

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-22>

УДК 004.588

Озерчук Ігор Михайлович, провідний науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0001-7011-0772>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна

BLUETOOTH LOW ENERGY, ЯК ОСНОВА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПРИ НАДМАЛОМУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННІ

Озерчук І.М. Bluetooth Low Energy, як основа передачі даних при надмалому енергоспоживанні. У статті розкрито Bluetooth Low Energy, як основу передачі даних при надмалому енергоспоживанні. Детально описано напрямки застосування технології. Наголошено, що у BLE зв'язок між пристроями може відбуватися відповідно до двох основних шаблонів взаємодії каналного рівня: два пристрої можуть діяти або як ширококомунікатор та сканер, коли ширококомунікатор односпрямовано передає дані, які можуть бути отримані сканером; або як ведучий і ведений, при цьому між пристроями встановлено з'єднання, і вони можуть обмінюватися даними в двох напрямках. Підкреслено, що специфікація Bluetooth Low Energy дозволяє гнучко налаштувати режими збору довільних даних з урахуванням необхідної швидкості їх збору та бажаного рівня енергозбереження. Графічно наведено рівні реалізації Bluetooth Low Energy, запропоновано переваги технології та її недоліки. При цьому наголошено, що споживання електроенергії може змінюватись у широких межах. Воно залежить від реалізації пристрою, різних параметрів протоколу та чіпсету. Типове споживання BLE-трансівера під час передачі даних зазвичай не перевищує 15 мА. Зазначається, що Bluetooth Low Energy призначений для передачі даних каналом з низькою пропускну здатністю, а використання Bluetooth Low Energy для додатків з великим обсягом даних, що часто передаються, істотно збільшує споживання електроенергії і зводить нанівель основну перевагу BLE. Таким чином, підкреслено, що мінімізація використання радіозв'язку, наскільки це можливо, дає змогу досягти мінімального рівня споживання енергії. Описано контролер BlueNRG-LP, який рекомендується використовувати для технології Bluetooth Low Energy, як наслідок використання – висока продуктивність із надзвичайно низьким споживанням. Наголошується на апаратних функціях BlueNRG-LP, які забезпечують розширену апаратну підтримку безпеки.

Ключові слова: Bluetooth Low Energy, передача даних, мережа, енергоспоживання, надійність, технологія, інновація, мікросхема, контролер.

Ozerchuk I. Bluetooth Low Energy, as the basis of data transmission with ultra-low energy consumption. The article describes Bluetooth Low Energy as the basis for data transmission with ultra-low energy consumption. The areas of application of the technology are described in detail. It is emphasized that in BLE, communication between devices can take place according to two main patterns of channel-level interaction: two devices can act either as a broadcaster and a scanner, when the broadcaster unidirectionally transmits data that can be received by the scanner; or as host and client, while a connection is established between the devices, and they can exchange data in two directions. It is emphasized that the Bluetooth Low Energy specification allows you to flexibly configure arbitrary data collection modes, taking into account the required speed of their collection and the desired level of energy saving. The levels of implementation of Bluetooth Low Energy are graphically presented, the advantages of the technology and its disadvantages are suggested. At the same time, it was emphasized that electricity consumption can vary widely. It depends on the device implementation, various protocol parameters and chipset. The typical consumption of a BLE transceiver during data transmission usually does not exceed 15 mA. It is noted that Bluetooth Low Energy is designed to transmit data over a low-bandwidth channel, and using Bluetooth Low Energy for applications with a large volume of frequently transmitted data significantly increases power consumption and negates the main advantage of BLE. Thus, it is emphasized that minimizing the use of radio communication as much as possible allows to achieve the minimum level of energy consumption. The BlueNRG-LP controller is described, which is recommended for Bluetooth Low Energy technology, as a result of its use - high performance with extremely low consumption. The hardware features of BlueNRG-LP are emphasized, which provide advanced hardware support for security.

Key words: Bluetooth Low Energy, data transfer, network, power consumption, reliability, technology, innovation, chip, controller.

Вступ та постановка проблеми. В умовах сьогодення, мережеві технології стрімко розвиваються і застосовуються вже не лише у комп'ютерах, ноутбуках, планшетах та смартфонах. Тепер до мережі підключено безліч різних розумних пристроїв, таких як пральні машини, робот-пилососи, дверні замки, іграшки та багато іншого. Асортимент існуючих та потенційних пристроїв для IoT величезний. По суті, до пристроїв IoT можна віднести всі пристрої, оснащені мікросхемами для збирання та передачі даних через мережу. Зручність використання таких пристроїв полягає у можливості простого керування ними зі смартфона. Однак IoT активно використовується не лише окремими користувачами: компанії та навіть цілі міста дедалі більше впроваджують інтелектуальні технології для економії часу та грошей. IoT створює можливості для прямої інтеграції фізичного світу в комп'ютерні системи, що веде до підвищення ефективності, економічних вигод та скорочення людських зусиль у будь-якій галузі.

Технологія передачі – найважливіший елемент будь-якої системи IoT. Найбільш важливими вирішальними факторами для вибору бездротових протоколів є пропускну спроможність, дальність передачі, безпека, сумісність та енергоспоживання. Класичний Bluetooth зайняв свою нішу в

аудіопристроях з бездротовим підключенням до ноутбуків і мобільних телефонів, тоді як Bluetooth Low Energy (BLE) перетворився на універсальний інструмент зв'язку для батарейних датчиків, пультів керування та брелоків безконтактного доступу завдяки економічності та надмалому енергоспоживанню.

Однак, варто наголосити на стрімкому розвитку мікротехніки та постійному вдосконаленні контролерів, що є основою будь-якої технології передачі. Так, розширення лінійки сприяє не тільки максимізації швидкості передачі даних, підвищенню пропускної здатності, зниженню енергоспоживання, але й формуванню певного переліку вимог, технічних параметрів та особливостей впровадження. Саме це вимагає детального дослідження та актуалізації кожного окремого пристрою до новітніх технологічних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковим підґрунтям за темою дослідження є низка робіт науковців праця яких направлена на формування, структуризацію та вдосконалення технології передачі даних за сферами застосування.

Так, ґрунтовною є праця А.А. Пакули та Є.А. Паламарчука [1] які розглянули та проаналізували особливості використання технології Bluetooth Low Energy(BLE) та методи її використання для взаємодії з розумними пристроями в мобільній розробці на платформі Android.

О. І. Сидоренко [2] розкрив інноваційні технології розширення спектру дії Bluetooth. Здійснив огляд специфіки формування спектру охопту сигналу. Структуровав механізм дії мережі Bluetooth, яка дозволяє передавати інформацію між своїми вузлами через фізичний рівень, при цьому вузли мережі ретранслюють повідомлення і динамічно працюють для транспортування інформації по мережі.

В роботі [3] проведено дослідження задач побудови бездротових сенсорних мереж, основним етапом їх вирішення є розробка моделей опису сенсорної мережі та відповідних методів, технологій забезпечення необхідних параметрів якості функціонування сенсорної мережі.

І.Б. Галелюка [4] розглянув особливості моделювання та оцінювання параметрів бездротової сенсорної мережі, що її призначено для моніторингу медично-фізіологічних параметрів стану людини.

Математичну модель багатокритеріальної оптимізації якості обслуговування сенсорних мереж з використанням принципу справедливості запропонували Н. М. Довженко, В. В. Собчук та М. О. Коваль [5].

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Sauter Martin [6], Freund Michael, Dorsch Rene, Harth Andreas [7], Natgunanathan Iynkaran, Fernando Niroshinie, Loke Seng, Weerasuriya Charitha [8], Sun Dazhi, Tian Yangguang [9], Ližbetin Ján, Pečman Jan [10], Liu Chendong, Zhang Yilin, Zhou Huanyu [11], Ndebugre Moses, Yildirim Tülay [12], Pang Bozheng, Claeys Tim, Vankeirsbilck Jens, T'Jonck Kristof, Hallez Hans, Boydens Jeroen [13], Antonioli Daniele, Tippenhauer Nils Ole, Rasmussen Kasper [14], Leonardi Luca, Bello Lucia, Patti Gaetano [15], Cäsar Matthias, Pawelke Tobias, Steffan Jan, Terhorst Gabriel [16], Karoliny Julian, Blazek Thomas, Springer Andreas, Bernhard H.-P. [17], Pyt Patryk, Jankowski-Mihułowicz Piotr, Węglarski Mariusz [18] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання принципів Bluetooth Low Energy, як основи передачі даних при надмалому енергоспоживанні залишається відкритим та потребує детального опрацювання відносно новітніх стандартів технічного регулювання.

Постановка завдання. Розкрити Bluetooth Low Energy, як основу передачі даних при надмалому енергоспоживанні.

Викладення основного матеріалу дослідження. В умовах сьогодення, комунікація відіграє життєво важливу роль у багатьох сучасних програмах. Порівняно з традиційними дротовими механізмами зв'язку технології бездротового зв'язку потрібні через переваги, які вони пропонують, включаючи ефективність, доступність, гнучкість, зменшення проблем встановлення та економію коштів.

Bluetooth Low Energy – це бездротова персональна мережева технологія, розроблена Bluetooth Special Interest Group. Слідом за Bluetooth 4.x у 2017 році була випущена відповідна специфікація Mesh Model для Bluetooth 5. Вона фактично збільшила радіус дії вчетверо за рахунок збільшення потужності передачі та закодованого фізичного рівня; подвоїла швидкість за рахунок зниження часу передачі символу порівняно з Bluetooth 4.x; і забезпечила восьмикратне збільшення потужності трансляції даних за рахунок збільшення тривалості передачі рекламних даних Bluetooth Low Energy. Порівняно з класичним Bluetooth, Bluetooth Low Energy мав на меті значно зменшити споживання електроенергії та вартість; зберігаючи аналогічний діапазон зв'язку.

Інтегральні схеми Bluetooth з низьким енергоспоживанням використовують радіо передачу, тому оновлення специфікації можна внести через оновлення мікропрограми. Сучасні мобільні пристрої зазвичай випускаються з підтримкою апаратного та програмного забезпечення як класичного Bluetooth, так і Bluetooth Low Energy.

Bluetooth Low Energy не сумісний із класичним протоколом Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR). Специфікація Bluetooth 4.0 дозволяє пристроям використовувати одну або обидві системи LE та BR/EDR. Очікується, що виробники впровадять відповідні специфікації для своїх пристроїв, щоб забезпечити сумісність.

Пристрій з протоколом Bluetooth Low Energy може використовувати кілька профілів. Більшість профілів додатків базується на загальному профілі атрибутів, який визначає специфікації для надсилання та отримання коротких фрагментів даних, відомих як атрибути, через зв'язок із низьким енергоспоживанням. Термінологія базується на наступному:

Клієнт: пристрій, який ініціює запити та приймає відповіді, наприклад смартфон.

Сервер: пристрій, який отримує запити та повертає відповіді, наприклад датчик температури.

Характеристика: значення даних, що передаються між клієнтом і сервером, наприклад поточне значення температури.

Сервіс / послуга: набір пов'язаних характеристик, які працюють разом для виконання певної функції, наприклад термометр.

Дескриптор: необов'язкові параметри, пов'язані з характеристиками для надання додаткової інформації, наприклад дескриптор одиниці вимірювання температури.

Послуги, характеристики та дескриптори разом називаються атрибутами та ідентифікуються універсальними унікальними ідентифікаторами (УУІ). Будь-який розробник може вибрати випадковий УУІ для приватного використання. Для ефективності ці ідентифікатори представлені як 16-бітні або 32-бітні значення в протоколі замість 128 біт, необхідних для повного УУІ. Повний список зберігається в документі Bluetooth Assigned Numbers.

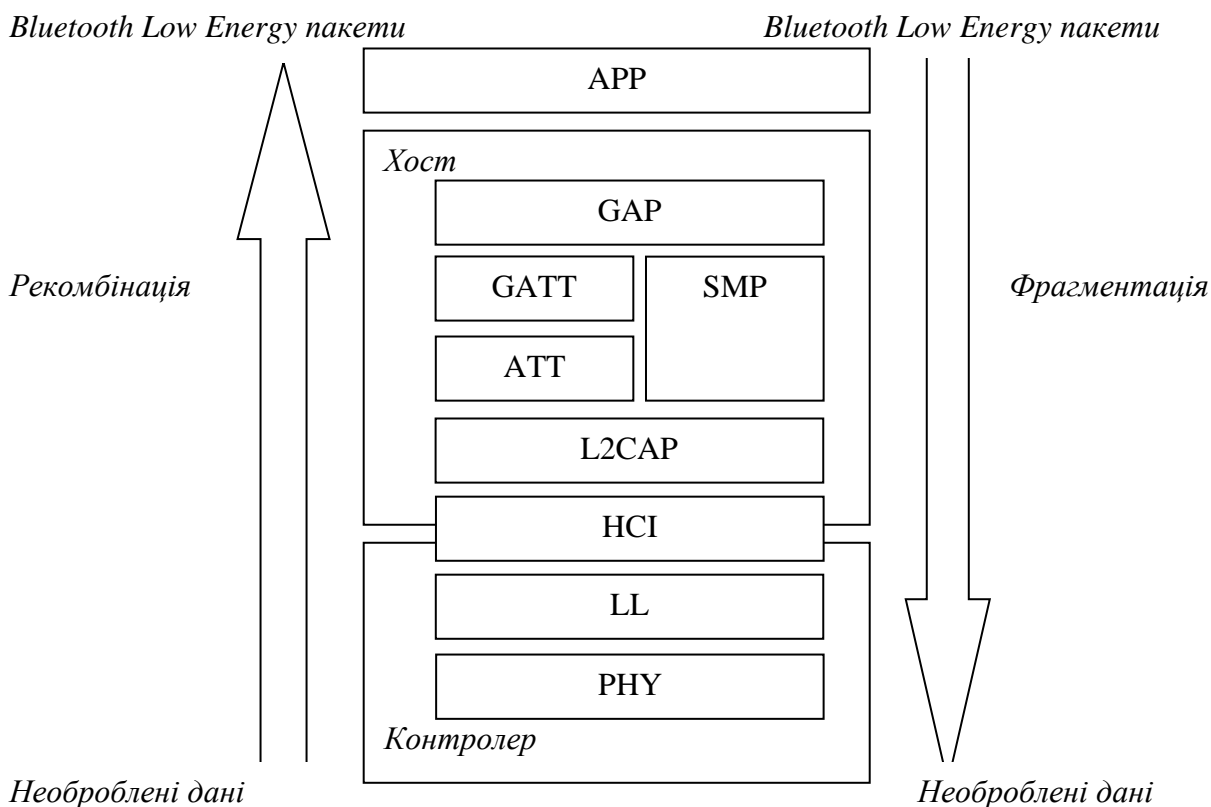


Рис. 1 – Рівні реалізації Bluetooth Low Energy [19]

Generic Attribute Profile надає ряд команд для клієнта, щоб знайти інформацію про первинні/вторинні служби сервера, характеристики про служби; і дескриптори для різних

характеристик. Він також пропонує сповіщення та індикацію для клієнта; для конкретної характеристики. Це дозволяє уникнути необхідності опитування сервера, що вимагало б постійної роботи радіосхем серверів.

Сумісні мобільні операційні системи включають:

1. iOS 5 і новіші версії
2. Android 4.3 і новіші версії
3. Windows 8 і новіші версії
4. Blackberry 10
5. macOS 10.10
6. Linux 3.4 і новіші версії через BlueZ 5.0
7. Windows Phone 8.1
8. Unison OS 5.2

На відміну від класичного Bluetooth, який є схемою FHSS, Bluetooth Low Energy класифікується як система, що використовує методи цифрової модуляції або прямої послідовності з розширеним спектром. Bluetooth Low Energy використовує ті самі радіочастоти (діапазон 2,400–2,4835 ГГц ISM), що й класичний Bluetooth, що дозволяє дворежимним пристроям спільно використовувати одну радіоантену. Однак він має 40 каналів 2 МГц замість 79 каналів 1 МГц. Bluetooth Low Energy використовує модуляцію зсуву частоти за Гауссом, подібну до класичної схеми базової швидкості Bluetooth. Швидкість передачі даних становить 1 Мбіт/с у Bluetooth 4.x і 2 Мбіт/с у Bluetooth 5. Максимальна потужність передачі становить 10 мВт у Bluetooth 4.x і 100 мВт у Bluetooth 5. Bluetooth Low Energy використовує стрибкоподібну зміну частоти, як класичний Bluetooth для усунення проблем із вузькосмуговими перешкодами.

Пристрої Bluetooth Low Energy ідентифікуються за допомогою процедури, яка базується на трансляції рекламних пакетів за допомогою трьох окремих каналів, щоб зменшити перешкоди. Рекламний пристрій надсилає пакет принаймні по одному з цих трьох каналів з періодом повторення, який називається рекламним інтервалом. Щоб зменшити ймовірність кількох послідовних зіткнень, до кожного рекламного інтервалу додається випадкова затримка до 10 мілісекунд. Сканер прослуховує канал протягом періоду, що називається вікном сканування, яке періодично повторюється з кожним інтервалом сканування.

Bluetooth Low Energy знайшов своє застосування в галузі охорони здоров'я, фітнесу, радіомаяків, сенсорних мереж, безпеки та індустрії домашніх розваг.

Bluetooth Low Energy призначений для роботи пристроїв з низьким енергоспоживанням. Пристрої з периферійними та центральними ролями мають різні вимоги до живлення. Енергоефективність периферійних пристроїв Bluetooth з низьким енергоспоживанням дозволяє їм працювати протягом 1-2 років із батареєю типу «таблетка» ємністю 1000 мАг. Навпаки, безперервне сканування може споживати 1000 мАг за кілька годин. З новими наборами мікросхем і прогресом у програмному забезпеченні телефони Android і iOS тепер мають незначне енергоспоживання в реальних сценаріях використання Bluetooth Low Energy.

1. Профілі сітки: у сітчастій мережі Bluetooth кожен пристрій може передавати інформацію іншим пристроям Bluetooth з низьким енергоспоживанням, створюючи ефект сітки. Профіль Bluetooth mesh базується на профілі загального доступу.

2. Профілі охорони здоров'я: існують спеціальні профілі для охорони здоров'я, включаючи профіль вимірювання артеріального тиску, профіль вимірювання температури, профіль монітора глюкози в крові тощо.

3. Профілі спорту та фітнесу: швидкість їзди на велосипеді, профіль пульсу, профіль розташування та навігації тощо.

4. Профілі підключення до Інтернету: підтримка Інтернет-протоколу.

5. Загальний профіль датчиків: зондування навколишнього середовища, служба даних користувача, тощо.

6. HID Профіль підключення: профілі для бездротових мишей, клавіатур та інших пристроїв із підтримкою Bluetooth Low Energy.

7. Профілі визначення наближення: геолокація, виявлення датчика наближення тощо.

8. Сповіщення та часові профілі: стан телефонного сповіщення, сповіщення про вхідний дзвінок, інформація про часовий пояс тощо.

9. Профіль служби батареї: сповіщення про стан батареї та рівень заряду батареї тощо.

Переваги Bluetooth Low Energy

1. Надзвичайно низькі вимоги до пікової, середньої потужності та режиму очікування. Енергоефективність функції Bluetooth Low Energy робить її ідеальною для пристроїв, які тривалий час працюють від батарейок або пристроїв, що збирають енергію.

2. Невеликий розмір і низька вартість: стандартизована архітектура розробки додатків полегшує розробку та розгортання. Таким чином, інноваційні бездротові пристрої можна швидко розробити та розгорнути за допомогою високошвидкісної технології Bluetooth. Bluetooth Developer Studio – це найвідоміший інструмент, який розробники мобільних пристроїв і програмного забезпечення можуть використовувати для розробки та налагодження своїх додатків Bluetooth Low Energy. Він є безкоштовним для використання, дозволяє розробляти послуги профілю Generic Attribute і характеристики, забезпечує автоматичне створення вихідного коду за допомогою безкоштовних плагінів постачальника; і дозволяє тестувати фізичний пристрій за допомогою ключа Bluetooth. Програма емулятора клієнта дуже корисна для тестування нових змін до або під час розгортання. Це дозволяє сканувати поблизу рекламні пристрої Bluetooth Low Energy, підключитися до одного з цих пристроїв, виявляти їхні характеристики, а також читати/записувати значення характеристик.

3. Розширення довжини даних: розмір пакета може обробляти більшу кількість корисного навантаження, до 251 Б замість 27 Б.

4. Сумісність із великою базою встановлених платформ: вбудована підтримка технології Bluetooth Low Energy у кожній основній операційній системі дозволяє здійснити підключення для мільярдів пристроїв, від побутової техніки та систем безпеки до пристроїв Інтернету речей.

5. Безпека: забезпечує безпеку державного рівня завдяки 128-бітному шифруванню даних AES.

6. Широкий діапазон: забезпечує покриття дуже великих територій.

Недоліки Bluetooth Low Energy

1. Функція швидкості Bluetooth 5 «2x» вимагає оновлення апаратного забезпечення, тому старіші пристрої/чіпи/модулі не підтримують її.

2. Щоб досягти вищої пропускної здатності, пристрої Bluetooth з низьким енергоспоживанням, які спілкуються один з одним, повинні підтримувати новий LE 2M PHY.

3. Теоретична пропускна здатність 2 Мбіт/с не може бути досягнута через обмеження на кількість пакетів на інтервал з'єднання, затримку між кадрами, передачу порожніх пакетів і витрати пакетів.

4. Неможливо використовувати Bluetooth BR/EDR для зв'язку з пристроєм Bluetooth Low Energy або навпаки.

На сьогодні, для технології BLE рекомендуються контролери серій BlueNRG-2, BlueNRG-LP та STM32WB55.

BlueNRG-LP – це програмована Bluetooth-система-на-кристалі із наднизьким енергоспоживанням. В її основі – нові радіочастотні IP-ядра STMicroelectronics діапазону 2.4ГГц, що поєднують високу продуктивність із надзвичайно низьким споживанням (як наслідок – тривалим терміном автономної роботи).

BlueNRG-LP сумісний зі специфікацією BLE SIG версії 5.2, може будувати мережі типу «точка-точка», «зірка» та пористі мережі Bluetooth mesh, що дозволяє створювати надійні великомасштабні мережі пристроїв. BlueNRG-LP побудований на ядрі Cortex-M0+, яке може працювати з частотою до 64 МГц, також містить співпроцесор BlueNRG core (на базі DMA) для виконання критично важливих операцій синхронізації протоколу BLE.

Основні функції специфікації BLE 5.2, що підтримуються:

- швидкість передачі даних 2 Мбіт/с;
- велика дальність (режим LongRange, кодований PHY);
- розширення adv-пакетів;
- покращений алгоритм вибору каналу;
- кешування GATT;
- апаратна підтримка одночасного підключення «провідний/відомий» та кілька ролей одночасно;
- підтримка розширеної довжини пакетів.

Крім того, BlueNRG-LP забезпечує розширену апаратну підтримку безпеки за рахунок спеціальних апаратних функцій:

- генератор справжніх випадкових чисел (RNG);

- шифрування AES, максимальний 128-розрядний співпроцесор безпеки;
- прискорювач відкритих ключів (РКА);
- блок обчислення CRC;
- 64-розрядний унікальний ідентифікатор;
- захист від читання та запису флеш-пам'яті.

Висновки. У роботі розкрито Bluetooth Low Energy, як основу передачі даних при надмалому енергоспоживанні. Bluetooth Low Energy має можливість замінити пропріетарні протоколи і стає де-факто стандартом бездротового зв'язку для малопотужних та недорогих IoT-пристроїв. Приймачі BlueNRG-LP стандарту Bluetooth Low Energy підходять для використання в найширшому спектрі пристроїв персонального призначення, в системах збору та обліку даних, знаходять широке застосування в промисловій та домашній автоматичі.

Перспективами подальшого дослідження є розробка датчику температури на базі Bluetooth Low Energy із застосуванням BlueNRG-LP.

Список бібліографічного опису

1. Пакула А. А. Використання технології Bluetooth Low Energy для розумних пристроїв в мобільній розробці [Текст] / А. А. Пакула, Є. А. Паламарчук // Матеріали XV міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація», Одеса, 20-21 жовтня 2022 р. – 2022. С. 166-168.
2. Сидоренко О. І. Інноваційні технології розширення спектру дії Bluetooth / Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 2022. №73. С. 73-79.
3. Дослідження задач побудови бездротових сенсорних мереж / В. М. Джулій, А. В. Краснік, Є. С. Ленков, М. М. Охрамович, Л. О. Ряба // Хмельницький національний університет, 2022. С. 51-65. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2022/75-06>
4. Галелюка, І.Б. Моделювання та оцінювання параметрів бездротової сенсорної мережі медичного призначення / І.Б. Галелюка // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2018. № 17. С.47 – 52.
5. Математична модель багатокритеріальної оптимізації якості обслуговування сенсорних мереж з використанням принципу справедливості запропонували / Н. М. Довженко, В. В. Собчук, М. О. Коваль // Телекомунікаційні та інформаційні технології, 2019. № 3. С. 90-97. DOI: 10.31673/2412-4338.2019.039097
6. Sauter Martin. (2021). Bluetooth and Bluetooth Low Energy. DOI: 10.1002/9781119714712.ch8.
7. Freund Michael, Dorsch Rene, Harth Andreas. (2022). Applying the Web of Things Abstraction to Bluetooth Low Energy Communication. DOI: 10.48550/arXiv.2211.12934.
8. Natgunanathan Iynkaran, Fernando Niroshinie, Loke Seng, Weerasuriya Charitha. (2023). Bluetooth Low Energy Mesh: Applications, Considerations and Current State-of-the-Art. Sensors. 23. 1826. DOI: 10.3390/s23041826.
9. Sun Dazhi, Tian Yangguang. (2022). Address Privacy of Bluetooth Low Energy. Mathematics. 10. 4346. DOI: 10.3390/math10224346.
10. Ližbetin Ján, Pečman Jan. (2023). Possibilities of Using Bluetooth Low Energy Beacon Technology to Locate Objects Internally: A Case Study. Technologies. 11. 57. DOI: 10.3390/technologies11020057.
11. Liu Chendong, Zhang Yilin, Zhou Huanyu. (2021). A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. Journal of Physics: Conference Series. 2093. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2093/1/012021.
12. Ndebugre Moses, Yildirim Tülay. (2022). Bluetooth Low Energy-based Indoor Localization using Artificial Intelligence. The European Journal of Research and Development. 2. 1-15. DOI: 10.56038/ejrnd.v2i3.102.
13. Pang Bozheng, Claeys Tim, Vankeirsbilck Jens, TJonck Kristof, Hallez Hans, Boydens Jeroen. (2022). A Novel Model to Quantify the Impact of Transmission Parameters on the Coexistence Between Bluetooth Low Energy Pairs. IEEE Internet of Things Journal. PP. DOI: 10.1109/IJOT.2022.3209874.
14. Antonioli Daniele, Tippenhauer Nils Ole, Rasmussen Kasper. (2020). Key Negotiation Downgrade Attacks on Bluetooth and Bluetooth Low Energy. ACM Transactions on Privacy and Security. 23. 1-28. DOI: 10.1145/3394497.
15. Leonardi Luca, Bello Lucia, Patti Gaetano. (2023). RESEMBLE: A Real-Time Stack for Synchronized Mesh Mobile Bluetooth Low Energy Networks. Applied System Innovation. 6. 19. DOI: 10.3390/asi6010019.
16. Cäsar Matthias, Pawelke Tobias, Steffan Jan, Terhorst Gabriel. (2022). A survey on Bluetooth Low Energy security and privacy. Computer Networks. 205. 108712. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108712.
17. Karoliny Julian, Blazek Thomas, Springer Andreas, Bernhard H.-P. (2023). Predicting the Channel Access of Bluetooth Low Energy.
18. Pyt Patryk, Jankowski-Mihulowicz Piotr, Węglarski Mariusz. (2023). Bluetooth Low Energy Beacon Powered by the Temperature Difference. Electronics. 12. 1278. DOI: 10.3390/electronics12061278.
19. Intro to Bluetooth Low energy / Mohammad Afaneh // Novel Bits, LLC; 1st edition. 2018. С. 65-121.

References

1. A. A. Pakula The use of Bluetooth Low Energy technology for smart devices in mobile development [Text] / A. A. Pakula, E. A. Palamarchuk // Proceedings of the XV international scientific and practical conference "Information technologies and automation", Odessa, October 20-21, 2022 - 2022. P. 166-168.
2. Sydorenko O. I. Innovative technologies for expanding the range of Bluetooth / Interuniversity collection "SCIENTIFIC NOTES". Lutsk, 2022. No. 73. P. 73-79.
3. Research on the problems of building wireless sensor networks / V. M. Julii, A. V. Krasnik, E. S. Lenkov, M. M. Okhramovych, L. O. Ryaba // Khmelnytskyi National University, 2022. P. 51-65 . DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2022/75-06>

4. Halelyuka, I.B. Modeling and evaluation of wireless sensor network parameters for medical use / I.B. Halelyuka // Computer tools, networks and systems. 2018. No. 17. P.47-52. 5. A ma
5. thematical model of multi-criteria optimization of the quality of service of sensor networks using the principle of justice was proposed / N. M. Dovzhenko, V. V. Sobchuk, M. O. Koval // Telecommunications and information technologies, 2019. No. 3. P. 90-97 . DOI: 10.31673/2412-4338.2019.039097
6. Sauter Martin. (2021). Bluetooth and Bluetooth Low Energy. DOI: 10.1002/9781119714712.ch8.
7. Freund Michael, Dorsch Rene, Harth Andreas. (2022). Applying the Web of Things Abstraction to Bluetooth Low Energy Communication. DOI: 10.48550/arXiv.2211.12934.
8. Natgunanathan Iynkaran, Fernando Niroshinie, Loke Seng, Weerasuriya Charitha. (2023). Bluetooth Low Energy Mesh: Applications, Considerations and Current State-of-the-Art. Sensors. 23. 1826. DOI: 10.3390/s23041826.
9. Sun Dazhi, Tian Yangguang. (2022). Address Privacy of Bluetooth Low Energy. Mathematics. 10. 4346. DOI: 10.3390/math10224346.
10. Ližbetin Ján, Pečman Jan. (2023). Possibilities of Using Bluetooth Low Energy Beacon Technology to Locate Objects Internally: A Case Study. Technologies. 11. 57. DOI: 10.3390/technologies11020057.
11. Liu Chendong, Zhang Yilin, Zhou Huanyu. (2021). A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. Journal of Physics: Conference Series. 2093. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2093/1/012021.
12. Ndebugre Moses, Yildirim Tülay. (2022). Bluetooth Low Energy-based Indoor Localization using Artificial Intelligence. The European Journal of Research and Development. 2. 1-15. DOI: 10.56038/ejrnd.v2i3.102.
13. Pang Bozheng, Claeys Tim, Vankeirsbilck Jens, T'Jonck Kristof, Hallez Hans, Boydens Jeroen. (2022). A Novel Model to Quantify the Impact of Transmission Parameters on the Coexistence Between Bluetooth Low Energy Pairs. IEEE Internet of Things Journal. PP. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3209874.
14. Antonioli Daniele, Tippenhauer Nils Ole, Rasmussen Kasper. (2020). Key Negotiation Downgrade Attacks on Bluetooth and Bluetooth Low Energy. ACM Transactions on Privacy and Security. 23. 1-28. DOI: 10.1145/3394497.
15. Leonardi Luca, Bello Lucia, Patti Gaetano. (2023). RESEMBLE: A Real-Time Stack for Synchronized Mesh Mobile Bluetooth Low Energy Networks. Applied System Innovation. 6. 19. DOI: 10.3390/asi6010019.
16. Căsar Matthias, Pawelke Tobias, Steffan Jan, Terhorst Gabriel. (2022). A survey on Bluetooth Low Energy security and privacy. Computer Networks. 205. 108712. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108712.
17. Karoliny Julian, Blazek Thomas, Springer Andreas, Bernhard H.-P. (2023). Predicting the Channel Access of Bluetooth Low Energy.
18. Pyt Patryk, Jankowski-Miśkiewicz Piotr, Węglarski Mariusz. (2023). Bluetooth Low Energy Beacon Powered by the Temperature Difference. Electronics. 12. 1278. DOI: 10.3390/electronics12061278.
19. Intro to Bluetooth Low energy / Mohammad Afaneh // Novel Bits, LLC; 1st edition. 2018. C. 65-121.