

Жеребець О.М.Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ДАТЧИКІВ LORA, BLE I WIFI НА БАЗІ СИСТЕМИ РОЗУМНИХ РЕЧЕЙ

У статті представлено аналіз продуктивності датчиків LoRa, BLE і WiFi на базі системи розумних речей. Описано принципи реалізації системи інтернету речей. Наголошено, що в Інтернеті речей повідомлення від вузлів датчиків має бути миттєво доставлено між сусідніми вузлами мережі з підтримкою Інтернету речей, і щоб це сталося, вузли датчиків мають бути у відповідному діапазоні передачі, який зазвичай визначається рівнем RSSI. Описано механізми дії Bluetooth low Energy, LoRa та WiFi. Зазначається, що методологія дослідження продуктивності датчиків LoRa, BLE і WiFi на базі системи розумних речей складається з чотирьох етапів: проектування, побудова та оцінка системи взаємодії між стільниковими та бездротовими мережами типу IoT. Враховуючи, що система спрямована на інтеграцію нових технологій, спрямованих на IoT, пропонується розробити основну обробку з вбудованої системи на основі мікропроцесорної архітектури для взаємодії з користувачем через операційну систему. Запропонований прототип об'єднує стільникові технології, які забезпечують доступ до WEB-платформи та бездротових технологій WiFi, LoRa та BLE, починаючи з процесу взаємозв'язку та, нарешті, сумісності обох технологій і додатків. На основі проведених розрахунків, встановлено, що периметр, який може охопити технологія LoRa з чотирма сенсорними вузлами, становить приблизно 979 метрів, розрахованих за допомогою геореференційних координат. З двома приймачами BLE максимум 70 метрів і з двома сенсорними вузлами WiFi – 136 метрів. Технологія BLE забезпечує максимальний діапазон від шлюзу 22 метри, WiFi 44 метри та LoRa 313 метрів у відкритому міському середовищі, зберігання та перегляд щосекунди. Впроваджена технологія Wi-Fi забезпечує найвищу затримку, оскільки їй потрібно створити додатковий маршрут до сервера частинок (виробника). Цей додатковий маршрут вартий того, оскільки, хоча затримка збільшується, безпека для вузла також підвищується.

Ключові слова: Інтернет речей, сенсор, бездротова передача, повідомлення, дані, стійкість, відстань.

Постановка проблеми. Основна ідея Інтернету речей (Internet of Things – IoT) полягає у з'єднанні між собою кількох аналогових і цифрових електронних пристроїв однорідного та різнорідного характеру, щоб вони могли ефективно передавати інформацію. IoT вважається концепцією, що швидко розвивається [1] та стає все більш актуальним і означає взаємозв'язок мільярдів розумних пристроїв. Зростаюча кількість пристроїв IoT з різнорідними характеристиками вимагає від майбутніх мереж еволюціонувати, щоб забезпечити нову архітектуру, яка підтримує очікуване збільшення генерації даних, а також зберігання. Продуктивність архітектури може зосереджуватися на двох параметрах: затримці та мережевому трафіку [2].

Поняття сумісності було визначено як «здатність двох або більше систем або компонентів обмінюватися інформацією та використовувати інформацію, якою вони обмінювалися» [3]. Технології Інтернету речей за останнє десятиліття вдосконалилися як у апаратному, так і в програм-

ному забезпеченні для широкомасштабного розгортання. Активні елементи IoT є важливими для впровадження Smart City. Основою для функціонального ІКТ-розумного міста в режимі реального часу є потужний інтерфейс прикладної програми (API), який використовується для взаємодії між програмами, службами та пристроями. API допомагають створити функціональну сумісність між багатьма системами. Відображення та зберігання даних можна збирати з різних платформ, хмарних сервісів та програм для кінцевих користувачів [4].

В Інтернеті речей повідомлення від вузлів датчиків має бути миттєво доставлено між сусідніми вузлами мережі з підтримкою Інтернету речей, і щоб це сталося, вузли датчиків мають бути у відповідному діапазоні передачі, який зазвичай визначається рівнем RSSI (Індикатор рівня отриманого сигналу).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підхід наукової спільноти до визначення продуктивності сенсорних датчиків формувалася на протязі багатьох років.

Викладений у [5] матеріал представив необхідне моделювання для реалізації бездротової сенсорної мережі типу IoT з використанням технології 6LoWPAN. Вузол датчика WSN складається з модуля виявлення, алгоритмів обробки та елементів зв'язку. Бездротові сенсорні мережі WSN (аббревіатура англійською мовою Wireless Sensor Networks) представляють тенденцію до інтеграції в IoT з метою взаємодії з гетерогенними комунікаційними технологіями. Наразі доступ до Інтернету через WSN можна інтегрувати в мережу IoT двома способами: перший складається з незалежного WSN-з'єднання та доступу до Інтернету через один шлюз.

Концепція інтелектуальних датчиків необхідна для виявлення змінних у режимі реального часу для додатків IoT, наприклад, індексу забруднювачів, робота [6] запропонована в місті Бангкок. У цій роботі пропонується застосування датчиків LPWAN для моніторингу забруднення повітря через мережу NB-IoT.

Інтероперабельність у LoRa WAN та BLE мережі розглядається в роботі [7]. У цій роботі пропонується нова архітектура подвійної радіомережі для IoT, яка використовується в моніторингу дикої природи, досягаючи ширшого контролю над балансом між енергоспоживанням і діапазоном покриття. Результати оцінки показують, що запропонована подвійна мережа перевершує традиційні системи, які використовують лише один тип радіоприймача, тобто LoRa або BLE. У середньому енергоспоживання LPWAN (LoRa WAN) було знижено до 97%. Архітектура покращила термін служби мережі до 99% для різних інтенсивностей пакетного трафіку в мережі. Взаємодія між бездротовими технологіями необхідна для роботи додатків типу IoT. У [8] описано реалізацію бездротових технологій Bluetooth Low Energy і ZigBee (BLE), запропоновано шлюз, який розроблений для взаємозв'язку цих двох технологій, що орієнтований на додаток типу IoT, що дозволяє зменшити витрати, енергію та затримку, сумісність є важливою для широкомасштабного впровадження IoT.

Також варто відзначити такі роботи як: Б. Гурупрасад [9], який дослідив розумну навігаційну систему на основі LoRa та IoT. Іріанто Курніаван [10], який провів оцінку продуктивності LoRa в іригаційній системі ферми з Інтернетом речей. Також низка авторів Ібрагім Нур, Дзаблеті Філіп, Кім Хенсу та Чанг Дже-Янг [11] розробили повністю текстильну дводіапазонну антену для бездротового зв'язку BLE та LoRa. Вагіх Махмуд та Бірлі

Пітер [12] визначили шляхи покращеного підключення IoT LoRa-WAN за допомогою ширококугових всеспрямованих антен. Канакараджа П., Упадхьяй Сурабх, Котамраджу Сарат, Суніла Г. та Нілеш Рудра [13] виконали розробку та впровадження інтелектуального лічильника енергії з використанням програм LoRa-WAN та IoT. У свою чергу, Мунна Нур, Ахсан Момінул, Базе М., Хайдер Джульфіка та Родрігес Едуардо [14] запропонували використовувати інтелектуальний моніторинг і здійснювати керування приладами за допомогою системи IoT на основі LoRa. Будлал Хічам, Серріні Мохамед та Тахірі Ахмед [15] розкрили інтелектуальний підхід до моніторингу на основі WiFi Sensing для Smart Hospital.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання проведення аналізу продуктивності датчиків LoRa, BLE і WiFi на базі системи розумних речей залишається відкритим та потребує детального опрацювання відносно новітніх стандартів стільникового бездротового зв'язку.

Мета статті – проаналізувати продуктивність датчиків LoRa, BLE і WiFi на базі системи розумних речей.

Викладення основного матеріалу дослідження. Концепція IoT вимагає підключення пристроїв до Інтернету. Нова ера Інтернету речей, яка стосувалася унікально ідентифікованих об'єктів і представлених у «інтернет-подібній» структурі, відіграла важливу роль у нашому повсякденному житті з точки зору інтелекту та автоматизації як зручних способів. Встановлюючи зв'язок IoT як інтелектуальну систему для підключення об'єктів до мережі Інтернет, генерується великий обсяг даних, які потребують управління та контролю. З розвитком технологій система управління та автоматизації IoT представляє нові додатки, що застосовується в багатьох основних інфраструктурах, наприклад системи вимірювання датчиків, управління електроенергією, газом і водою відповідно до зручності окремих осіб і організацій.

Розгортання систем мобільного зв'язку третього та четвертого покоління 3G і 4G в країні є дуже високим, однак інтерес багатьох дослідницьких організацій зосереджений на майбутніх незалежних системах, таких як 5G і LTE.

Технічно 4G означає єдине інтегроване середовище на основі IP для всіх телекомунікаційних потреб, включаючи голос, відео, трансляцію медіа, Інтернет. Бездротовий зв'язок розвивається швидкими темпами, а технології LoRa, BLE і WiFi модернізуються враховуючи потреби користувачів.

З постійним розвитком додатків на протоколі IP використання мереж Wi-Fi стає все більш поширеним. Так звані точки доступу Wi-Fi (AP) стали ключовими вузлами для посилення безпеки даних і контролю доступу користувачів. Точка доступу Wi-Fi служить проміжним вузлом пересилання, спочатку вона може отримувати всі дані для взаємодії з користувачем, а з іншого боку точки доступу Wi-Fi підключаються до провайдера, дозволяючи користувачам отримувати доступ до мережі чи ні. Таким чином, вони є першим бар'єром для контролю доступу зловмисних користувачів до мережі.

Пристрої BLE (Bluetooth low Energy) були включені в стандарт Bluetooth із специфікації Bluetooth 4.0 і визначають дві різні топології мережі для передачі даних: плагін і ширококомовлення. Завдяки своїм характеристикам кожна топологія підходить для визначення варіантів використання з різними сильними та слабкими сторонами. Пізніші версії BLE (4.1, 4.2 і 5.0) підтримують ці топології та покращують їх, дозволяючи комбінувати різні ролі. Однак ці останні вдосконалені версії не реалізовані в більшості пристроїв IoT, тому, якщо необхідно працювати з додатками типу IoT, рекомендується використовувати пристрої типу BLE 4.0. Топології, доступні в стандарті BLE, це топологія підключення та топологія ширококомовлення [16].

Із зростаючим інтересом до Інтернету речей розробляються різні технології для задоволення вимог щодо інтеграції інтелектуальних пристроїв з метою низького енергоспоживання та покриття великої зони сигналу. Деякі технології LPWAN все ще знаходяться на стадії розробки, однак такі технології, як LoRa та SigFox, уже широко доступні на ринку. Що стосується низької вартості роботи, мережі на основі LoRa є перевагою перед мережами на основі SigFox, враховуючи необхідність передплати на SigFox для кожного пристрою, що призводить до поточних витрат для кожного підключеного пристрою. Проте мережі LoRa потребують конфігурації власної мережі, як запропоновано в [17], у рішенні для оцінки мережі Smart City. Починаючи з 1960-х років було проведено багато роботи, щоб зрозуміти поширення радіохвиль у лісі та міському середовищі. Можна спостерігати повний розрив зв'язку через зовнішні чинники.

Із широким використанням смартфонів трафік мобільних даних зростає в геометричній прогресії. Цей факт створює серйозну проблему з точки зору пропускну здатності для мобільних операторів, чия інфраструктура не здатна підтримувати весь додатковий трафік, створений

користувачами цього типу IP-пристроїв. Альтернативи, що з'являються, наразі розглядаються як частина еволюції мережі 5G (п'яте покоління), яка включає міграцію трафіку мобільних даних з інфраструктури оператора на розвантаження пристроїв користувачів, використовуючи переваги можливостей підключення поточних смартфонів для передачі даних через зв'язок між пристроями (D2D), зв'язок між машинами (M2M), а також інтеграція стільникового зв'язку, зв'язку Wi-Fi та часового зв'язку. Бездротовий доступ повинен включати служби для будь-якого об'єкта, який можна прив'язати до з'єднання. Цю концепцію часто називають «Інтернет речей (IoT)». Такі пристрої, як розумні лічильники комунальних послуг, цифрові вивіски, автомобільні інформаційно-розважальні системи, сенсорні мережі WSN (Wireless Sensor Network), мобільні мережі (LTE), міграція 5G і протоколи, повинні аналізувати сумісність технологій, орієнтованих на IoT.

Методологія дослідження продуктивності датчиків LoRa, BLE і Wi-Fi на базі системи розумних речей складається з чотирьох етапів: проектування, побудова та оцінка системи взаємодії між стільниковими та бездротовими мережами типу IoT.

Сучасні APP мають тенденцію модифікувати власні компоненти системи, спрямовані на пошук найкращої продуктивності на своїх платформах. Пропонований дизайн для впровадження складається з серверної частини, яка керує блоком обробки та блоком зберігання зібраних даних. API, який забезпечує взаємодію з іншими програмами та зовнішній вигляд браузера. Найважчим завданням для систем Інтернету речей є орієнтація на концепцію управління «реального часу» в поєднанні з необхідною реалізацією для сумісності багатьох технологій.

Для розробки системи трафік даних, що надходить від апаратного забезпечення, повинен бути зосереджений у режимі реального часу. Сервер був розроблений у node.js, для якого концепція websocket (веб-коннектор) повинна бути включена через бібліотеку javascript під назвою socket.io, яка вибрана для підключення веб-додатків у реальному часі та тому, що вона забезпечує двосторонній зв'язок між клієнтом, що працює в браузері, і хмарним сервером.

Враховуючи, що система спрямована на інтеграцію нових технологій, спрямованих на IoT, пропонується розробити основну обробку з вбудованої системи на основі мікропроцесорної архітектури для взаємодії з користувачем через операційну систему.

- Функціонально-конструктивні характеристики:
- оцінка та вибір архітектури та платформ;
 - включення сумісності з мобільними пристроями;
 - система повинна фіксувати та інтерпретувати необхідні дані;
 - реалізація функції хмарного сховища;
 - візуалізація змінних у графічному вигляді в реальному часі.

Запропонований прототип повинен об'єднати стільникові технології, які забезпечують доступ до WEB-платформи та бездротових технологій WiFi, LoRa та BLE, починаючи з процесу взаємозв'язку та, нарешті, сумісності обох технологій і додатків, запропонований дизайн показаний на рисунку 1.

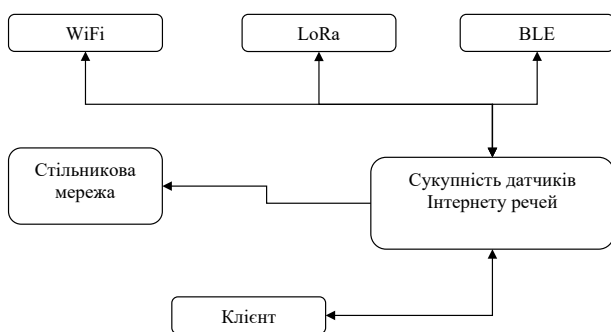


Рис. 1. Функціональний дизайн взаємозв'язку платформи

Взаємодія з сенсорними вузлами здійснюється через інтерфейси вбудованої системи. Для стандарту IEEE 802.15.1 зв'язок встановлюється з інтерфейсу bluetooth системи керування та сенсорного вузла, який реалізує bluetooth low energy 4.0 (BLE). Стандарт IEEE 802.15.4 може взаємодіяти з USB-порту raspberry на модуль, який реалізує технологію LoRa, і, нарешті, IEEE 802.11 інтерфейс від інтерфейсу WiFi вбудованої системи та модуля, що реалізує стандарт IEEE 802.11 b/g/n.

Першим кроком для впровадження є вибір апаратної системи керування, для цього оцінювалися мікроконтролери та вбудовані системи 8, 16 та 32 біт, на яких реалізовано веб-сервіси для взаємодії через методи post та get з HTML та CSS.

Raspberry PI3 обрано як основний апаратний модуль контролю та керування, який обмінюється даними з вибраними пристроями для кожного стандарту.

Підключення до мереж дальнього радіусу дії необхідне для досягнення взаємодії з пристроями та серверами даних для цілей моніторингу та аналізу. Еталонна інтегральна схема EC20 реалізує GSM, GPRS, UMTS, HSPA, LTE та GNSS. У реалізованій системі вона працює через USB через

інтерфейс ttyUSB3, керується консоллю, надає IP-адресу під час підключення до Інтернету. Піки струму для роботи стільникового модуля вимагають додаткового джерела 500 мА та потребують стільникової антени для покращення індикатора якості обслуговування CSQ, стабілізації прийому та доставки даних, вона включає світлодіод RGB.

Інтерфейс до стільникових мереж є частиною роботи шлюзу, система живлення є автономною, базується на сонячних батареях та акумуляторних батареях. Система керування має сенсорний екран для контролю та запуску системи. Модуль GNSS надає координати геопозиціонування, а за допомогою API Google Maps можна відобразити розташування системи.

Пристрої BLE (Bluetooth low Energy) включені до стандарту Bluetooth IEEE 802.15.1 і можуть мати дві топології підключення. У першій топології з'єднання два пристрої BLE можуть встановлювати з'єднання для постійного та періодичного обміну даними, у цій топології використовуються дві ролі: головна і підлегла. Можна підключити головний пристрій до 8 підлеглих пристроїв у топології зірка. Ця топологія дозволяє передавати дані в обох напрямках, при цьому підлегли пристрої забезпечують сповіщення та функції індикації для надсилання даних головному модулю. Друга топологія називається дифузійною, пристрій BLE може використовувати рекламні пакети для передачі даних на будь-який пристрій BLE у режимі перегляду, який знаходиться в зоні його покриття. У цій топології визначено дві ролі: відправник і одержувач. Через природу цієї топології обмін даними є односпрямованим. Під час розробки системи периферійний пристрій зв'язку Bluetooth, налаштовано як головний пристрій, встановлено зв'язок, двонаправлений трафік даних, керування та зчитування пристроїв, модуль, реалізований як підлеглий, – це LightBlue Been LBM 313. Для керування пристроєм використовується бібліотека node.js під назвою been.js.

Точка доступу WiFi служить проміжним вузлом переадресації. Спочатку встановлюються всі дані для взаємодії з користувачем. І з іншого боку, точки доступу WiFi підключаються до провайдера, дозволяючи користувачам отримувати доступ до мережі. У розробці інтерфейс бездротового з'єднання WiFi, вбудований у raspberry berry, діє як маршрутизатор трафіку даних і налаштовується за допомогою таблиць маршрутизації для встановлення з'єднання між пристроями, підключеними до локальної LAN та WAN. Вибраний пристрій WiFi пропонує інтегральну схему на основі архітектури Cypress WICED, комерційно

називається Photon, є частиною сімейства Particle Photon, поєднує мікроконтролер STM32 ARM Cortex M3 із чіпом Wi-Fi.

Поширення стандарту LoRa на частоті 433 МГц знаходиться в діапазоні надвисоких частот (UHF). Технологія LoRa була реалізована з використанням трансиверів SX1278, враховуючи, що вони працюють у вільному спектральному діапазоні, мають низьке енергоспоживання та низьку вартість, мають модем великого радіусу дії. LoRa, який забезпечує наддовгий зв'язок із розширеним спектром. Технологія заснована на використанні фірмової технології модуляції Semtech LoRa, яка може досягти чутливості понад -148 дБм за допомогою кристала та інших додаткових компонентів, таких як антени розповсюдження moxer для 433 МГц.

Зростання інтересу до використання Інтернету як платформи для обміну даними спонукало до досліджень щодо публікації та використання даних.

Веб-сайт може бути розміщений на сервері та надавати послуги, які запитують клієнти. Веб-сервери складаються з операційної системи, веб-сторінки та простору пам'яті, клієнти можуть отримати доступ до веб-сервера в Інтернеті, а кілька зовнішніх клієнтів можуть підключатися до внутрішнього сервера одночасно.

Під час валідації прототипу було помічено, що платформи хмарних обчислень, такі як Azure, дозволяють ефективно керувати архітектурою IoT і взаємодіяти з веб-сервісами, що представляє концепцію взаємодії в програмах. Мережі LoRa пропонують гнучкість у вільному спектрі, низьку вартість (5 доларів США) приблизно на кожен радіопристрій і низьке споживання енергії.

У рамках дослідження пропонується тест роботи у відкритому просторі в міській місцевості для аналізу поведінки індикатора RSSI, беручи до уваги міський сценарій з перешкодами для аналізу охоплення кожного рішення. Шлюз піднятий на 7,7 метра в приміщенні, відокремлений від відкритого простору 7-міліметровим склом на північ від збору даних, вузли датчиків знаходяться приблизно в одному метрі від землі. RSSI: WiFi: -53 дБм, LoRa: -78 дБм, BLE: -67 дБм.

Для цього тесту було взято 176 даних. Релевантною інформацією для аналізу є інформація, яка описує розташування кожного вузла датчика, а також індикатор потужності сигналу RSSI кожного з них у кожній точці.

Тест полягає у визначенні найдальших точок передачі інформації, у випадку технології BLE було знайдено дві точки максимальної відстані для передачі даних із зміщенням вузла датчика на

схід на 20 метрів, а пізніше на захід на 16 метрів. Дані RSSI для точки доставки останніх даних на схід: (RSSI: WiFi: -66 дБм, LoRa: -94 дБм, BLE: -91 дБм). Відстані потребують коригування через висоту шлюзу. Різниця на осі z відповідає 6,7 м. Це коригування можна зробити за допомогою рівняння визначення максимальної відстані BLE:

$$h^2 = a^2 + b^2$$

Для розрахунку максимальної відстані пристрою BLE a представляє висоту шлюзу, b представляє відстань, обчислену за координатами супутника, а h приблизну відстань від вузла датчика до шлюзу таким чином у рівнянні $h^2 = (6,7)^2 + (20)^2$ для східної відстані, результат рівняння $h=21,09\text{ м}$ і $h^2 = (6,7)^2 + (16)^2$ для західної відстані, результат рівняння $h=17,33\text{ м}$. Кути можна обчислити за наступними рівняннями:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{a}{h}\right)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{b}{h}\right)$$

Для конкретного випадку кути відповідають $\varphi = 18,52^\circ$ і $\beta = 71,50^\circ$ східного BLE $\varphi = 22,72^\circ$ і $\beta = 67,52^\circ$ західного BLE, розрахунок периметра для технології BLE виконується за рівнянням:

$$P = a + b + c$$

Для розрахунку площі покриття:

$$A = \frac{ah}{2}$$

Для визначення утворених кутів:

$$h = b \sin \varphi = c \sin \beta$$

Периметр і площа, розраховані для технології BLE, відповідають $P = 70\text{ м}$, $A = 99,87\text{ м}^2$, а розраховані кути зони покриття відповідають $\alpha = 141,3752^\circ$, $\beta = 21,5422^\circ$, $\varphi = 17,0826^\circ$. Вносячи відповідні коригування до довжин, розрахованих за висотою шлюзу згідно з формулами отримуємо, що периметр та площа дорівнюють $P = 72,42\text{ м}$, $A = 151,14\text{ м}^2$, а кути $\alpha = 124,2011^\circ$, $\beta = 30,8656^\circ$, $\varphi = 24,9333^\circ$. Для технології WiFi максимальна точка на схід становила 33 метри, на захід від 35 метрів, значення RSSI відповідають WiFi: -74 дБм і LoRa: -101 дБм і на захід, WiFi: -76 дБм і LoRa: -102 дБм, покриття 136 метрів.

З рівнянь виходить, що: $h^2 = (6,7)^2 + (33)^2$ для східної відстані значення: $h = 33,67$ метрів, а $h^2 = (6,7)^2 + (35)^2$ для західної відстані $h = 35,64$ метра. Периметр і площа відповідають $P = 135\text{ м}$, $A = 194,53\text{ м}^2$, розраховані кути відповідають $\alpha = 160,3149^\circ$, $\beta = 10,1349^\circ$, $\varphi = 9,5502^\circ$. Внесення поправок на периметр і площу: $P = 136,31\text{ м}$, $A = 297,10\text{ м}^2$ і кути $\alpha = 14,4087^\circ$, $\beta = 15,2717^\circ$, $\varphi = 150,3197^\circ$. Щоб включити різницю у висоті між вузлом датчика та

Відстані та кути, розраховані для кожної максимальної точки

Напрямок	RSSI дБм	Відстань (м)	Коригування (м)	Площа (м ²)	Периметр (м)	α	β
Північний захід	-112	188	188,12	629,11	379,14	2,02	87,95
Північний схід	-111	165	169,25	563,25	342,58	2,25	87,77
Південний схід	-112	190	192,24	647,29	394,25	1,99	87,99
Південний захід	-113	207	203,54	689,24	411,74	1,88	88,11

доріжкою, необхідно розділити форму на чотири трикутники, розподілені від початку координат на північ, південь, схід і захід.

Технологія LoRa представила чотири точки максимальної передачі від шлюзу: перша точка розташована на відстані 189 метрів на північний захід, друга точка – на 168 метрів на північний схід, третя – на 193 метри на південний схід і четверта – на 205 метрів на південний захід. Дані RSSI для останніх точок доставки даних технології LoRa такі: RSSI на північному заході -113 дБм, RSSI на північному сході -112 дБм, RSSI на південному сході -113 дБм і RSSI на південному заході -114 дБм.

Діапазон охоплення, отриманий для технології LoRa, становить 979 метрів і являє собою прямокутник із неоднорідними сторонами, визначеними та вимірними супутниковими координатами.

Висновки. У роботі проаналізовано продуктивність датчиків LoRa, BLE і WiFi на базі системи розумних речей. Периметр, який може охопити технологія LoRa з чотирма сенсорними вузлами, становить приблизно 979 метрів, розрахованих за

допомогою геореференційних координат. З двома приймачами BLE максимум 70 метрів і з двома сенсорними вузлами WiFi – 136 метрів. Технологія BLE забезпечує максимальний діапазон від шлюзу 22 метри, WiFi 44 метри та LoRa 313 метрів у відкритому міському середовищі, зберігання та перегляд щосекунди. Хмарні обчислювальні рішення є найбільш підходящими, вибір архітектури полягає у ефективності, масштабованості та співвідношенні витрат і вигод. Системи типу IoT – це рішення, які розвиваються відповідно до потреб кінцевого користувача. Бізнес-моделі компаній, які розробляють і впроваджують системи IoT, разом із компаніями, що займаються програмним забезпеченням, орієнтовані на надання послуг візуалізації, зберігання та аналізу даних у хмарі. Впроваджена технологія Wi-Fi забезпечує найвищу затримку, оскільки їй потрібно створити додатковий маршрут до сервера частинки (виробника). Цей додатковий маршрут вартий того, оскільки, хоча затримка збільшується, безпека для вузла також підвищується.

Список літератури:

1. Popovska H., Dimovski T., Hristoski I. A Model for Integration of Internet of Things Systems in a Smart City. *11th International Conference on Applied Information and Internet Technologies – AIIT 2021* (October 15th, 2021). Zrenjanin, Serbia. 2021. URL: https://eprints.uklo.edu.mk/id/eprint/7497/1/AIIT_2021_Proceedings_pp_199-202.pdf
2. Development Strategy of Smart Internet of Things System / B. Li et al. *Chinese Journal of Engineering Science*. 2022. Vol. 24, no. 4. P. 1. URL: <https://doi.org/10.15302/j-sscae-2022.04.001> (date of access: 01.08.2023).
3. Guo B., Kou H., Zhou Y. Design of a Smart Art Classroom System Based on Internet of Things. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. Vol. 2022. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/9257827> (date of access: 01.08.2023).
4. Kumar A., Akhtar M. A. K., Pandey A. Design of Internet of Things (IoT) System Based Smart City Model on Raspberry Pi. *IETE Journal of Research*. 2022. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1080/03772063.2022.2088629> (date of access: 01.08.2023).
5. Verma A., Ranga V. Security of RPL Based 6LoWPAN Networks in the Internet of Things: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol. 20, no. 11. P. 5666–5690. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2973677> (date of access: 01.08.2023).
6. A Study of Air Pollution Smart Sensors LPWAN via NB-IoT for Thailand Smart Cities 4.0 / S. Duangsuwan et al. *2018 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, Chiang Mai, Thailand, 31 January – 3 February 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/kst.2018.8426195> (date of access: 01.08.2023).

7. Development of real-time monitoring BLE-LoRa positioning system based on RSSI for non-line-of-sight condition / A. S. Ja'afar et al. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2023. Vol. 30, no. 2. P. 972. URL: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i2.pp972-981> (date of access: 01.08.2023).
8. Ali A. I., Zorlu Partal S. Development and performance analysis of a ZigBee and LoRa-based smart building sensor network. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.933743> (date of access: 01.08.2023).
9. Guruprasad B. LoRa and IoT Based Smart Irrigation System. *Interantional journal of scientific research in engineering and management*. 2023. Vol. 07, no. 03. URL: <https://doi.org/10.55041/ijsrem18124> (date of access: 01.08.2023).
10. Irianto K. D. Performance Evaluation of LoRa in Farm Irrigation System with Internet of Things. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*. 2022. URL: <https://doi.org/10.22219/kinetik.v7i4.1551> (date of access: 01.08.2023).
11. An All-Textile Dual-Band Antenna for BLE and LoRa Wireless Communications / N. F. Ibrahim et al. *Electronics*. 2021. Vol. 10, no. 23. P. 2967. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics10232967> (date of access: 01.08.2023).
12. Wagih M., Birley P. Towards Improved IoT LoRa-WAN Connectivity using Broadband Omnidirectional Antennas. *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Madrid, Spain, 27 March – 1 April 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.23919/eucap53622.2022.9768906> (date of access: 01.08.2023).
13. Design and Implementation of Smart Energy Meter using LoRa-WAN and IoT Applications / P. Kanakaraja et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1804, no. 1. P. 012207. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1804/1/012207> (date of access: 01.08.2023).
14. Design and Implementation of Smart Energy Meter using LoRa-WAN and IoT Applications / P. Kanakaraja et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1804, no. 1. P. 012207. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1804/1/012207> (date of access: 01.08.2023).
15. Smart Monitoring and Controlling of Appliances Using LoRa Based IoT System / Nur-A-Alam et al. *Designs*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 17. URL: <https://doi.org/10.3390/designs5010017> (date of access: 01.08.2023).
16. Smart Monitoring and Controlling of Appliances Using LoRa Based IoT System / Nur-A-Alam et al. *Designs*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 17. URL: <https://doi.org/10.3390/designs5010017> (date of access: 01.08.2023).
17. Boudlal H., Serrhini M., Tahiri A. An Intelligent Monitoring Approach Based on WiFi Sensing for Smart Hospital. *Artificial Intelligence and Smart Environment*. Cham, 2023. P. 212–223. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-26254-8_30 (date of access: 01.08.2023).
18. Implementation of Agent Based Smart Parking System using IoT / Prof. Kavita Patil et al. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. 2023. P. 810–816. URL: <https://doi.org/10.48175/ijarsct-8923> (date of access: 01.08.2023).
19. Mackey A., Spachos P., Gregori S. Energy Efficient Bike-Share Tracking System with BLE Beacons and LoRa Technology. *2019 IEEE Sustainability through ICT Summit (StICT)*, Montréal, QC, Canada, 18–19 June 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/stict.2019.8789372> (date of access: 01.08.2023).

Zherebets O.M. PERFORMANCE ANALYSIS OF LORA, BLE AND WIFI SENSORS BASED ON THE SYSTEM OF SMART THINGS

The article presents an analysis of the performance of LoRa, BLE and WiFi sensors based on the system of smart things. The principles of implementation of the Internet of Things system are described. It is emphasized that in IoT, the message from the sensor nodes must be instantly delivered between the neighboring IoT-enabled network nodes, and for this to happen, the sensor nodes must be in the appropriate transmission range, usually defined by the RSSI level. The mechanisms of action of Bluetooth low Energy, LoRa and WiFi are described. It is noted that the methodology for researching the performance of LoRa, BLE and WiFi sensors based on the system of smart things consists of four stages: design, construction and evaluation of the system of interaction between cellular and wireless networks of the IoT type. Considering that the system aims to integrate new technologies aimed at IoT, it is proposed to develop the core processing from an embedded system based on a microprocessor architecture to interact with the user through the operating system. The proposed prototype integrates cellular technologies that provide access to the WEB platform and WiFi, LoRa and BLE wireless technologies, starting with the interconnection process and finally the compatibility of both technologies and applications. Based on the calculations, it was found that the perimeter that can be covered by LoRa technology with four sensor nodes is approximately 979 meters, calculated using georeferenced coordinates. With two BLE receivers a maximum of 70 meters and with two WiFi sensor nodes – 136 meters. BLE technology provides maximum gateway range of 22 meters, WiFi 44 meters and LoRa 313 meters in open urban environment, storage and viewing every second. Embedded Wi-Fi technology has the highest latency because it needs to create an additional route to the particle server (producer). This extra route is worth it because although the latency is increased, the security for the node is also increased.

Key words: Internet of things, sensor, wireless transmission, message, data, sustainability, distance.