

УДК 621.395.7

DOI: 10.31673/2786-8362.2025.016173

Горохов О.С.; Яковець В.П.;
Макаренко А.О., д.т.н.

ПОЗИЦІОНУВАННЯ АБОНЕНТСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ В МЕРЕЖАХ 5G З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПЕРЕДЖЕННЯ ЧАСУ

Horokhov O.S., Yakovets V.P., Makarenko A.O. 5G network user equipment positioning with the use of timing advance. This article is devoted to the study of positioning methods for user equipment for navigation, industry and public safety. In scenarios where the use of GPS is complicated by different factors, positioning can be provided using the standard functionality of the cellular network. This paper discusses positioning methods in 5G networks, in particular, those based on E-CID, field strength, difference in time of arrival, and LPHAP, and proposes a method based on timing advance. The proposed method is aimed at simplifying the positioning procedure, ensuring high accuracy of determining the location of subscriber equipment and reducing power consumption during positioning. The method of reducing the error by averaging a number of TA values is investigated. Methods for reducing UE power consumption in the location process for critical scenarios are investigated. Possible problems that lead to discrepancies in the time synchronization required to achieve the highest possible positioning accuracy when using the presented method are considered.

Keywords: 5G, positioning, timing advance, navigation

Горохов О.С., Яковець В.П., Макаренко А.О. Позиціонування абонентського обладнання в мережах 5G з використанням випередження часу. Стаття присвячена дослідженню методів позиціонування абонентського обладнання для навігації, промисловості та громадської безпеки. В сценаріях, коли використання GPS з різних причин ускладнене, позиціонування може бути забезпечене за допомогою штатного функціоналу стільникової мережі. В статті розглянуті методи позиціонування в мережах 5G, зокрема на основі E-CID, напруженості поля, різниці в часі прийому сигналу і LPHAP та запропонований метод, заснований на випередженні часу. Запропонований метод направлений на спрощення процедури позиціонування, забезпечення високої точності визначення місцезнаходження абонентського обладнання та зменшення енергоспоживання при позиціонуванні. Досліджено метод зменшення помилки за допомогою усереднення ряду значень ТА. Досліджені методи зменшення енергоспоживання UE в процесі визначення місцезнаходження для критичних сценаріїв. Розглянуті можливі проблеми, що призводять до розбіжностей часової синхронізації, необхідної для досягнення максимально високої точності позиціонування при застосуванні представленого методу.

Ключові слова: 5G, позиціонування, випередження часу, навігація

Вступ

Стрімкий розвиток мобільних мереж, Інтернету речей, автоматизації виробництва та послуг на основі місцезнаходження вимагає максимально точного визначення місцезнаходження користувача в будь-який момент часу. Супутникові системи навігації дозволяють визначати позицію користувацького обладнання з достатньо високою точністю, але їх використання має ряд недоліків, серед яких можлива довга тривалість першого визначення місцезнаходження (Time to First Fix – TTFF), низька точність позиціонування в приміщеннях та низька енергоефективність, що для мобільних пристроїв є критичним параметром. Поєднання супутникових систем навігації з мобільними мережами нового покоління дозволить покращити показники швидкості та точності визначення місцезнаходження користувача, а також збільшити енергоефективність при позиціонуванні.

Позиціонування передбачає визначення місцезнаходження абонентського терміналу вимірами радіосигналів в мобільній мережі зв'язку. Позиціонування користувацького обладнання потрібне для сценаріїв, в яких існує необхідність швидкого визначення максимально точного місцезнаходження абонента за допомогою існуючої інфраструктури. Головним чином це сценарії забезпечення громадської безпеки, наприклад швидкий пошук та визначення місцезнаходження абонентів, що викликають екстрені служби. Інші пропонувані сценарії використання це ефективний менеджмент працівників на основі їх поточного місце-

знаходження на об'єкті, спрощення процесу інвентаризації, служба навігації на основі стільникових мереж зв'язку та особиста безпека громадян. Важливою складовою при цьому є конфіденційність, оскільки місцезнаходження користувача не є загальнодоступною інформацією. Чим вища точність визначення розташування, тим вищий ризик порушення конфіденційності. Важливо, щоб використання даних мережею було правомірним та відповідало місцевим вимогам та законам.

Аналіз останніх досліджень. В [1] описується використання мережі 5G в поєднанні з технологією позиціонування PPP (Precise Point Positioning) для забезпечення максимальної точності визначення місцезнаходження користувача за допомогою кута надходження сигналу, RTT (Round-Trip Time – часу прийому-передачі) та TDOA (Time-Difference-of-Arrival – різниця в часі прийому сигналу). В [2] запропоновано квадратнокорінний сігма-точковий стабільний фільтр (Square Root Unscented Stable Filter) для гібридного GNSS та 5G позиціонування з компактною фільтровою архітектурою в високонадійній просторово-часовій мережі (Highly Dependable Spatio-Temporal Network), що дозволяє високонадійне та точне визначення місцезнаходження в поєднанні 5G та супутниковою системою навігації. В [3] досліджується гібридне позиціонування GNSS RTK (Real Time Kinematic) та 5G для покращення точності позиціонування в статичному та динамічному режимі з середньою та довгою базою.

Постановка завдання. Масштабне впровадження стільникових мереж 5G, що забезпечують швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с відкриває нові можливості використання та сценарії надання послуг мобільного зв'язку. Завдяки низькій затримці більш високих частот, мережі п'ятого покоління дозволяють впровадження таких концепцій як Інтернет речей, безпека дорожнього руху та автоматизація виробництва. Ці сценарії використання вимагають низької затримки та точності визначення місцезнаходження абонентського обладнання. Для кожного конкретного сценарію необхідний обґрунтований вибір найбільш підходящого методу визначення місцезнаходження в залежності від навколишніх умов. В цій статті буде проведений аналіз різних методів позиціонування в 5G-мережах для різних сценаріїв застосування, зокрема з використанням Timing Advance та в поєднанні з супутниковими системами навігації.

Метою роботи є дослідження методу позиціонування в мережах мобільного зв'язку п'ятого покоління з використанням Timing Advance.

Виклад основного матеріалу дослідження

Випередження часу (Timing Advance – TA) відповідає часу, який потрібен сигналу, щоб досягти базової станції від користувацького обладнання. У системах LTE і 5G воно зазвичай використовується для коригування часу передавання сигналу між пристроями по висхідній лінії зв'язку і компенсації затримки розповсюдження сигналу між UE і БС, щоб забезпечити надходження сплесків, які передають UE, усередині таймслота без перекриття інших таймслотів, що дає змогу уникнути колізій на БС. Пристрій може використовувати TA як апроксимацію часу передачі сигналу від пристрою до БС за відсутності вихідного вимірювання часу прийому (Time of Arrival – TOA). TA є саме апроксимацією часу передачі від пристрою до БС (Device to Base Station – D2B), оскільки кожне значення TA відповідає певному діапазону значень часу прибуття (Time of Arrival – TOA). Неточність опорного часу можлива через обмежену деталізацію TA та випадкові збурення в TOA, спричинені помилками вимірювання та багатопроблемністю.

Одним із рішень для зменшення помилки оцінки TOA є взяття середнього значення двох або більше послідовних TA [5]. У більшості випадків може виникнути помилка зміщення, оскільки безперервний діапазон фактичної затримки передачі відображається на дискретних місцях центрів TA-бітів. Середнє значення зменшує помилку, спричинену вимірами TOA, яким присвоюються значення TA, відмінні в той чи інший бік від істинного TA. Необхідна точність синхронізації може бути досягнута шляхом відповідного вибору розміру усереднення для заданої випадкової помилки вимірювань, на яку впливають умови передавання. Таким

чином, усереднення кількох ТА може зменшити помилку та задовольнити загальні вимоги точності.

Встановлення часової прив'язки UTC на UE може бути забезпечено GPS. Однак при використанні цього методу в приміщеннях може виникати слабе приймання сигналу та перешкоди, а головним недоліком є високі експлуатаційні витрати. Для поліпшення приймання сигналу можна використовувати фідерний кабель з підсилювачем від антени до приймача, жертвуючи гнучкістю та відносною дешевизною розгортання. Мережа 5G досить масштабована і стабільна, щоб надавати послуги синхронізації, хоча повітряний інтерфейс 5G потребує модернізації для передавання точного еталону часу на UE. Загальне уявлення про час може підтримуватися шляхом періодичного передавання тимчасових міток еталонного часу від БС до UE [6]. UE використовують інформацію про мітки часу для вирівнювання свого годинника після видалення будь-якого прогресу часу з екземпляра повідомлення «мітка часу - прийом».

Період синхронізації залежить від частоти і фазової стабільності вбудованих генераторів у пристроях, що призводить до перекосу і дрейфу годинника. На точність синхронізації можуть впливати різні проблеми, пов'язані з каналом і БС, такі як час розповсюдження (джиттер), асиметрія розповсюдження висхідною/низхідною лінією зв'язку, затримки планування/доступу до радіочастотного ресурсу, помилка вирівнювання часу (Time Alignment Error – TAE), затримка переходу від часової мітки до передавання та гранулярність часової мітки. У нашому аналізі ми вважатимемо, що БС і UE синхронізовані та не піддаються впливу перерахованих вище факторів.

Позиціонування в 5G NR. Стільникові мережі зв'язку п'ятого покоління підтримують різні методи позиціонування. В позиціонуванні на основі Cell ID абонентський термінал надсилає RRC-запит на встановлення зв'язку, що включає в собі ідентифікатор стільника, на основі якого визначається місцезонашування UE. Цей метод не потребує позиційних вимірювань абонентським терміналом, тому відповідь може бути вкрай швидкою. Недоліком цього методу позиціонування є низька точність позиціонування, що також залежить від радіусу стільника.

В позиціонуванні на основі E-CID LMF (Location Management Function – функція управління місцезонашуванням) вимірює відстань від UE до кожного стільника на основі значень SS-RSRP (Reference Signal Received Power – отримана потужність на основі еталонних сигналів від БС) та SS-RSRQ (Reference Signal Received Quality – отримана якість еталонного сигналу). Для розрахунку SS-RSRQ використовуються значення RSSI (Received Signal Strength Indicator – показник потужності отриманого сигналу) та RSRP [8]. Цей метод позиціонування має два різновиди: висхідний та низхідний. При висхідному E-CID-позиціонуванні, БС надсилає вимірювання до LMF, яка на основі даних вимірювань визначає відстань між абонентським терміналом та антенами кожної БС для визначення місцезонашування UE. Вимірювання включають виміряні абонентським терміналом SS-RSRP та SS-RSRQ обслуговуючої та сусідніх БС, вимірювання Timing Advance базовою станцією, NCGI (NR Cell Global Identity – глобальний ідентифікатор стільника) та NR TAC (Tracking Area Code – код розподілу типу). При низхідному E-CID-позиціонуванні вимірювання надсилає не БС, а UE. Абонентський термінал в цьому випадку надсилає вимірювання до LMF для визначення свого розташування через LPP-повідомлення (LTE Positioning Protocol – протокол позиціонування LTE). На основі вимірювань RSRP та RSRQ обслуговуючої та сусідніх БС надісланих з UE, LMF вимірює відстань між абонентським терміналом та кожною БС, після чого визначає розташування UE.

Позиціонування тріангуляційним методом на основі напруженості поля (Field Strength Triangulation-based Positioning) полягає в обчисленні розташування абонентського терміналу на основі відмінностей в потужності сигналу між кожною парою pRRU (Pico Remote Radio Unit – віддалений радіоблок) та їх відомими координатами. В цьому методі позиціонування принаймні три pRRU вимірюють значення RSRP від UE та надсилають результат до LMF, яка визначає розташування UE зазначеним раніше способом. Метод тріангуляції недоцільний у

випадку, якщо всі три pRRU не можуть надати інформацію про вимірювання RSRP від UE. При позиціонуванні на основі напруженості поля та цифрового відбитку (Field Strength Fingerprint-based Positioning), декілька pRRU в радіусі БС вимірюють значення висхідних SRS (Sounding Reference Signal – еталонний сигнал звучання), які відправляються з абонентського терміналу до LMF. LMF визначає розташування UE порівнюючи результати з базою даних SRS-відбитків. База даних зберігає таблицю зіставлення координат місцезнаходження та характеристик повітряного інтерфейсу для конкретного місця [4].

Точне позиціонування (Precise Positioning) це функція, доступна для малостільникової NR-системи для використання в приміщеннях – LampSite, та включає три методи позиціонування: на основі U-TDOA (Time Difference of Arrival – різниця в часі прийому), на основі TOA-відбитку та LPHAP (Low-Power High-Accuracy Positioning – високоточне позиціонування з низьким енергоспоживанням) [9]. При U-TDOA три pRRU в радіусі БС отримують значення TOA, та надсилають їх до LMF, що обчислює розташування UE на основі різниць в часі прийому між кожною парою БС, та на основі їх відомих розташувань. При використанні в позиціонуванні TOA-відбитку, LMF визначає розташування UE на основі зіставлення параметрів TOA та характеристик конкретного розташування, записаних в SRS-базі.

Найбільший інтерес представляє LPHAP завдяки низькому енергоспоживанню. Принцип позиціонування LPHAP заснований на TDOA, відмінність полягає в послідовності дій UE при виконанні алгоритму позиціонування [7]. У LPHAP, UE налаштовується на виконання вимірювань позиціонування в звітні інтервали. Коли сконфігурований звітний інтервал перекривається циклом eDRX (Extended Discontinuous Reception – Розширений переривчастий прийом), UE в межах PTW (Paging Time Window – Вікно пейджингу) отримує ресурси PUSCH і SRS, виділені БС, потім надсилає SRS для визначення місцезнаходження і повідомляє про стан за допомогою малої передачі даних (SDT – Small Data Transmission) PUSCH (Physical Uplink Shared Channel – Фізичний розподільчий канал висхідного зв'язку) у стані RRC_INACTIVE до мережі [10]. БС вимірює SRS для позиціонування і повідомляє про обчислення місцезнаходження, виконані LMF. На початку наступного періоду позиціонування UE зчитує інформацію SSB, завершує синхронізацію часу і надсилає інформацію про позиціонування. Після цього UE знову переходить у сплячий режим, періодично виконуючи цю процедуру позиціонування. Розширений цикл переривчастого прийому налаштовується мережею, коли UE знаходиться в стані очікування, і коли він налаштований, UE стають активними лише під час PTW, а між двома PTW залишаються в сплячому режимі, що дозволяє UE значно заощаджувати енергію. Якщо інтервал звітування не перекривається з налаштованим циклом eDRX, UE може прокидатися між PTW для виконання вимірювань позиціонування, щоб забезпечити виконання вимог LPHAP без необхідності змінювати конфігурацію циклу eDRX спеціально для позиціонування.

Метод позиціонування з застосуванням Timing Advance. Представлений метод позиціонування потребує визначення відстані між чотирма БС та UE, координати якого необхідно визначити. На результати пошуку впливають характеристики каналу зв'язку, а саме тип діапазону (FR1 або FR2), співіснування системи з LTE, та тип поділу вхідного і вихідного трафіку (TDD або FDD). Ці параметри впливають на зміщення TA, що потрібно враховувати при обчисленнях. Алгоритм позиціонування виконано на мові програмування Python та описується наступними кроками:

(1) Введення даних: 4 набори координат та значень TA кожної БС; сценарій діапазону передачі (FR1/FR2, TDD/FDD, співіснування з LTE).

(2) Обчислення Timing Advance з врахуванням зміщення:

$$T_{TA\text{зміщ}} = (N_{TA} + N_{TA\text{зміщ}}) \cdot T_c,$$

де $T_c = 1 / (\Delta f_{\max} \cdot N_t) = (1 / 480 \cdot 4096) = 0,509 \text{ нс}$, $N_{TA\text{зміщ}}$ – зміщення TA (0/25600/39936 в FR1, 13792 в FR2).

(3) Обчислення відстані на основі Timing Advance:

$$L = \frac{(3 \cdot 10^8 \cdot T_{TA\text{зміщ}})}{2 \cdot 10^{-6}}, \text{ м}$$

(4) Перетворення географічних координат в прямокутну проекцію Гауса-Крюгера.

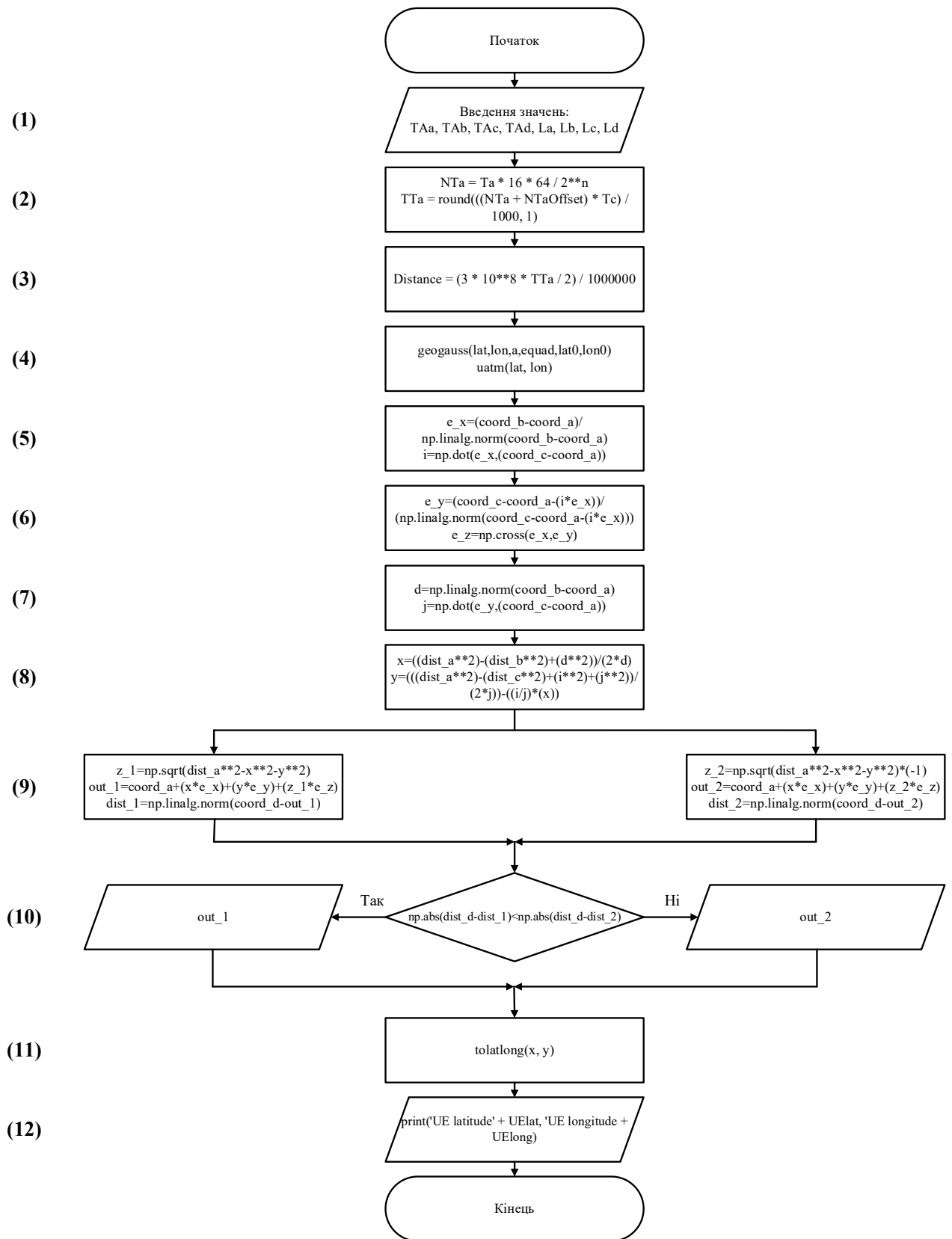


Рис. 1. Алгоритм позиціонування в мережі 5G на основі випередження часу

(5) Початок процесу трилатерації позиції UE на основі координат трьох БС. Координати БС представляються в вигляді векторів, пошук починається з нормованої різниці для першої осі на основі перших двох наборів координат БС:

$$E_x = \frac{BS_1 - BS_2}{\|BS_1 - BS_2\|},$$

де BS_1 – перший набір координат БС₁, BS_2 – другий набір координат БС₂. Середнє значення перших трьох наборів координат БС:

$$i = E_x \cdot (BS_3 - BS_1)$$

(6) Визначення нормованої різниці для другої осі:

$$E_y = \frac{BS_1 - BS_2 - i \cdot E_x}{\|BS_1 - BS_2 - i \cdot E_x\|}$$

Третя вісь для правильного визначення перпендикуляру представляється у вигляді векторного добутку двох осей

(7) Обчислення нормованої різниці перших двох наборів координат:

$$d = \|BS_1 - BS_2\|$$

Середнє значення перших трьох наборів координат БС для другої вісі:

$$j = E_y \cdot (BS_3 - BS_1)$$

(8-10) Визначення правильної відповіді на основі четвертого набору координат.

(11) Перетворення прямокутних координат в географічну проєкцію.

(12) Виведення результату.

Висновки

В роботі досліджені методи позиціонування в стільникових мережах п'ятого покоління. Були розглянуті методи на основі E-CID, TDOA, та точне позиціонування методом LPPA. На основі розглянутих особливостей методів був представлений метод на основі випередження часу та триангуляції отриманих значень часу прийому сигналу для визначення точного місцезнаходження абонентського обладнання. Проаналізовано метод зменшення помилки вимірів часу прийому сигналу за допомогою усереднення значень послідовних ТА. Кількість значень ТА може масштабуватись у відповідності до поточних вимог швидкості та точності позиціонування. Для зменшення енергоспоживання при позиціонуванні в критичних сценаріях можливе застосування алгоритмів LPPA, при яких UE переходить в сплячий режим між виконанням процедури позиціонування. Завдяки активності UE тільки під час вікна пейджингу значно заощаджується енергія пристрою. В представленому в статті методі позиціонування заощадження енергії досягається за рахунок використання в процесі позиціонування стандартних вимірювань стільникової мережі.

Список використаної літератури:

1. Preliminary performance analysis of tightly-coupled 5G/PPP positioning based on different 5G observations / W. Guo et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tim.2025.3527605>.
2. GNSS-5G Hybrid Positioning Based on Joint Estimation of Multiple Signals in a Highly Dependable Spatio-Temporal Network / J. Liu et al. Remote Sensing. 2023. Vol. 15, no. 17. P. 4220. URL: <https://doi.org/10.3390/rs15174220>.
3. Performance Research of RTK/5G Combined Positioning Model / F. Li et al. Measurement Science and Technology. 2022. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aca8c3>
4. Impact of Indoor Multipath Channels on Timing Advance for URLLC in Industrial IoT / S. Zeb et al. 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Dublin, Ireland, 7–11 June 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/iccworkshops49005.2020.9145066>.
5. Shi H., Aijaz A., Jiang N. Evaluating the Performance of Over-the-Air Time Synchronization for 5G and TSN Integration. 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Bucharest, Romania, 24–28 May 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/blackseacom52164.2021.952783>.
6. 5G NR Positioning Enhancements in 3GPP Release-I8 / H.-S. Cha et al. IEEE Communications Magazine. 2025. Vol. 9, no. 1. P. 22–27. URL: <https://doi.org/10.1109/mcomstd.0001.2400006>.

7. Zhu R., Zhang L. A 5G Positioning Method Based on Multi-fingerprint Features and Improved WKNN. 2024 Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC), Dalian, China, 12–14 April 2024. 2024. P. 489–493. URL: <https://doi.org/10.1109/ipec61310.2024.00089>.
8. Advancements in Indoor Precision Positioning: A Comprehensive Survey of UWB and Wi-Fi RTT Positioning Technologies / J. Qiao et al. Network. 2024. Vol. 4, no. 4. P. 545–566. URL: <https://doi.org/10.3390/network4040027>.
9. Enabling Low-Power High-Accuracy Positioning (LPHAP) in 3GPP NR Standards / Y. Wang et al. 2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Lloret de Mar, Spain, 29 November – 2 December 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/ipin51156.2021.9662628>.
10. Njoku F. C., Ibikunle F., Adikpe A. O. A Review on Discontinuous Reception Mechanism as a Power Saving Approach for 5G User Equipments at Millimetre-Wave Frequencies. 2023 International Conference on Science, Engineering and Business for Sustainable Development Goals (SEB-SDG), Omu-Aran, Nigeria, 5–7 April 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/seb-sdg57117.2023.10124494>.

Автори статті

Горохов Олександр – аспірант, старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-5053-3820

Яковець Всеволод – аспірант, старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0002-3866-8017

Макаренко Анатолій – доктор технічних наук, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-4081-328X

Authors of the article

Horokhov Oleksandr – postgraduate, senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-5053-3820

Yakovets Vsevolod – postgraduate, senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0002-3866-8017

Makarenko Anatoliy – Doctor of Sciences (technical), Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-4081-328X