

УДК 004.77:721/728

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.012731

Є. Ю. МІТІН, аспірант;

Д. В. МИРОНОВ, канд. техн. наук,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ПОЗИЦІЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ

Проаналізовано техніку та інформаційні технології позиціонування користувацького комп'ютерного пристрою в закритих приміщеннях. Популярна технологія визначення місцезнаходження користувача, якою є GPS (англ. Global Positioning System), недостатньо якісно працює за умов закритих приміщень та будівель. Найпопулярнішими альтернативними інформаційними технологіями позиціонування в замкненому просторі сьогодні є Wi-Fi, iGPS та інші технології, які ґрунтуються на опрацюванні відповідних візуальних зображень. Проаналізовано зазначені технології, особливості їх функціонування, а також переваги та недоліки в контексті використання за умов різноманітних закритих приміщень.

Ключові слова: Wi-Fi; позиціонування; точка доступу; трилатерація; місцезнаходження; точність.

Вступ

Постановка проблеми. Нині існує велика кількість технічних вирішень задачі визначення місця розташування об'єктів у просторі, які об'єднуються єдиним терміном — системи позиціонування. Усі системи позиціонування можна поділити на глобальні системи позиціонування та локальні, які працюють на обмеженій території.

Останнім часом набули значного поширення системи глобального позиціонування, зокрема GSM, GPS та ГЛОНАСС. Їхні основні переваги — це велика площа позиціонування (визначення розташування на відкритій місцевості) та відносно висока точність: до 2 м — системи GPS та ГЛОНАСС; до 150 м — системи GSM. До недоліків можна віднести закритість даних і слабкий сигнал приймання всередині приміщень через низький рівень стійкості до завад. Через ці недоліки стає неможливою побудова системи в довільній локації.

Перелічені недоліки відсутні в локальних системах позиціонування, а переваги стають очевидними в разі потреби побудови систем на обмеженій території (закриті приміщення із залізобетонними перегородками, тунелі, підвали), які мають високу точність вимірювання розташування [1].

Під системою позиціонування в цій статті розуміється система, що забезпечує позиціонування пристрою в локальній системі координат із відображенням його місцезнаходження на плані приміщень, оснащених необхідною інфраструктурою. Було розглянуто всі актуальні технології позиціонування, а також проведено їх порівняння з технологією позиціонування в мережах Wi-Fi. Виконано розбір всіх методів визначення розташування пристроїв за допомогою Wi-Fi мереж та відібрано оптимальний варіант для реалізації системи в приміщеннях. На основі вибраного методу розроблено алгоритм та лабораторний стенд для тестування реалізованої системи, а також здійснено аналіз здобутих результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковці Афіньського університету економіки і бізнесу (Греція) провели глибокий аналіз та класифікацію доступних на ринку інформаційно-комунікаційних технологій визначення місцезнаходження користувача всередині будівель у контексті мобільних програмно-алгоритмічних бізнес-застосунків. Також досліджують та розробляють нові методи навігації в приміщеннях на базі безпроводових мереж Wi-Fi в Університеті Калгари (Канада) та Університеті Вухан (Китай), провідних університетах Іспанії, Технологічному університеті Наньянгу (Сингапур) та ін. Розробляють засоби позиціонування на основі радіочастотної ідентифікації (РЧІД, RFID) науковці університету ІСІК (ISIK, Туреччина) та Національного технічного університету Афінь (Греція). На технологіях позиціонування та навігації користувача всередині закритих приміщень на базі GSM-мереж зосереджені й дослідники з університету імені П'єра та Марії Кюрі.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження технологій позиціонування, проведення їх порівняльного аналізу для відшукування найкращого способу визначення розташування пристроїв у приміщеннях та реалізація системи вибраної технології.

Основна частина

Спочатку розглянемо базові інформаційні технології позиціонування мобільного комп'ютерного пристрою всередині будівель, що істотно залежать від технічних можливостей такого пристрою.

Супутникова навігація заснована на методі беззапитових далекомірних вимірюваннях між пристроєм користувача та супутником. Йдеться про те, що навігаційний сигнал, який надсилається на пристрій, містить дані про координати місцезнаходження супутників. У цей час відбувається вимірювання віддалі до навігаційних супутників. Такий метод вимірювання віддалі будується

© Є. Ю. Мітін, Д. В. Міронов, 2023

ся на підставі обчислення тимчасових затримок прийнятого сигналу від супутника порівняно із сигналом, створюваним пристроєм користувача. Якщо виконати точне вимірювання з однаковим часом у користувача та на навігаційному супутнику, то буде достатнім здійснити вимірювання, скориставшись лише трьома супутниками. Але за реальних умов показники годинника на пристрої часто не збігаються з часом на борту супутника. Отже, у процесі визначення геопозиції потрібно брати до уваги відхилення між годинником користувача і системним часом. Тому для відшукування координати пристрою загалом потрібне попадання в зону дії не менше чотирьох навігаційних супутників. Таким чином, через низьку точність нам не підходить цей тип позиціонування [2].

Bluetooth-позиціонування — це технологія, що працює на основі передавання даних за технологією Bluetooth Low Energy (BLE). Передавання даних BLE є одностороннім зв'язком. Далі розглянемо приклад радіомаяків BLE, які намагаються встановити зв'язок із пристроєм у безпосередній близькості — радіомаяк Bluetooth із низьким енергоспоживанням транслює пакети даних через однакові проміжки часу. Такі пакети даних — це програма, попередньо встановлена на пристрої, що розміщено поблизу. Повідомлення BLE запускає такі дії, як надсилання відповіді або реакція програми. До переваг цієї системи можна віднести низьку вартість Bluetooth передавачів. Дана система має такі характеристики: низька вартість кінцевої системи, простота встановлення, відносно висока точність позиціонування та зручність використання кінцевим користувачем.

Геомагнітне позиціонування базується на орієнтуванні магнітного поля і ґрунтується на геомагнітних аномаліях як показниках для геомагнітного позиціонування. Основна ідея способу полягає у фіксації геомагнітних аномалій та нанесенні їх на карту об'єкта, на якому відбуватиметься позиціонування. Надалі орієнтування здійснюється за складеною картою пристроєм, в який вбудовано магнітометр. Наявний приклад реалізації — система IndoorAtlas. До недоліків цього способу можна віднести високу складність реалізації, а також невисоку точність. Оскільки в будинках дуже багато магнітних полів, що динамічно змінюються, до яких належать, наприклад, електропроводка самої будівлі, радіоелектронні засоби відвідувачів і співробітників, то позиціонування, засноване на зазначеному способі, сильно ускладнюється [3].

Позиціонування за допомогою базових станцій операторів стільникового зв'язку засноване на двох технологіях:

1) технології, яка застосовує мережу базових станцій мережі GSM та відомі географічні координати на посаді спостереження;

2) технології, які використовують супутникову навігацію (GPS, ГЛОНАСС).

Технології позиціонування, що використовуються в GSM-мережах, працюють на основі таких методів:

- **метод інтеграції номера стільника (CELLID)**, заснований на визначенні координати пристрою за сотою, в якій перебуває. Ця інформація може бути передана за допомогою SMS-повідомлення. Точність цього методу позиціонування обмежується — до 150 м у населеному пункті з тісно розставленими стільниками та до 35 км за містом;

- **метод вимірювання часу приходу (TOA)**, реалізований на вимірюванні інтервалу часу, протягом якого сигнали з пристрою абонента досягають трьох і більше точок, обладнаних модулями, що вимірюють положення LMU. Обчислення положення користувача здійснює центр розрахунків положення MLC, який надсилає запит найближчому до абонента LMU та вимірюється на основі часу приймання сигналів у певних пунктах. Точність визначення координати абонента дорівнює майже 125 м. Мінусами даного методу є висока вартість додаткового обладнання, витрати на обслуговування, а також для використання системи потрібна висока щільність мережі;

- **метод вимірювання різниці затримки сигналу до трьох і більше базових станцій (E-OTD)**. У його основі лежить вимірювання різниці часу приходу сигналу на базову станцію, до складу якої входить LMU, а також два стільники з тим самим обладнанням. Обчислення координати користувача займається MLC. Метод забезпечує точність позиціонування до 100 м-коду. Мінуси — невисока точність (БС може бути віддалена на відстань за 35 км від користувача, а також деякі БС є мобільними та постійно змінюють свою дислокацію).

Геопозиціонування за допомогою Wi-Fi застосовується в разі, або коли немає сигналу GPS, або позиціонування стільниковим оператором через блокування сигналу, або наявні сильні завади в приміщенні чи під землею. Позиціонування Wi-Fi ґрунтується на тому, що кількість мереж Wi-Fi швидко зростає, а отже, інфраструктура Wi-Fi може використовуватися як для доступу до мережі, так і для позиціонування, що знижує потребу в інвестиціях в інфраструктуру. Точність Wi-Fi, що використовується для внутрішнього позиціонування, варіюється від 1 до 15 м — залежно від попередніх умов. Великою перевагою порівняно з GPS є те, що розташування Wi-Fi дає змогу визначати поверх будівлі, користувачеві необов'язково під'єднуватися до точок доступу, достатньо увімкнути Wi-Fi, а також є те, що в більшості користувачів модуль Wi-Fi увімкнено постійно і не так сильно витрачає заряд батареї [4].

Проаналізувавши описані технології, можна дійти невтішного висновку, що Wi-Fi позиціонування має більшу точність проти інших технологій. Винятком може бути Bluetooth, але для реалізації потрібне додаткове обладнання — радіомаячки, коли для системи позиціонування Wi-Fi потрібні лише точки доступу. Супутникова навігація та геомагнітне позиціонування поступаються WPS стосовно складності в експлуатації та великої похибки під час вимірювання координат пристрою через непостійні фактори, пов'язані з часом та магнітними аномаліями. GSM ж складна в реалізації через можливу сильну віддаленість базової станції.

Отже, позиціонування в мережах Wi-Fi — найкраще рішення для проектування системи визначення розташування пристроїв у приміщеннях.

Нині існує кілька актуальних технологій, які застосовуються в методах позиціонування мереж Wi-Fi [5]. На підставі технічних можливостей вибраного обладнання для реалізації системи позиціонування пристрою використовуються такі варіанти або їх поєднання для аналізу позиційної інформації:

- AOA (*Angle of arrival*) — технологія визначення координат користувача за кутом падіння сигналів на поверхню точок доступу;
- RSSI (*Received signal strength indicator*) — технологія дає змогу визначити відстань до пристрою завдяки рівню (потужності) сигналу;
- TOA (*Time of arrival*) — технологія вимірювання відстані до користувача через час поширення сигналу від пристрою до точки доступу;
- TDOA (*Time difference of arrival*) — технологія уможливіє визначення відстані до користувача завдяки різниці часу приходу сигналу на доступні точки доступу. Технологія застосовується в системі, де розміщено три і більше точок доступу.

В основі *методу позиціонування за точкою доступу, до якої підімкнений користувач*, лежить аналіз сигналів від точок доступу, координати яких відомі. Суть у тому, що пристрій замірює рівні сигналів із поряд наявними Wi-Fi станціями і залежно від того, з якого обладнання Wi-Fi сигнал надходить із найбільшою потужністю, то і є найближчим. Коли ж визначено найближчу точку доступу, її координата присвоюється пристрою. Якщо ж пристрій приймає кілька сигналів, що мають однаковий рівень, координатою користувача є середина між цими Wi-Fi станціями. Перевагою цього методу є точність позиціонування в приміщенні порівняно з тим, що пропонує позиціонування в мережі оператора зв'язку або супутникова навігація (GPS, ГЛОНАСС). Але якщо порівнювати точність з іншими методами позиціонування мереж Wi-Fi, то тут вона вважатиметься невисокою. Недоліками методу є похибка позиціонуван-

ня пристроїв, яка в певних випадках досягає віддалі розподілу сигналів від точок доступу, а також для коректної роботи методу потребуватиме велику кількість точок доступу.

Реалізація *методу розпізнавання шаблону* складається з таких етапів:

- створення шаблону;
- отримання даних RSS від точок доступу;
- аналіз даних RSS та даних точок калібрування;
- визначення місцезнаходження.

Щоб спроектувати шаблон, необхідно нанести на карту радіообстановку приміщення. Для цього потрібно зробити трудомістке і тривале сканування ефіру в приміщенні, в результаті якого буде здобуто унікальні дані. Завдяки їм складається радіокарта приміщення, розбита на квадрати з власними координатами. Коли карту повністю спроектовано, створюється шаблон у базі даних. Далі вноситься пристрій у приміщення, він сканує радіообстановку, у результаті чого отримує інформацію про назви точок доступу і рівень сигналу від них. Ці дані звіряються із шаблоном у базі даних і, отже, визначаються координати пристрою в просторі [6]. Єдиним плюсом цього методу є низька вартість обладнання. Мінусами ж є висока вартість володіння цією системою, складність в експлуатації, спричинена постійним внесенням коригувань у шаблони, які зазвичай виробляються фахівцями, а також невисока точність визначення розташування пристрою, пов'язана із впливом багатьох факторів.

Метод триангуляції полягає в тому, щоб на підставі прийнятого рівня сигналу пристрою на три точки доступу в зоні перетинання можливої координати користувача відносно кожної точки позиціонування користувача. Для коректної роботи системи потрібно розмістити точки доступу так, щоб у кожній точці простору в приміщенні пристрій було розміщено в зоні дії трьох і більше точок доступу, у результаті чого буде здобуто точне позиціонування з мінімальною похибкою. Істотний вплив на точність позиціонування користувача надають завади на шляху поширення сигналів. Статичні об'єкти потрібно змодельовати і врахувати в алгоритмі геопозиціонування, а динамічні обов'язково знизить точність у визначенні координати пристрою. Плюсами цього методу є висока точність позиціонування пристроїв та середні витрати на експлуатацію системи. Мінусами ж є складність у реалізації системи, оскільки потрібно ретельно побудувати модель поширення сигналу, а також витрати на побудову системи та реальні умови у приміщеннях (багатопроменеві, поглинання стінами та завадами).

Метод ангуляції або позиціонування з визначенням кута вхідного сигналу засновано на

встановленні розташування користувача завдяки куту, за якого сигнали надходять на точку доступу. Даний метод — це революційне розроблення компанії Cisco, що дає змогу дістати найвищу точність позиціонування пристрою в мережах Wi-Fi. Спроектуювавши систему на базі цього методу, можна досягти похибки 1 м під час визначення координати користувача. В основі лежать свідчення зовнішнього модуля точкового позиціонування Cisco Aironet. Пристрій являє собою точку доступу Cisco, що має модуль точного позиціонування та спеціальну антену. Антена — це масив із 32 антен, кожна з яких приймає сигнал інакше, ніж сусідня [7]. Алгоритм надає можливість із зібраної інформації розрахувати кут, під яким сигнал прийшов на точки доступу та звузити сегмент можливого розміщення Wi-Fi користувача до променя. Потім можна використовувати геометричні розрахунки для оцінювання розташування пристрою. Перевагами цього методу є висока точність позиціонування пристроїв та низькі витрати на експлуатацію, а недоліками будуть висока вартість розгортання системи та сприйнятливність до пасивних завад. Реалізована система добре працює в ситуаціях із прямою видимістю, але за наявності завад страждає точно, коли стикається із відображенням сигналу від навколишніх об'єктів.

До основи *методу трилатерації* належить визначення розташування пристрою в приміщенні у вигляді координат точки перетинання трьох сфер, у центрі яких розташовано точки доступу AP1, AP2 та AP3 з відомими координатами. Як вхідні дані беруться характеристика мережі Wi-Fi, наприклад частота сигналу, потужність сигналу, Wi-Fi канал, що застосовується, мережна MAC-адреса і координата точки доступу. Для реалізації цього методу мають використовуватися як мінімум три Wi-Fi точки, розміщені на одному поверсі. Потрібно брати до уваги те, що рівень сигналу від кожної точки доступу зменшується залежно від коефіцієнта шуму радіообстановки, а також відстаней між передавачем і приймачем, тому необхідно розставляти точки доступу якнайчастіше. Даний метод визначає відстань за рівнем сигналу на вході приймального пристрою для мобільного обладнання. Перевагою цього методу є висока точність позиціонування, відносно невисока складність реалізації та вартість розгортання. Недоліком є шум, що вноситься в радіообстановку, який може вплинути на точність визначення розташування пристроїв.

Метод ідентифікації на основі штучної нейронної мережі будується на вимірюванні потужності сигналів від усіх найближчих за рівнем сигналу точок доступу в певному масиві точок, названих опорними. Пристрій, місце розташування якого потрібно визначити, збирає дані про

навколишні Wi-Fi точки через аналіз карти радіообстановки. Ці дані використовуються вже на навченій та протестованій заздалегідь нейронній мережі, призначеній для визначення поточного розташування пристрою клієнта на основі даних радіосигналу. Спеціально розроблений настільний застосунок готує дані, «навчає» та тестує нейронну мережу. Це можна реалізувати у різний спосіб, у деяких наукових працях це реалізується на алгоритмі під назвою «Resilient Propagation» (Rprop) — алгоритм зі зворотним поширенням помилки. Таким чином, метод позиціонування на основі штучної нейронної мережі має високу точність та можливість оброблення великої кількості даних, але складність реалізації та експлуатації обійдеться дорого для підприємства. Річ у тім, що за будь-якої зміни статичної обстановки приміщення штучну нейронну мережу доведеться знову «навчати» через те, що значення потужності сигналу мають пряму залежність від завади, що зустрічається на шляху сигналу до точки доступу. Оскільки цей процес має відбуватися під контролем оператора, будуть потрібні регулярні фінансові вкладення з боку підприємства. Крім навчання, також потрібно створити програмне або апаратне рішення для самої нейронної мережі, розробити алгоритм позиціонування, закупити обладнання тощо.

Метод позиціонування на основі Wi-Fi позначок заснований на активних пристроях, які можуть являти собою браслет на зап'ястя. Наразі Wi-Fi позначки найбільш потрібні в організаціях із суворим контролем доступу на територію, а точніше на підприємствах, в яких введено заборону використання мобільних пристроїв на території об'єкта. Проектування та реалізація такої системи має високі витрати через те, що організації потрібно купити кожному співробітнику по одному примірнику пристрою, а також необхідно закупити комплекти для людей, які не працюють на об'єкті, але за певних обставин потрібно отримати доступ на територію підприємства, наприклад різного роду комісії. Ще одним недоліком методу є складність в організаційному аспекті, оскільки потрібно буде провести навчання людей щодо роботи з позначками та розгорнути пропускний пункт, який прийматиме, видаватиме та налаштовуватиме їх. Точність визначення координати пристроїв залежатиме від вибраного алгоритму позиціонування.

Проаналізувавши всі актуальні методи позиціонування, можна дійти висновку, що метод трилатерації проти інших має високу точність. Таких і кращих результатів можна досягти, використовуючи методи ангуляції та ідентифікації на основі штучної нейронної мережі, але їх реалізація досить складна і витрати на експлуатацію

будуть високі. Трилатерація має відносно невисоку складність у проектуванні та реалізації системи, а також невисоку вартість експлуатації, цього можна досягти, використовуючи методи розпізнавання шаблону і позиціонування по точці доступу, але тоді точність не буде такою високою. За результатами аналізу методи трилатерації та триангуляції мають схожу оцінку за критеріями відбору, але точність їхнього позиціонування становить відповідно до 1 і 5-7 м. Можна зробити висновок, що оптимальним методом для реалізації системи позиціонування є трилатерація.

Висновки

У статті було розглянуто застосовувані сьогодні технології позиціонування. Їх аналіз показав, що для завдання позиціонування пристроїв у приміщеннях найвищою точністю та меншими витратами на розгортання системи та експлуатацію має технологія позиціонування на основі Wi-Fi мереж.

Позиціонування в мережах Wi-Fi здійснюється завдяки кільком методам визначення розташування пристроїв у просторі, в основі яких лежать технології з розрахунку відстані від точок доступу до користувача. Усі актуальні нині технології в статті було розглянуто. Усі методи, що застосовуються в позиціонуванні було описано і проаналізовано за критеріями з метою відбору кращого для реалізації в системі позиціонування мереж Wi-Fi. За результатами аналізу було відібрано метод трилатерації, оскільки він має високу точність і відносно невеликі витрати на розгортання системи.

Список використаної літератури

1. Олифер В. Г., Олифер Н. А. *Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. 4-е изд.* СПб.: Питер, 2016. 944 с.
2. *Официальный сайт информационно-аналитического центра КВНО ФГУП ЦНИИмаш [Электронный ресурс]*. URL: <https://www.glonass-iac.ru/navfaq.php>.
3. Ляшенко А. В. *Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. трудов. Теоретические и экспериментальные исследования, компьютерные технологии. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности.* Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2016. В. 20. 148 с.
4. *Wi-Fi Location-Based Services - Design and Deployment Considerations // Book Wi-Fi Location-Based Services - Design and Deployment Considerations / Editor Cisco Systems, Inc., 2017.*
5. *Разработка системы позиционирования и контроля с помощью беспроводной технологии Wi-Fi / И. Ю. Кучин, Ш. Ш. Иксанов, С. К. Рождественский, А. Н. Коряков // Современные информационные технологии. 2016. Т. 60, № 3. С. 131–136.*
6. Андреев Р. А., Бабаев Н. В. *Исследование эффективности позиционирования в сетях IEEE 802.11 Wi-Fi // Экономика и качество систем связи. 2020. № 4. С. 17–20.*
7. Рева И. Л., Богданов А. А., Малахова Е. А. *Применение точек доступа Wi-Fi для регистрации движения на объекте // Обработка информации, 2017. Т. 68, № 3. С. 105–117.*

Ye. Yu. Mitin, D. V. Mironov

POSITIONING OF OBJECTS USING WIRELESS NETWORKS

Today, there are a large number of technical solutions to the problem of determining the location of objects in space, which are united by a single term — positioning systems. All positioning systems can be divided into global positioning systems and local positioning systems that operate in a limited area.

The article analyses the techniques and information technologies for positioning a user's computer device indoors. The popular technology for determining the user's location, which is the Global Positioning System (GPS), does not work well enough in enclosed spaces and buildings. The most popular alternative information technologies for positioning in confined spaces today are Wi-Fi, iGPS and other technologies based on the processing of relevant visual images. The article analyses these technologies, their functioning features, as well as advantages and disadvantages in the context of their use in various types of enclosed spaces.

The analysis has shown that for the task of positioning devices in the premises, the positioning technology based on Wi-Fi networks has the highest accuracy and lower costs for system deployment and operation.

Positioning in Wi-Fi networks is carried out using several methods for determining the location of devices in space, based on technologies for calculating the distance from access points to the user. All currently relevant technologies have been considered in this paper. All the methods used in positioning were described and analysed according to the criteria in order to select the best one for implementation in a Wi-Fi network positioning system. Based on the results of the analysis, the trilateration method was selected because it has high accuracy and relatively low system deployment costs.

Keywords: Wi-Fi; positioning; access point; trilateration; location; accuracy.