

**Зилевич М.О.**

<https://orcid.org/0000-0003-1646-0557>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сорокін Д.А.**

<https://orcid.org/0000-0001-8221-216X>

Національний технічний університет України

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ДЖЕРЕЛ ПОХИБОК ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАДАЧ ГЕОЛОКАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa

У статті розглянуто проблему геопозиціонування об'єктів у мережах Internet of Things (IoT) з використанням технології LoRa, що належить до класу LPWAN. Зростання кількості IoT-пристроїв та розширення сфер їх застосування зумовлює потребу у створенні енергоефективних і масштабованих систем визначення місцезнаходження. Технологія LoRa характеризується великою дальністю передачі даних, низьким енергоспоживанням і відносно невисокою вартістю розгортання мережі, що робить її перспективною для систем геолокації в міських, промислових і сільських умовах. Водночас використання цієї технології супроводжується рядом факторів, які впливають на точність визначення координат об'єктів.

У роботі проаналізовано основні методи визначення місцезнаходження у бездротових мережах, зокрема RSSI, ToA, TDoA та AoA. Обґрунтовано доцільність використання методу локалізації на основі індикатора потужності прийнятого сигналу (RSSI), оскільки він не потребує додаткового апаратного забезпечення та може бути реалізований у більшості існуючих мереж LoRaWAN. Разом з тим такий підхід є чутливим до впливу навколишнього середовища та наявності перешкод, що призводить до появи похибок під час оцінювання відстані між вузлами мережі.

Розглянуто алгоритм геопозиціонування на основі методу трилатерації, у якому координати цільового вузла визначаються за відстанями до кількох базових станцій. Проаналізовано процес перетворення параметрів радіосигналу у координати об'єкта. Показано, що точність позиціонування значною мірою залежить від параметрів моделі поширення сигналу, які змінюються залежно від типу середовища.

У результаті аналізу систематизовано основні джерела похибок геопозиціонування в мережах LoRa: вплив навколишнього середовища (затінення та багатопроменеве поширення сигналу), динамічні фактори, похибки математичних моделей, фізичні особливості згасання радіохвиль, технічні характеристики обладнання та геометрію розташування базових станцій. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням моделей втрат сигналу, використанням методів фільтрації вимірювань і застосуванням вагових коефіцієнтів на основі співвідношення сигнал/шум (SNR) для підвищення точності визначення координат.

**Ключові слова:** Internet of Things, технологія LoRa, геолокація, похибка, втрати на трасі, алгоритм локалізації.

**Постановка проблеми.** Традиційні методи позиціонування, такі як глобальна навігаційна супутникова система (GNSS/GPS), попри їхню високу точність на відкритій місцевості, стикаються з критичними обмеженнями в умовах щільної міської забудови, всередині приміщень та в промислових середовищах через затухання сигналу, ефекти багатопроменеве поширення та високого енергоспоживання кінцевих пристроїв.

Для вирішення вузьких місць навігаційної супутникової системи варто розглянути застосування IoT-пристроїв. Це пов'язано, в першу чергу, з поширенням технологій IoT та мобільних пристроїв. Згідно з останнім звітом IoT Analytics, очікувалось, що до кінця 2025 року кількість підключених IoT-пристроїв у всьому світі зросте на 14% і сягне позначки 21,1 мільярда [1]. Їх використання базується на системах наземного радіозв'язку, дальність покриття яких напряму визначена



технологією мережі. Вони умовно поділяються на три категорії: 10 – 100 см (NFC та RFID), 10 м – 100 м (Wi-Fi, BLE та ZigBee) та 1 – 50 км (стільникова мережа та LPWAN). Технології LPWAN, і зокрема технологія LoRaWAN, стають дедалі актуальнішими завдяки своїм характеристикам, включаючи покриття на значні відстані (до 15 км у міських районах та до 50 км у сільській місцевості), низьке енергоспоживання, низьку вартість розгортання (безкоштовна ліцензована смуга частот та дешеві кінцеві вузли) тощо [2-4].

Таким чином, альтернативні методи позиціонування варто розглядати саме в мережах стільникового та LPWAN зв'язку. Одним з представників цих мереж є технологія бездротового зв'язку великої дальності (LoRa) заснована на методах розширеного спектру лінійною частотною CSS (Chirp Spread Spectrum) модуляцією, класифікована як технологія зв'язку низькоенергетичних широкомугових мереж (LPWAN). Це дозволяє виконувати передачу на значну відстань та підвищити прохідну спроможність радіосигналу, порівняно з традиційною модуляцією із частотною маніпуляцією (FSK). За рахунок цього система є більш стійкою до впливу стаціонарних та нестаціонарних завад. При цьому така технологія споживає близько 14 мА в режимі очікування та до 45 мА під час передачі даних, що є показником високої енергоефективності. [5, 6].

LoRa – перше рішення, що використовує технологію CSS для економічно ефективного комерційного застосування, що дозволяє не тільки забезпечити широкомасштабне підключення вузлів в мережі, але і суттєво знизити вартість кінцевих пристроїв та інфраструктури в цілому. Тому технологія LoRa (Long Range) як провідна технологія LPWAN, відіграє вагомий роль у забезпеченні бездротового зв'язку на значні відстані з низьким енергоспоживанням [7].

Як правило, шлюзи та вузли LoRa розміщуються або у міських умовах, де має місце щільна забудова та певна кількість джерел спотворення радіосигналу, або у сільських умовах, де сигнал розповсюджується на великі відстані, що є істотним обмеженням для радіопередачі. Це створює так звані стаціонарні та нестаціонарні завади, які зменшують ефективність, точність та в цілому ускладнює геопозиціонування, що буде розглянуто далі.

Таким чином використання даної технології актуальне для застосування її в системах позиціонування на місцевості. Водночас виникає низка чинників, відповідно до яких, використання тех-

нології LoRa супроводжується існуванням завад, які породжують похибки. Аналіз та систематизація джерел таких похибок стає актуальним завданням для пошуку рішень протидії впливу стаціонарних та нестаціонарних завад. Це дозволяє поліпшити оптимальність визначення місцезнаходження об'єкту в умовах складного навколишнього середовища з використанням наземних систем позиціонування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішення задачі локалізації (геопозиціонування) є багатограничним процесом оцінки фізичних координат вузла з невідомим розташуванням відносно опорних точок (анкерів). З погляду системного аналізу та обробки сигналів, методи локалізації класифікуються за типом використовуваних вимірювань, геометричними принципами розрахунку та ступенем залучення заздалегідь підготовлених даних. Загальноприйняті підходи визначають методи на основі дистанційних вимірювань.

Отримання координат шляхом таких вимірювань можна описати за наступним спрощеним алгоритмом. В системі геопозиціонування, що складається з передавача (його місцезнаходження необхідно визначити) та приймачів (базових станцій для збору даних) вимірюються фізичні параметри, які слугуватимуть основою для визначення остаточної координати об'єкту. Відповідно до [5] можна виокремити наступні методи та параметри, які базуються на перетворенні фізичних характеристик радіосигналу в оцінку відстані або кута:

– RSSI (Received Signal Strength Indicator): Використовує рівень потужності прийнятого сигналу для розрахунку відстані на основі моделей затухання, таких як логарифмічна модель втрат на шляху (Log-distance Path Loss). Це найбільш економічно ефективний метод, оскільки він не потребує додаткового обладнання, проте він характеризується високою дисперсією через багатопроменеве поширення та затінення.

– ToA (Time of Arrival): Базується на вимірюванні абсолютного часу проходження сигналу від передавача до приймача. Метод вимагає прецизійної синхронізації годинників усіх вузлів мережі, оскільки навіть мікросекундна похибка призводить до значних відхилень у координатах.

– TDoA (Time Difference of Arrival): Розраховує різницю часу приходу сигналу на кілька шлюзів. Це дозволяє уникнути необхідності синхронізації кінцевого пристрою з мережею, вимагаючи синхронізації лише між шлюзами.

– AoA (Angle of Arrival): Визначає кут приходу сигналу за допомогою фазованих антенних решіток.

Метод дозволяє реалізувати локалізацію за допомогою триангуляції, але потребує дорогого та енергоємного обладнання.

У [4] досліджується роль індикатора потужності прийнятого сигналу (RSSI) у локалізації об'єктів і здійснюється комплексне порівняння цих методів та забезпечує детальний аналіз їхньої продуктивності, сильних сторін та обмежень у реальних сценаріях.

Тоді як у [8] зазначається, що позиціонування на основі індикатора потужності прийнятого сигналу (RSSI) підходить для розгортання мереж, завдяки своїй невисокій вартості та простій реалізації. Однак воно має низьку стабільність та точність, оскільки RSSI спотворюється об'єктами та впливом навколишнього середовища.

Водночас [9] порівнюють ці методи з точки зору проблеми затінення радіосигналу, вартості розгортання системи і її експлуатації. Приходять до висновку, що застосуванням різних алгоритмів визначення місцезнаходження залежить від наявного обладнання, відстані шлюзів та вузлів, а також програмних можливостей в середовищі LoRaWAN.

Узагальнюючи попередні дослідження обрано метод, що базується на вимірюванні потужності прийнятого сигналу, тобто RSSI ранжування.

**Постановка завдання.** Вирішення задачі гео-позиціонування супроводжується низкою похибок на різних етапах її реалізації, що безпосередньо впливає на підсумкову точність визначення координат. Відповідно, завданням статті є аналіз і систематизація факторів та джерел, що генерують ці похибки в умовах використання технології LoRa.

**Виклад основного матеріалу.** На основі аналізу наукових джерел виокремлено наступні основні групи похибок гео-позиціонування:

1. Похибки, спричинені мінливістю навколишнього середовища Основною проблемою є висока чутливість показника RSSI до фізичних характеристик довкілля. Згасання у вільному просторі, в ідеальних умовах, залежить лише від відстані та частоти. Однак на практиці фактичні значення часто перевищують “ідеальні”. Під час бездротової передачі даних наявність перешкод між передавачем та приймачем порушує пряме поширення радіосигналу. Ці перешкоди викликають поглинання, відбиття та розсіювання електромагнітних хвиль, що призводить до значного зниження потужності сигналу на вході приймача – явища, відомого як затінення (Shadowing). Крім того, радіохвилі можуть досягати приймача різними

шляхами (через пряму видимість, відбиття та заломлення). Через різницю в довжині цих шляхів хвилі надходять із часовою затримкою, що спричиняє ефект багатопроменевого поширення (Multipath fading). Це генерує фазові зсуви та додатково погіршує якість сигналу [2, 6].

Окрім інфраструктурних об'єктів щільної міської забудови до джерел таких похибок також можна віднести погодні умови (зміна вологості, температури, опади).

2. Похибки, спричинені динамічними факторами. Процес геолокації рухомих об'єктів або робота в динамічному середовищі супроводжується появою тимчасових перешкод на шляху поширення радіосигналу (наприклад, рух людей чи транспорту). У випадку, коли об'єкт рухається статичні джерела перетворюються на динамічні. Така мінливість навколишнього середовища не тільки є джерелом затінення та багатопроменевого поширення, але і робить ці ефекти стохастичними [3].

3. Похибки моделей перетворення вимірюваного значення у відстань. Як зазначалося вище, радіосигнал поширюється в неідеальних умовах. Для врахування цих умов використовуються різноманітні моделі поширення радіохвиль, які математично описують характер впливу завад різної природи.

На рис. 1 наведено зв'язок між середовищем передачі та втратами сигналу. З аналізу можна зробити висновок, що основні втрати відбуваються в середовищі передачі.

Специфіка методу гео-позиціонування на базі RSSI полягає в оцінці потужності радіосигналу, що втрачається під час проходження від передавача до приймача (так звані втрати на трасі, Path Loss). Ці втрати визначаються за допомогою бюджету каналу зв'язку (Link Budget). Він розраховується як

$$P_{R_x} = P_{T_x} + G_{R_x} + G_{T_x} - L_{PL} \quad (1)$$

де  $P_{R_x}$  – це потужність сигналу в приймачі в дБ (відповідає RSSI),  $P_{T_x}$  – потужність сигналу в передавачі,  $G_{R_x}$  і  $G_{T_x}$  – є коефіцієнти посилення антен, які використовуються приймачем і передавачем відповідно,  $L_{PL}$  – складова, яка враховуватиме втрати сигналу [10].

Після визначення RSSI з використанням виразу (1), для подальшого розрахунку відстані до джерела сигналу необхідно встановити зв'язок між втратами та відстанню на трасі. Теоретично, бездротовий сигнал використовує вільний простір, як середовище передачі. Втрати в тракці

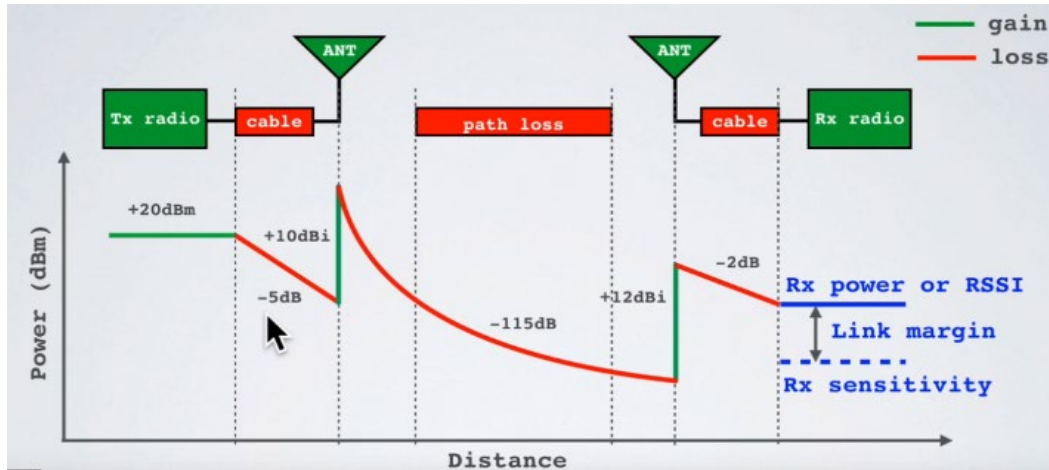


Рис. 1. Втрати сигналу в лінії передачі

передачі зростають пропорційно квадрату відстані, яку він проходить від точки передачі. Відповідно для ідеальних умов можна визначити, що

$$L_{PL}(R) = 20 * \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right) \quad (2)$$

де  $R$  – відстань між антенами,  $\lambda$  – довжина хвилі.

Як зазначалось раніше, є багато джерел електромагнітних полів, особливо в міських районах, які впливають на несучий сигнал [11]. В цьому випадку більш доречно оцінювати відстань за формулою логарифмічної відстані втрат на трасі (Log-distance path loss model) [12]:

Це можна описати простим рівнянням:

$$L_{PL}(d) = L_{PL}(d_0) + 10 * Y * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3)$$

де  $L_{PL}(d)$  – являє собою втрати на трасі в дБ на відстані  $d$ ,  $L_{PL}(d_0)$  – є втрати в тракці передачі на опорній відстані  $d_0$ , де ще не спостерігається вплив навколишнього середовища,  $Y$  є показником втрат на трасі і  $X_\sigma$  – це втрата від затухання тіні з нульовим середнім гауссовим розподілом і еталоном відхилення від  $\sigma$ . Зазвичай  $d_0$  прийнято брати за 1 км.

Саме коефіцієнт  $Y$  визначає інтенсивність цих втрат. Наприклад, для міста Оулу у Фінляндії значення складає 2,32, а для міста Дортмунд в Німеччині -2,65. Такі відмінності обумовлені зовнішніми факторами та індивідуальними особливостями міського середовища [13].

Проведена оцінка точності з використанням цього показника в межах від 2 до 6 умовах закритого приміщення показало, що отримані значення досягали максимальної похибки при  $Y = 2$  та мінімальної похибки при  $Y = 6$ , що узгоджується з літературними значеннями [14].

Таблиця 1

Коефіцієнт інтенсивності втрат за D’Arienzo, M. [4],

Середовище	Показник втрат (Y)
Вільний простір	2
Міська забудова	2.7 to 3.5
Міська забудова із затіненням	3 to 5
Приміщення	1.6 to 1.8
Приміщення з перешкодами	4 to 6
Промислова забудова	2 to 3

Таким чином, можна стверджувати, що вибір моделі розрахунку втрат сигналу впливає на точність позиціонування. Треба зауважити, що не можна використовувати одне значення для різних середовищ, необхідно проводити окремі вимірювання для визначення цих параметрів.

4. Похибки спричинені фізичними властивостями згасання сигналу. Зв'язок між RSSI та відстанню описується логарифмічною або зворотно-експоненціальною залежністю, як зображено на рис.2, що породжує специфічні математичні труднощі [3, 4, 9]. На значних відстанях крива згасання стає більш пласкою, через що навіть незначна помилка у вимірюванні RSSI (шум) трансформується у відчутну похибку при оцінці фізичної відстані. Окрім цього відношення сигнал/шум (SNR) погіршується зі збільшенням відстані, що робить оцінку координат об'єктів на периферії мережі вкрай нестабільною [6, 9].

5. Похибки, спричинені технічними властивостями системи. Точність системи обмежена характеристиками обладнання, що використовується, та його конфігурацією [4]. По-перше, взаємодія обладнання має бути узгодженою, тому що при обрахунках враховуються такі його параметри як підсилення антен, втрати в трактах передачі. По-друге, напрямки антени цільового вузла та її

поляризація безпосередньо впливають на рівень сигналу, що приймається, і, як наслідок, на точність локалізації [3].

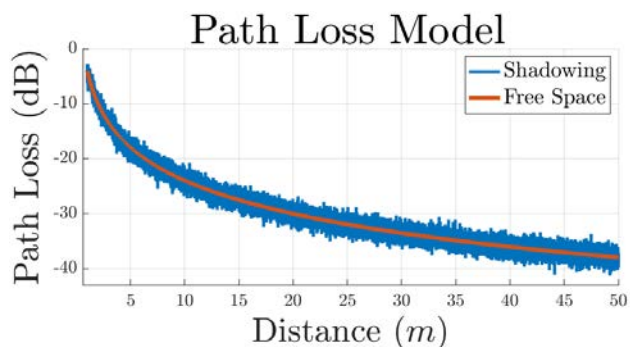


Рис. 2. Залежність гасання сигналу від відстані

6. Геометричні та алгоритмічні виклики. Ефективність алгоритмів трилатерації обмежена геометричною конфігурацією мережі. Взаємне розташування базових станцій та цільового об'єкта суттєво впливає на точність визначення його координат; при несприятливій геометрії (наприклад, розташуванні вузлів на одній лінії) помилки позиціонування можуть багатократно зростати [3].

В методі трилатерації місцезнаходження об'єкту визначається геометричним перетином кіл на площині. На практиці результатом перетину є певна площа, де ймовірно розташування об'єкта. Це змушує використовувати методи для апроксимації (наприклад, Min-Max або метод найменших квадратів), які також мають обмеження щодо точності [4, 8, 14].

7. Проблеми конфігурації мережі. Технологія LoRa базується на гнучкому налаштуванні параметрів фізичного рівня (PHY), що дозволяє адаптувати мережу до конкретних умов навколишнього середовища, вимог до дальності та енергоспоживання. До основних параметрів можна віднести [7]:

Spreading Factor (SF) – Фактор розширення спектра, який визначає кількість «чирпів» (chirps), що припадають на один інформаційний символ. У стандарті використовуються значення від 7 до 12. Вищий SF збільшує відношення сигнал/шум (SNR), чутливість приймача та дальність зв'язку, але водночас експоненціально збільшує час перебування в ефірі (Time-on-Air, ToA) та енергоспоживання. Варто зауважити, що сигнали з різними SF є квазі-ортогональними, що дозволяє шлюзу приймати їх одночасно на одному частотному каналі.

Bandwidth (BW) – Ширина смуги пропускання, яка визначає діапазон частот, у якому розподіляється енергія сигналу. Зазвичай це значення приймає діапазон 125 кГц, 250 кГц або 500 кГц.

Збільшення BW дозволяє підвищити швидкість передачі даних (Data Rate), але пропорційно знижує чутливість приймача через збільшення вхідного шуму [15].

Transmission Power (TP) – Потужність передачі на виході антени, зазвичай у діапазоні від 2 до 20 дБм. Вища потужність дозволяє подолати затухання в складному середовищі (наприклад, у закритих приміщеннях або через рослинність), проте це скорочує термін служби батареї та збільшує інтерференцію для сусідніх вузлів [16].

Coding Rate (CR) – Швидкість кодування визначає ступінь надлишковості для прямого виправлення помилок (FEC), її значення варіюються від 4/5 до 4/8. Вищий CR (наприклад, 4/8) забезпечує кращий захист від імпульсних завад, але збільшує ToA приблизно на 25% у порівнянні з CR 4/5 [17].

Оптимальна конфігурація мережі LoRa полягає у розв'язанні компромісу між надійністю доставки пакетів (PDR) та енергоефективністю. Для забезпечення надійності в реальних умовах при розрахунку бюджету лінії зв'язку рекомендується додавати запас міцності (margin), що враховує стандартне відхилення затухання сигналу ( $\sigma$ ).

**Висновки.** Таким чином, розглянуто спрощений алгоритм вирішення задачі геолокації з використанням методу трилатерації та його основні етапи. Встановлено, що на кожному з етапів існують джерела похибок, які можна систематизувати наступним чином.

Похибки спричинені мінливістю навколишнього середовища. Стаціонарні та нестаціонарні завади обумовлюють явище затінення та є джерелами багатопроменевого поширення сигналу, що зменшує точність визначення координати. Рух об'єкта під час позиціонування підсилює вплив даних явищ.

Похибки обумовлені математичними розрахунками. При моделюванні явища вільного згасання радіосигналу необхідно враховувати інтенсивність втрат в залежності від індивідуальних характеристик середовища розповсюдження радіохвиль. А вибір методу апроксимації буде впливати на точність отримання координат об'єкта.

Похибок техногенного характеру. При взаємодії пристроїв системи локалізації важливо враховувати технічні параметри системи, такі як підсилення антен, втрати потужності в тракці передачі, поляризацію антен, конфігурацію мережі. Окрім цього необхідно звернути увагу на геометрію розташування базових станцій, оскільки їх взаємне розташування суттєво впливає на подальші розрахунки.

Похибки, спричинені чутливістю системи позиціонування до роботи на значних відстанях, де вплив логарифмічного характеру затухання стає суттєвим. А відношення сигнал/шум робить оцінку таких значень вкрай нестабільною.

Перспективи подальших досліджень передбачають аналіз математичних моделей втрат

сигналу на місцевості з урахуванням нестационарних завад та ефекту багатопроменевості. Для підвищення точності визначення координати планується розглянути використання фільтрів для обробки помилкових вимірів або вагових коефіцієнтів що базуються на SNR (співвідношенні сигнал/шум).

#### Список літератури:

1. *State of IoT 2025: Number of connected IoT devices growing 14% to 21.1 billion globally*. URL: [iot-analytics.com](https://www.iot-analytics.com) (дата звернення: 13.03.2026).
2. Moradbeikie A., Keshavarz A., Lopes S. A. *Enhancing LoRaWAN Localization in Industrial Environments: Merging Path-Loss Modeling, Extended Kalman Filtering and Map-Matching*. IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 84765–84778. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3568750
3. Alireza S. *Evaluation and Improvement of the RSSI-based Localization Algorithm: Received Signal Strength Indication (RSSI)*. Digitala Vetenskapliga Arkivet, 2015. 109 p.
4. D'Arienzo M. *An Experimental Comparison of Basic Device Localization Systems in Wireless Sensor Networks*. Network. 2025. Vol. 5, № 2. P. 11. DOI: 10.3390/network5020011
5. Pastório A. F., De Camargo E. T. *Geolocation Techniques in LoRaWAN Networks as a Fault Tolerance Approach in GPS-Based Tracking Devices*. 2021 Third South American Colloquium on Visible Light Communications (SACVLC). 11-12 November 2021. DOI: 10.1109/SACVLC53127.2021.9652345
6. Xu T., Ma D., Fang W., Huang Y. *Experimental Study on the Propagation Characteristics of LoRa Signals in Maize Fields*. Electronics. 2025. Vol. 14. P. 2156. DOI: 10.3390/electronics14112156
7. Idris S., Karunathilake T., Förster A. *Survey and Comparative Study of LoRa-Enabled Simulators for Internet of Things and Wireless Sensor Networks*. Sensors. 2022. Vol. 22, № 15. P. 5546. DOI: 10.3390/s22155546
8. Shi Y., Shi W., Liu X., Xiao X. *An RSSI Classification and Tracing Algorithm to Improve Trilateration-Based Positioning*. Sensors. 2020. Vol. 20, № 15. P. 4244. DOI: 10.3390/s20154244
9. Bouras C., Gkamas A., Kokkinos A., Papachristos N. *Real-Time Geolocation Approach through LoRa on Internet of Things*. 2021 International Conference on Information Networking (ICOIN). 13-16 January 2021. DOI: 10.1109/ICOIN50884.2021.9333860
10. Semtech. *AN1200.22 LoRa Modulation Basics*. Camarillo, 2015. 26 p.
11. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. *Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios*. IEEE Wireless Communications. 2016. Vol. 23, № 5. P. 60–67. DOI: 10.1109/MWC.2016.7721743
12. Martin C. B., Roedig U., Voigt T., Juan M. A. *Do lora low-power wide-area networks scale? Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. 2016. P. 59–67. DOI: 10.1145/2988287.2989163
13. Petajajarvi J., Mikhaylov K., Roivainen A., Hanninen T., Pettissalo M. *On the coverage of lpwans: range evaluation and channel*. ITS Telecommunications. 2015. P. 55–59. DOI: 10.1109/ITST.2015.7377400
14. Olivera R., Flores J., Olivera R., Perez J., Munoz J. *Heuristic Approach to Indoor Localization Using LoRa RSSI Measurements*. RADIOENGINEERING. 2025. Vol. 34, № 3. P. 509–525. DOI: 10.13164/re.2025.0509
15. Nahorniuk O. A. *Method of Automatic Parameters Estimation of Radio Signals Generated According to LoRa Standard*. Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. 2024. Vol. 95. P. 23–30. DOI: 10.20535/RADAP.2024.95.23-30
16. Preamsankar G., Ghaddar B., Slabicki M., Di Francesco M. *Optimal Configuration of LoRa Networks in Smart Cities*. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Vol. 16, № 12. P. 7530–7543. DOI: 10.1109/TII.2020.2967123
17. Toro-Betancur V., Preamsankar G., Ghaddar B., Di Francesco M. *Modeling Communication Reliability in LoRa Networks with Device-level Accuracy*. IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications. 10-13 May 2021. DOI: 10.1109/INFOCOM42981.2021.9488783

**Zylevich M.O., Sorokin D.A. SYSTEMATIZATION OF ERROR SOURCES IN GEOLOCATION USING LORA TECHNOLOGY**

*This paper investigates the problem of object geolocation in Internet of Things (IoT) networks using LoRa technology, which belongs to the LPWAN class. The growing number of IoT devices and the expansion of their application areas drive the need for energy-efficient and scalable positioning systems. LoRa technology is characterized by long-range data transmission, low power consumption, and relatively low network deployment costs, making it a promising solution for geolocation systems in urban, industrial, and rural environments. However, the use of this technology is accompanied by several factors that affect the accuracy of determining object coordinates.*

*The study analyzes the primary localization methods in wireless networks, particularly RSSI, ToA, TDoA, and AoA. The feasibility of using the Received Signal Strength Indicator (RSSI) based localization method is substantiated, as it requires no additional hardware and can be implemented in most existing LoRaWAN networks. At the same time, this approach is highly sensitive to environmental influences and the presence of obstacles, leading to distance estimation errors between network nodes.*

*The paper examines a trilateration-based geolocation algorithm, where the target node's coordinates are determined by the distances to multiple base stations. The process of converting radio signal parameters into object coordinates is analyzed. It is shown that positioning accuracy largely depends on the signal propagation model parameters, which vary based on the type of environment.*

*As a result of the analysis, the main sources of geolocation errors in LoRa networks are systematized: environmental impact (shadowing and multipath signal propagation), dynamic factors, errors in mathematical models, physical features of radio wave fading, technical characteristics of the equipment, and the geometry of base station placement.*

**Keywords:** *Internet of Things, LoRa, LPWAN, geolocation, trilateration, RSSI, error sources, positioning accuracy, path loss.*

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026