integrating existing security systems. Experimental studies were conducted in real conditions in a 110 m² room with a high density of beacons (one per 15 m²) and the presence of about 20 active BLE devices to simulate a typical office environment. Detailed calibration of the system was performed with a standard signal attenuation of minus 83 dBm based on more than 3,000 measurements. The results showed that for stationary objects, the system provides satisfactory positioning accuracy of 1–2 meters without the use of additional digital filters, while for moving subscribers, the use of Kalman and WLS filters is necessary, which increases the computational load on the microcontroller by 30–35%, but significantly improves tracking quality. The system successfully demonstrates the possibility of creating autonomous high-precision positioning in the absence of or unreliability of satellite signals using available technologies and standard components.

Keywords: BLE beacons; indoor positioning; critical infrastructure; triangulation; Kalman filter; ESP32; RSSI; GPS spoofing.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Astapenya, V. (2023). Bluetooth Low-Energy Beacon Resistance to Jamming Attack. In *2023 IEEE 13th Int. Conf. on Electronics and Information Technologies (ELIT)* (pp. 270–274). <https://doi.org/10.1109/ELIT61488.2023.10310815>
2. TajDini, M., Sokolov, V., & Buriachok, V. (2019). Men-in-the-Middle Attack Simulation on Low Energy Wireless Devices using Software Define Radio. In *8th Int. Conf. on "Mathematics. Information Technologies. Education: " Modern Machine Learning Technologies and Data Science*, vol. 2386 (pp. 287–296).
3. Pakanon, N., Chamchoy, M., & Supanakoon, P. (2020). Study on Accuracy of Trilateration Method for Indoor Positioning with BLE Beacons. In *2020 6th Int. Conf. on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*. <https://doi.org/10.1109/iceast50382.2020.9165464>
4. Duong, N.-S., & Dinh Thi, T.-M. (2021). Smartphone Indoor Positioning based on Enhanced BLE Beacon Multi-Lateration. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(1), 51. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v19i1.16275>



5. Sun, J. (2024). A Hospital Positioning System based on BLE Beacons. In Y. Li, H. Yao, & X. Liu (Eds.). In *2nd Int. Conf. on Informatics, Networking, and Computing (ICINC 2023)* (p. 37). <https://doi.org/10.1117/12.3024735>
6. Zhu, W., Kim, S., Hong, J., & Kim, C. (2017). Analysis of Indoor Positioning Based on BLE. In *Studies in Computational Intelligence* (pp. 421–430). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56660-3_36
7. Skýpalová, E., Boroš, M., Loveček, T., & Veřas, A. (2025). Innovative Indoor Positioning: BLE Beacons for Healthcare Tracking. *Electron.*, *14*(10), 2018. <https://doi.org/10.3390/electronics14102018>
8. Faragher, R., & Harle, R. (2015). Location Fingerprinting with Bluetooth Low Energy Beacons. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, *33*(11), 2418–2428. <https://doi.org/10.1109/jsac.2015.2430281>
9. Aranda, F. J., Parralejo, F., Álvarez, F. J., & Torres-Sospedra, J. (2020). Multi-Slot BLE Raw Database for Accurate Positioning in Mixed Indoor/Outdoor Environments. *Data*, *5*(3), 67. <https://doi.org/10.3390/data5030067>
10. Zuo, Z., Liu, L., Zhang, L., & Fang, Y. (2018). Indoor Positioning Based on Bluetooth Low-Energy Beacons Adopting Graph Optimization. *Sens.*, *18*(11), 3736. <https://doi.org/10.3390/s18113736>
11. Dinh, T.-M. T., Duong, N.-S., & Sandrasegaran, K. (2020). Smartphone-based Indoor Positioning using BLE iBeacon and Reliable Lightweight Fingerprint Map. *IEEE Sens. J.*, *20*(17), 10283–10294. <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2989411>
12. Ciabattini, L., Foresi, G., Monteriù, A., Pepa, L., Pagnotta, D. P., Spalazzi, L., & Verdini, F. (2017). Real Time Indoor Localization Integrating a Model based Pedestrian Dead Reckoning on Smartphone and BLE Beacons. *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, *10*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12652-017-0579-0>
13. Ramirez, R., Huang, C.-Y., Liao, C.-A., Lin, P.-T., Lin, H.-W., & Liang, S.-H. (2021). A Practice of BLE RSSI Measurement for Indoor Positioning. *Sens.*, *21*(15), 5181. <https://doi.org/10.3390/s21155181>
14. Kluge, T., Groba, C., & Springer, T. (2020). Trilateration, Fingerprinting, and Centroid: Taking Indoor Positioning with Bluetooth LE to the Wild. In *2020 IEEE 21st Int. Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*. <https://doi.org/10.1109/wowmom49955.2020.00054>
15. Ivanov, R. (2021). Accuracy analysis of BLE beacon-based localization in smart buildings. *J. Ambient Intell. Smart Environ.*, *13*(4), 325–344. <https://doi.org/10.3233/ais-210607>
16. Tian, Y., Huang, B., Jia, B., & Zhao, L. (2020). Optimizing AP and Beacon Placement in WiFi and BLE hybrid localization. *J. Netw. Comput. Appl.*, *164*, 102673. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102673>
17. He, W., Ho, P.-H., & Tapolcai, J. (2017). Beacon Deployment for Unambiguous Positioning. *IEEE IoT J.*, *4*(5), 1370–1379. <https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2708719>
18. Lilygo (2025). T-Display. ESP32 WiFi Bluetooth Development Board. <https://lilygo.cc/products/lilygo%C2%AE-ttgo-t-display-1-14-inch-lcd-esp32-control-board>
19. Zephyr Project (2025). ESP32C3 0.42 OLED https://docs.zephyrproject.org/latest/boards/01space/esp32c3_042_oled/doc/index.html
20. Etzlinger, B., Nusbaumuller, B., Peterseil, P., & Hummel, K. A. (2021). Distance Estimation for BLE-based Contact Tracing—A Measurement Study. In *2021 Wireless Days (WD)* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/wd52248.2021.9508280>
21. Hernandez, C., & Maya-Ortiz, P. (2015). Comparison between WLS and Kalman Filter method for power system static state estimation. In *2015 Int. Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)* (pp. 47–52). IEEE. <https://doi.org/10.1109/sedst.2015.7315181>
22. Misal, S. R., Prajwal, S. R., Niveditha, H. M., Vinayaka, H. M., & Veena, S. (2020). Indoor Positioning System (IPS) using ESP32, MQTT and Bluetooth. In *2020 4th Int. Conf. on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)* (pp. 79–82). <https://doi.org/10.1109/iccmc48092.2020.iccmc-00015>
23. Kostiuk, Yu. V., Skladannyi, P. M., Bebesko, B. T., Khorolska, K. V., Rzaieva, S. L., & Vorokhob, M. V. (2025). *Information and communication systems security*. [Textbook] Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.
24. Kostiuk, Yu. V., Skladannyi, P. M., Hulak, H. M., Bebesko, B. T., Khorolska, K. V., & Rzaieva, S. L. (2025). *Information security systems*. [Textbook] Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.
25. Hulak, H. M., Zhyltsov, O. B., Kyrychok, R. V., Korshun, N. V., & Skladannyi, P. M. (2023). *Enterprise information and cyber security*. [Textbook] Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.

