

## ПОЗИЦІОНУВАННЯ В ПРИМІЩЕННІ З ВИКОРИСТАННЯМ BLUETOOTH LOW ENERGY

Т.-Н. Калинчук, І. Карбовник

*Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна  
[tadei-nazarii.kalynchuk@lnu.edu.ua](mailto:tadei-nazarii.kalynchuk@lnu.edu.ua), [ivan.karbovnyk@lnu.edu.ua](mailto:ivan.karbovnyk@lnu.edu.ua)*

Наведено частину огляду можливих систем позиціонування в приміщенні на основі Bluetooth Low Energy. Коротко розглянуто стандарт Bluetooth 4.0, його відмінності від попередніх версій Bluetooth. Описано можливі алгоритми на основі часу проходження сигналу чи потужності сигналу. Також приведено основні переваги систем на основі BLE та недоліки. Звернено увагу на найбільші виклики, які постають при виконанні позиціонування в приміщенні на основі BLE.

*Ключові слова:* позиціонування, радіозв'язок, Bluetooth, Bluetooth Low Energy, інтенсивність радіосигналу, ангуляція, латерация, метод відбитків пальців, багатопроменеве загасання.

На ринку існує кілька конкуруючих комерційних систем внутрішнього позиціонування, проте відсутній чіткий стандарт. Зазвичай постачальники не докладають зусиль, щоб у їхньому продуктовому описі конкретно зазначити методику використання або очікувану точність. Тим не менше, більшість з них вказують, що базуються на стандартах 802.11, що призводить до обмеженої потужності цих систем. Всі ці системи спрямовані на визначення місцезнаходження людей для навігаційних завдань або отримання інформації про розташування, наприклад, товарів у роздрібних магазинах чи деталей екскурсій в музеях.

У таблиці I наведено обмежений вибір методів внутрішнього позиціонування з використанням GPS як ілюстративного прикладу. Цифри є приблизними, а системи засновані на схожих конструкціях можуть відрізнятися як споживаною потужністю, так і точністю. Показники потужності наведені в активному стані та не порівнюються між собою. Деякі технології використовують дуже короткі спалахи активності і їхня середня потужність буде значно меншою, ніж у систем з аналогічною потужністю активного стану, але тривалішим часом цієї активності [11].

Важливим спостереженням є те, що в межах точності менше 10 метрів доступний обмежений вибір низькопотужних систем. Особливо перспективні є два варіанти: системи на основі надширокосмугового зв'язку (UWB)[10] і Bluetooth Low Energy (BLE). Обидві ці системи можуть використовуватися для внутрішнього позиціонування, хоча з різною точністю та витратою енергії. У цьому контексті далі буде розглянуто конкретно технологію BLE.

Таблиця 1. Системи позиціонування

Система	Зона використання	Використання енергії в активному режимі	Точність
GPS і аналогічні супутникові системи	Поза приміщенням	50-200 МВат	3-15м [1]
Позиціонування з використанням стільникового зв'язку	Поза і всередині приміщень	50 МВат	300-3500м
802.11 системи «відбитків пальців»	Всередині приміщень	50-300 МВат	3-10м [1]
802.11 системи «часових різниць»	Всередині приміщень	50-300 МВат	30 см [11]
UWB системи «часових різниць»	Всередині приміщень	50-60 МВат	30 см [11]
BLE позиціонування	Всередині приміщень	<10 МВат	10-50м
Bluetooth RSSI	Всередині приміщень	<40 МВат	5-10м [7]
Bluetooth системи «відбитків пальців»	Всередині приміщень	<40 МВат	3-10м [7]

### 1. Bluetooth Low Energy

Представлений у стандарті Bluetooth 4.0, BLE є радіостандартом низької потужності від Bluetooth Special Interests Group. Хоч і зберігаючи Bluetooth як частину назви, стандарт не повністю сумісний із Bluetooth 3 та попередніми версіями [2]. З Bluetooth 4.0, стандарт визначає два різні радіоінтерфейси, один із яких сумісний з старішими стандартами [2], інший – несумісний. Перший інтерфейс – Basic Data Rate (BR) або Enhanced Data Rate (EDR) [2]. Інший радіоінтерфейс якраз і використовується для BLE. Пристрої, які використовують Bluetooth версії 4.0 мають бути дворежимними, а також однорежимними з підтримкою BR/EDR або BLE.

Одним із найбільших відхилень від старого [9] стандарту Bluetooth є радіоінтерфейс. BLE все ще працює в діапазоні ISM 2,4 ГГц, але замість того, щоб бути розділеним на 79 каналів з шириною 1 МГц, BLE використовує 40 каналів шириною 2 МГц кожен. Щоб скоротити час сканування, кількість дозволених каналів трансляції зменшено до трьох, як показано на рис. 1.

Схема модуляції, яка використовується – це маніпуляція зсувом частоти Гауса (GFSK), яка також використовується в режимі низької швидкості передачі даних Bluetooth. Однак пропускна здатність каналу відрізняється, унеможливаючи взаємодію на фізичному рівні.

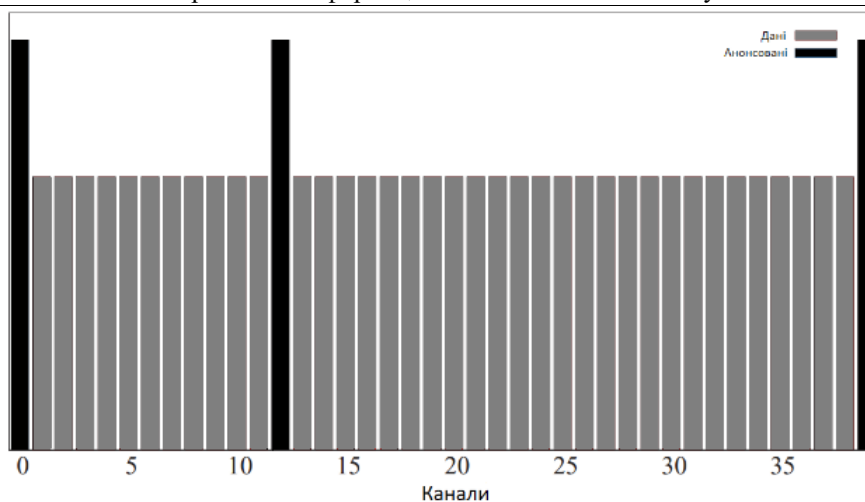


Рис. 1. Конфігурація каналу BLE.

## 2. Received signal strength indicator

Співвідношення між потужністю сигналу та відстанню в радіоелектроніці виражається за допомогою показника сили сигналу, відомого як RSSI (Received Signal Strength Indicator). Важливо зрозуміти, що співвідношення між RSSI та відстанню не є лінійним та сталим, через що точність визначення відстані на основі RSSI може варіюватися залежно від умов довкілля та налаштувань пристроїв. Проте існує загальне співвідношення, яке може бути використане для приблизного оцінювання відстані на основі RSSI:

$$d = 20^{(RSSI+a)}, \quad (1)$$

де  $a$  – зсув на основі максимальної потужності прийнятого сигналу для системи. Однак для використання всередині приміщень цей вираз у кращому випадку є поганим наближенням, оскільки всередині приміщень повно перешкод, таких як стіни та меблі. Перешкоди є джерелом ефектів багатопроменевого поширення, що ускладнює зв'язок між відстанню та RSSI, що робить точність низькою [6]. Використання методів на основі часу отримання сигналу є більш корисним для вимірювання дальності в приміщенні [4, 5, 9, 10], оскільки ефекти багатопроменевого поширення, що перешкоджають потужності сигналу, менше впливають на вимірювання. Компромісом є вартість впровадження. RSSI – це вимірювання, яке інтегровано практично в усі сучасні радіоконтролери, але для точного вимірювання часу потрібне спеціальне обладнання [5, 9], оскільки багато популярних радіоконтролерів не пропонують функцію точної позначки часу [2], або навіть точного годинника. BLE є одним із стандартів, які не мають точної прив'язки до часу.

## 3. Методи визначення місцезнаходження об'єктів в просторі

1. *Наближення.* Найпростіший спосіб визначення положення полягає у перевірці наявності об'єкта, який потрібно знайти, в межах зони дії радіозв'язку, без врахування

сигналу RSSI або часу прибуття. Запропонований рівень роздільної здатності співпадає з радіусом дії радіосигналу, оскільки він може відрізнити лише два стани: "присутній" і "відсутній". Для підвищення точності можна комбінувати дані з кількох радіостанцій, розташованих у різних місцях, і використовувати перекриття їхніх зон дії для визначення найімовірнішого положення об'єкта.

2. *Ранжування*. Ранжування представляє собою процес визначення відстані між двома об'єктами без врахування їхнього кута. Ця концепція також є основою для латерації, яка буде розглянута у наступному розділі. В радіолокації існує кілька методів ранжування, і два найбільш поширених з них ґрунтуються на аналізі потужності отриманого сигналу або часу, необхідного для приймання сигналу.

3. *Ангуляція* (Angle of Arrival, AoA). Ангуляція – це процес визначення місцезнаходження об'єкта за допомогою вимірювання кута вхідних сигналів. Для цього вимагається певний рівень направленості передавача та/або приймача, таких як напрямлені антени або антенні решітки. У випадку простого одновимірного вимірювання неможливо встановити точну відстань. Проте, здійснивши два вимірювання від об'єктів з відомими координатами, можна визначити місцезнаходження третього об'єкта. Цей метод називається тріангуляцією. Ілюстрація цього процесу наведена на рисунку нижче:

4.

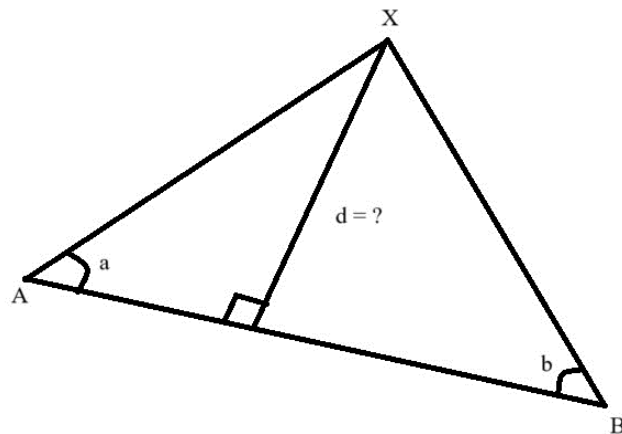


Рис. 2. Принцип тріангуляції. Адаптовано з [14].

5. *Латерація, трілатерація (Trilateration)*. Латерація – це метод визначення положення об'єкта шляхом вимірювання відстані від нього з кількох точок. Діапазони вимірювань здійснюються з відомих позицій, і кожне вимірювання може бути уявлене як коло або сфера можливих положень на вимірюваній відстані. Об'єднання кількох таких вимірювань та обчислення перетину їх дозволяє визначити позицію об'єкта. Цей метод може бути вразливим до спотворень сигналу, і точність залежатиме від стабільності сигналу і інтерференцій. Принцип роботи ілюструється на прикладі трьох маяків, розташованих на різних відстанях від об'єкта, як показано на рисунку 3.

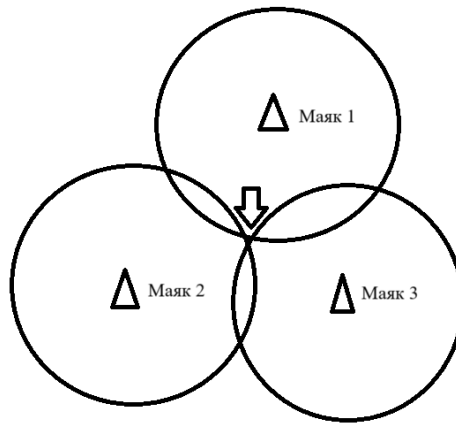


Рис. 3. Принцип трилатерації. Адаптовано з [13]

6. *Зняття відбитків пальців (Fingerprinting)*. Зняття відбитків пальців — це метод, який базується на використанні в основному даних RSSI для визначення поточного місцезнаходження за допомогою попередньо записаних даних (створеного відбитку, в цьому випадку карти місцевості) [3]. Дані складаються з показань RSSI різних радіосигналів, доступних у цьому регіоні [3]. Зчитування виконуються на мобільному пристрої, маякам не потрібно знати про будь-який мобільний пристрій. На практиці ці сигнали складаються з повідомлень базових станцій від стільникових мереж або Wi-Fi, а також трансляцій від маяків, розгорнутих для зняття частин карти. Для точності потрібно зібрати велику кількість даних про "відбитки" сигналів в різних точках, що може бути часозатратним. Схему наведено на рис. 4.

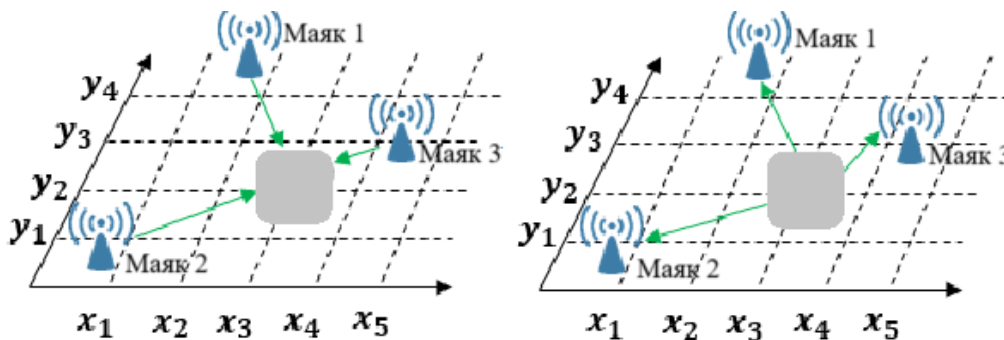


Рис. 4. Системи визначення місцезнаходження на основі методу зняття відбитків (з боку пристрою, і з боку мережі). Адаптовано з [12].

7. *Радіозатримка (Time of Flight, ToF)*. Метод використовує вимірювання часу, який потрібен для того, щоб сигнал BLE пройшов від маяка до пристрою. Шлях сигналу визначається за часом, який проходить між відправкою та прийманням сигналу. Знаючи

швидкість поширення сигналу (яка зазвичай є константою), можна обчислити відстань від маяка. Метод вимагає точного вимірювання часу, може бути вразливим до затримок та інтерференцій.

#### 4. Приклад системи позиціонування на базі BLE

а) *Розміщення маяків (Beacons)*: Маяки є ключовим елементом системи позиціонування на базі BLE. Вони представляють собою маленькі пристрої з енергоефективним Bluetooth-модулем, які розміщуються в приміщенні. Кількість маяків і їх розташування залежать від розмірів приміщення і потреб користувача. Чим більше маяків використовується, тим більша точність системи позиціонування.

б) *Мобільні пристрої*: Мобільні пристрої (смартфони, планшети тощо) використовуються як мобільні термінали для позиціонування. Вони повинні мати вбудований або підключений зовні Bluetooth-модуль, який дозволяє здійснювати зчитування сигналів від маяків. Більшість сучасних мобільних пристроїв підтримують BLE, що дозволяє широко застосовувати цю технологію.

в) *Застосунок позиціонування*: Це програмне забезпечення або бібліотека, яка встановлює зв'язок з маяками, зчитує їх сигнали і аналізує дані для визначення місцезнаходження мобільного пристрою. Вона може додатково використовувати інші дані, такі як сигнали Wi-Fi або сенсорні дані, щоб поліпшити точність позиціонування.

Послідовність алгоритму, який можна використати для такої системи:

1) *Зчитування сигналів* – мобільний пристрій здійснює зчитування сигналів, що випромінюються маяками, зокрема їх унікальних ідентифікаторів. Відстань між маяками та пристроєм може впливати на силу сигналу, що отримується, і це може бути використано для визначення відстані між ними.

2) *Аналіз сигналів* – отримані дані про сигнали передаються до аплікації позиціонування. Тут здійснюється обробка сигналів, зокрема оцінка сили та якості сигналу, і визначення відстані між мобільним пристроєм і кожним маяком. Цей процес допомагає зрозуміти, як далеко знаходиться пристрій від кожного маяка.

Для визначення точного місцезнаходження пристрою можуть застосовуватись методи триангуляції. Вони базуються на взаємному розташуванні маяків і можуть допомогти наблизити реальне місцезнаходження, використовуючи дані про відстані між пристроєм і кожним маяком.

3) *Позиційний розрахунок* – Після збору і обробки даних про сигнали маяків застосунок позиціонування проводить позиційний розрахунок. Це означає обчислення точного місцезнаходження мобільного пристрою всередині приміщення на основі зібраних даних. Отримана оцінка місцезнаходження може бути візуалізована на мапі або плані приміщення. Це дозволяє користувачам бачити своє місцезнаходження у реальному часі або використовувати дані для навігації або інших цілей

#### 5. Переваги та недоліки запропонованого методу

Хоча системи позиціонування з використанням Bluetooth Low Energy (BLE) мають свої переваги, вони також стикаються з деякими проблемами, які можуть вплинути на їх ефективність і точність. Ось деякі з найпоширеніших проблем, пов'язаних з позиціонуванням на базі BLE:

а) *Множинне відображення сигналу*: Сигнали BLE можуть відбиватися від стін, стелі та інших поверхонь, що призводить до множинного відображення. Це може

призвести до неточного визначення відстані між маяками та мобільним пристроєм і, відповідно, до неточності в позиціонуванні.

б) *Вплив перешкод*: Фізичні перешкоди, такі як стіни, меблі або люди, можуть блокувати чи поглинати сигнали BLE. Це може створювати "сліпі плями" в покритті сигналу, особливо в масштабних приміщеннях або приміщеннях з великою кількістю перешкод.

в) *Інтерференція*: Загущені мережі BLE або інші пристрої, що використовують радіосигнали, можуть спричинити інтерференцію і змішування сигналів. Це може призвести до спотворення сигналу і негативно вплинути на точність визначення місцезнаходження.

г) *Енергоспоживання*: Приймачі на мобільних пристроях, які відповідають за зчитування сигналів маяків, вимагають додаткової енергії. Це може знизити час автономної роботи мобільних пристроїв, особливо якщо вони використовують систему позиціонування в режимі постійної роботи.

д) *Калібрування і обслуговування*: Під час розгортання системи позиціонування з використанням BLE необхідно виконати калібрування маяків та пристроїв. Час від часу потрібно також здійснювати обслуговування та перевірку точності позиціонування, щоб впевнитися в стабільності роботи системи.

е) *Проблеми з конфіденційністю та безпекою*: Якщо система передає інформацію про місцезнаходження, це може створювати питання щодо конфіденційності та безпеки даних користувачів. Зловмисники можуть зловживати цією інформацією або перешкоджати роботі системи.

ж) *Динамічне оточення*: Рух пристроїв та інших об'єктів у приміщенні може впливати на потужність та якість сигналів BLE. Частіше за все, системи позиціонування з використанням BLE більше підходять для статичних або повільно змінюваних умов.

## 6. Багатопроменеве згасання

Багатопроменевість (множинне відображення сигналу), або, точніше, ефекти багатопроменевого поширення, становлять одну з найбільших проблем для внутрішнього радіозв'язку. Ефект багатопроменевого поширення викликаний тим самим сигналом, що надходить з кількох напрямків одночасно. Оскільки кожен шлях, яким поширюється сигнал, має різні характеристики каналу, він може заважати іншій своїй копії в приймачі як конструктивним, так і деструктивним способом. Інша назва деструктивного втручання – згасання сигналу. Різноманітність шляхів проходження сигналу спричинені фізичним розташуванням середовища та матеріалів, що ускладнює моделювання ефектів, оскільки навіть невеликі зміни розмірів або зміна матеріалу матимуть великий вплив на властивості каналів хвиль.

Ефект ще більше посилюється, коли середовище складається з об'єктів, які не є статичними, наприклад людей, піддонів і палетів. Такі динамічні середовища спричиняють нові проблеми під час їх моделювання. Одна з проблем полягає в тому, що лінія видимості сигналу (горизонт) може бути заблокована якимось об'єктом, і це послаблює сигнал. Іншою проблемою є різні характеристики затухання від різних типів перешкод. Деякі матеріали схильні до відбиття радіохвиль, а інші просто послаблюють їх. Оскільки фактично неможливо ідентифікувати матеріал і визначити його властивості в режимі реального часу, ефекти багатопроменевого поширення краще компенсуються в статистичному сенсі.

Щоб подолати цю проблему, зазвичай використовуються різні спрощення, і не проводять точне моделювання радіосередовища. Ефекти мають бути найбільш вираженими при використанні систем на основі RSSI, але вони також впливають на системи на основі TOF, хоча й не так сильно [10].

### Висновки

Із аналізу систем позиціонування можна побачити, навіть якщо розглядати невелику групу доступних систем позиціонування, що їх точність варіюється від методу до методу порядками. Найпопулярнішою системою для позиціонування зовні приміщень є Система глобального позиціонування (GPS). Всередині приміщень широко використовують системи на основі Wi-Fi, проте такі системи споживають велику кількість енергії, в порівнянні з іншими радіо стандартами, такими як BLE чи навіть Bluetooth. Позиціонування не обмежується радіосистемами, також є доступні акустичні та оптичні системи позиціонування.

Bluetooth Low Energy – це технологія цифрової бездротової передачі даних з наднизьким енергоспоживанням і малим радіусом передачі (10 м), заснована на недорогих мікросхемах в передавальних пристроях. Вона є перспективною для використання у позиціонуванні всередині приміщення. Основні переваги таких систем – дешеві апаратні компоненти, які є широко розповсюджені на ринку, та низьке енергоспоживання. Проте також існує ряд обмежень в використанні даних систем, які накладаються стандартом BLE. Основною проблемою є багатопроменеве згасання – деструктивний результат накладання декількох радіо-хвиль, яке спричинене нерівномірністю поширення матерії в досліджуваному середовищі. Також обмеження накладають статичні і рухомі об'єкти. А саме – різноманітністю їхнього складу – різні матеріали по різному поглинають чи відбивають радіо-хвилі. Також рухомі об'єкти спричиняють додаткові шуми, та невідповідності при створенні карти середовища, або так званого «відбитка» при використанні методів на основі «відбитків пальців». Проте використовуючи спрощення та збільшуючи погрішність методів, можна зменшити вплив негативних факторів.

В роботі наведено приклад системи позиціонування на базі BLE її переваги та недоліки. Запропоновано алгоритм для цієї системи.

Зважаючи на все вище описане, методи і алгоритми позиціонування на основі стандарту Bluetooth Low Energy виглядають перспективною розробкою, яка дозволить покращити логістику, та можуть використовуватися в робототехніці для проектування складних систем чи роботів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Department of Defense. Global Positioning System standard positioning service performance standard, fourth edition, 2008. Режим доступу до журн.: <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>
- [2] Bluetooth Special Interests Group. Bluetooth Core Specification Version 4.0, first edition, 2010. Режим доступу до журн.: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-4-0/>



- [3] Mikkel Baun Kjærgaard. Indoor positioning with radio location fingerprinting. arXiv preprint arXiv:1004.4759, 2010. Режим доступу до журн.: <https://arxiv.org/abs/1004.4759>
- [4] Konrad Lorincz and Matt Welsh. Motetrack: A robust, decentralized approach to rf-based location tracking. In Location-and Context-Awareness, pages 63–82. Springer, 2005. Режим доступу до журн.: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/11426646\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/11426646_7)
- [5] Cemin Zhang, Michael Kuhn, Brandon Merkl, Mohamed Mahfouz, and Aly E Fathy. Development of an uwb indoor 3d positioning radar with millimeter accuracy. In Microwave Symposium Digest, 2006. IEEE MTT-S International, pages 106–109. IEEE, 2006. Режим доступу до журн.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4014831>
- [6] Josef Hallberg, Marcus Nilsson, and Kåre Synnes. Positioning with bluetooth. In Telecommunications, 2003. ICT 2003. 10th International Conference on, volume 2, pages 954–958. IEEE, 2003. Режим доступу до журн.: [https://www.researchgate.net/publication/4010086\\_Positioning\\_with\\_Bluetooth](https://www.researchgate.net/publication/4010086_Positioning_with_Bluetooth)
- [7] Antti Kotanen, Marko Hannikainen, Helena Leppakoski, and Timo D Hamalainen. Experiments on local positioning with bluetooth. In Information Technology: Coding and Computing [Computers and Communications], 2003. Proceedings. ITCC 2003. International Conference on, pages 297–303. IEEE, 2003. Режим доступу до журн.: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/844385.846026>
- [8] Anja Bekkelien, Michel Deriaz, and Stéphane Marchand-Maillet. Bluetooth indoor positioning. Master’s thesis, University of Geneva, 2012.
- [9] Lin Ji. Increasing accuracy of location determination: Exploiting phase change reconstruction and timing measurements. Master’s thesis, Royal Institute of Technology, 2007. Режим доступу до журн.: <https://www.semanticscholar.org/paper/Increasing-Accuracy-of-Location-Determination-%3A-and-Ji/cfafdc9002449529ccc9437d811deb1165e69965>
- [10] Ye et al. Experimental impulse radio ieee 802.15.4a uwb based wireless sensor localization technology. ISSC 2011, 2011. Режим доступу до журн.: [https://www.researchgate.net/publication/332189898\\_Experimental\\_impulse\\_radio\\_IEEE\\_80215\\_4a\\_UWB\\_based\\_wireless\\_sensor\\_localization\\_technology\\_Characterization\\_reliability\\_and\\_ranging](https://www.researchgate.net/publication/332189898_Experimental_impulse_radio_IEEE_80215_4a_UWB_based_wireless_sensor_localization_technology_Characterization_reliability_and_ranging)
- [11] Alan Bensky. Wireless positioning technologies and applications. Artech HouseO, Norwood, MA, 2008. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1557266>
- [12] <https://www.semanticscholar.org/paper/Passive-WiFi-Fingerprinting-Method-Kim-Han/0df82f253ffc6641845a5eb96707913318f0eb15/figure/0>
- [13] <https://www.senzmate.com/tech-blogs/indoor-forklift/>
- [14] [https://www.ucl.ac.uk/population-health-sciences/sites/population-health-sciences/files/180520\\_triangulation\\_in\\_aetiological\\_research.pdf](https://www.ucl.ac.uk/population-health-sciences/sites/population-health-sciences/files/180520_triangulation_in_aetiological_research.pdf)

**APPROACHES TO INDOOR NAVIGATION WITH BLUETOOTH LOW ENERGY****T.-N. Kalynchuk, I. Karbovnyk**

*Ivan Franko National University of Lviv,  
107 Tarnavsky St., UA-79017 Lviv, Ukraine  
[tadei-nazarii.kalynchuk@lnu.edu.ua](mailto:tadei-nazarii.kalynchuk@lnu.edu.ua), [ivan.karbovnyk@lnu.edu.ua](mailto:ivan.karbovnyk@lnu.edu.ua)*

The review paper discusses the topic of indoor positioning systems leveraging Bluetooth Low Energy as a core technology. It begins with an elucidative overview of the Bluetooth 4.0 standard, delineating its advancements and improvements over preceding iterations of Bluetooth technology, with particular emphasis on the features that facilitate indoor positioning.

The paper then transitions to a detailed exploration of the algorithms that underpin BLE-based positioning systems. It examines methodologies that utilize the time-of-flight techniques, alongside those that assess signal strength, such as Received Signal Strength Indicator, to estimate location with precision.

Furthermore, the discussion extends to the intrinsic benefits and potential drawbacks of BLE in the context of indoor positioning. It underscores the low energy consumption, cost-effectiveness, and the ubiquity of BLE-enabled devices as pivotal advantages, while also considering the limitations, including signal attenuation and multipath interference, which can impede accuracy.

Central to the paper is an in-depth analysis of the significant challenges encountered in the implementation of BLE-based indoor positioning. It scrutinizes factors such as environmental dynamics, user density, and architectural influences that can affect system performance. The paper also contemplates the integration of BLE with other technologies and the potential for hybrid systems to overcome these hurdles.

In conclusion, the paper provides a forward-looking perspective on the future of indoor positioning, emphasizing the role of BLE in creating more responsive and integrated environments.

*Key words:* indoor positioning, Bluetooth, Bluetooth Low Energy, RSSI, angulation, lateration, fingerprinting

*Стаття надійшла до редакції 11.11.2023  
Прийнята до друку 24.11.2023*