

# Надширококуткова технологія для надточного визначення місцезнаходження

Мікаель Віот (Mickael Viot), Алексіс Бізальон (Alexis Bizalio),  
Джервей Сігарс (Jervais Seegars), Qorvo

**У статті на багатьох прикладах розглядається принцип дії та застосування технології надширококуткового зв'язку, її переваги перед іншими поширеними бездротовими технологіями та перспективи розвитку.**

## ВСТУП

Надширококуткова (НШС) технологія бездротового зв'язку, описана в стандарті IEEE 802.15.4a/z, дозволяє вимірювати відстань і місцезнаходження об'єктів з безпрецедентною точністю до декількох сантиметрів, за часом, необхідним радіосигналам для проходження між пристроями. НШС-зв'язок ідеально підходить для нового покоління сервісів надточного визначення місцезнаходження, яким потрібна безпечна інформація про місцезнаходження в режимі реального часу як всередині приміщень, так і зовні. Стандарт був розроблений з урахуванням потреби в малому енергоспоживанні і низькій вартості, а також виходячи з необхідності забезпечити взаємодію з великою кількістю підключених пристроїв. НШС працює в неліцензованому спектрі і співіснує з іншими бездротовими технологіями, що використовують той же спектр. Наразі технологія НШС знаходиться на порозі масового впровадження; вона вже вбудована в передові смартфони та багато інших пристроїв і, зрештою, може отримати таке ж широке поширення, як Wi-Fi та Bluetooth Low Energy (BLE).

У сучасному світі важко уявити собі життя без зручної навігації. Система GPS, яка набула популярності в 1990-х роках, стала величезним досягненням і змінила наше життя. Вона дозволяє знаходити найближчу заправну стан-

цію і дорогу додому, контролювати заняття спортом, складати плани поїздки тощо. Вона допомогла компаніям підвищити ефективність і побудувати нові бізнес-моделі.

10 років по тому ще одне технічне досягнення дозволило здійснювати навігацію в будівлях. Цей сервіс називається позиціонуванням. При розробці перших систем визначення місцезнаходження всередині приміщень використовувалися широкодоступні на той час технології Wi-Fi і BLE. Однак їх здатність визначати місцезнаходження обмежена точністю до декількох метрів.

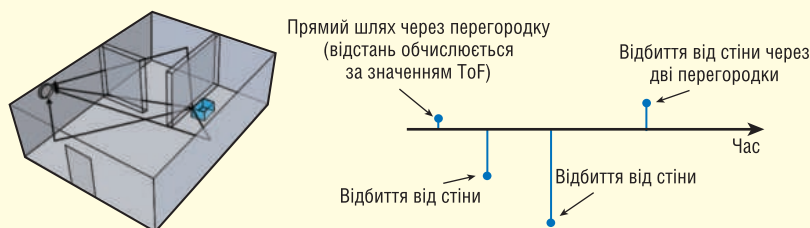
НШС-технологія має унікальну здатність виконувати багато практичних завдань, оскільки вона спеціально розроблена для точного і безпечного визначення місцезнаходження, відстані й напрямку в реальному часі при підтримці двостороннього зв'язку. При частоті оновлень до 1000 разів на секунду вона працює в 50 разів швид-

ше, ніж GPS, і в 3000 разів швидше, ніж стандартний BLE-маячок. Крім того, вона надзвичайно надійна і має високу стійкість до завад, що виникають, наприклад, при багатопроменевому поширенні радіохвиль у приміщеннях.

## ЯК ПРАЦЮЄ ТЕХНОЛОГІЯ НШС

НШС-зв'язок має унікальні характеристики, що дозволяють визначати відстань і місце розташування точніше за інші технології навіть за наявності шуму і багатопроменевих завад. Однією з ключових переваг НШС-зв'язку є використання інформації про час поширення сигналу ToF для розрахунку відстані й напрямку. Використовуючи сигнали з часовими мітками, ми обчислюємо час проходження сигналів між пристроями, множимо його на швидкість світла і визначаємо відстань між ними.

Технології Wi-Fi і BLE, навпаки, покладаються, в першу чергу, на вимірювання рівня прийнятого сигналу (метод RSSI). У цьому методі для визначення відстані до передавача вимірюється рівень прийнятих сигналів, оскільки у вільному просторі потужність радіосиг-



**Рис. 1.** НШС-технологія стійка до багатопроменевого поширення, оскільки для обчислення відстані використовується параметр ToF

налу змінюється обернено пропорційно квадрату відстані до передавача. Ключовою проблемою при використанні RSSI є те, що на рівень сигналу впливають інші фактори, наприклад його проходження через стіни або відбиття від об'єктів. Слабкий рівень сигналу змушує приймач вважати, що передавальний об'єкт знаходиться порівняно далеко, хоча насправді причиною ослаблення сигналу є лише те, що він пройшов через сусідню стіну. Технології на основі RSSI можуть призводити до помилкових вимірювань відстані та невірного визначення місця розташування в приміщеннях.

На рисунку 1 показано перевагу використання ToF для розрахунку відстані в приміщенні: НШС-сигнал, що передається пристроєм праворуч, досягає пристрою ліворуч декількома шляхами. Один веде до сірого пристрою прямо через перегородку; інші шляхи включають відбиття і є довшими. Оскільки прямий шлях є найкоротшим, сигнал по ньому першим досягає сірого пристрою і саме він використовується для обчислення ToF, а відбиті сигнали ігноруються. Такий метод працює, навіть якщо прямий сигнал слабкіший за відбиті. Зауважимо, що НШС-технологія вимагає тільки одного вимірювання для

точного і надійного визначення місця розташування, а іншим бездротовим технологіям необхідно кілька вибірок з подальшою фільтрацією.

Оскільки радіосигнали поширюються зі швидкістю світла, для визначення відстані з точністю до сантиметра потрібна дуже висока точність вимірювання ToF. Сигнал НШС призначений для досягнення цієї мети. На відміну від інших технологій радіозв'язку, в НШС не кодується інформація за допомогою амплітудної або частотної модуляції: інформація передається короткими послідовностями імпульсів, а для кодування даних застосовується двійкова фазова або пакетно-позиційна модуляція (burst position modulation, BPM). Крім того, в НШС-передачі використовується набагато більша смуга пропускання, ніж у вузькосмугових технологіях, зазвичай рівна 500 МГц. В результаті, через зворотну залежність між часом і смугою пропускання використовуються дуже короткі імпульси тривалістю всього 2 нс. У них набагато менше час наростання і спаду, ніж у вузькосмугових сигналів, що дозволяє точно виміряти час прибуття ToA сигналу. Це також допомагає НШС-сигналам зберігати свою цілісність і структуру в присутності шуму і

перевідбиттів. Оскільки дуже короткий НШС-імпульс відокремлений від відбитого сигналу і не піддається його впливу, шум практично ніяк не позначається на переданих сигналах (рис. 2).

Підхід на основі вимірювання часу ToF також був випробуваний з використанням технологій вузькосмугового зв'язку, але, як видно з рисунка 3, вузькосмуговий сигнал дуже чутливий до перевідбиття. Відбитий сигнал може поєднатися з сигналом, що поширюється прямолінійно, викликаючи помилки при прийманні. Деструктивні завади відсувають момент часу, в який сигнал перетинає порогове значення, що використовується для вимірювання ToA, що призводить до зниження точності. Шум також збільшує невизначеність вимірювання ToA.

## ТОПОЛОГІЇ НШС-ЗВ'ЯЗКУ

Завдяки різним способам реалізації технологія НШС може відповідати широкому спектру потреб. Так, наприклад, крім вимірювання відстані, її можна застосовувати для визначення 2D- або 3D-місцезнаходження і напрямку. До основних топологій відносяться:

- двостороннє визначення відстані (two-way ranging, TWR);
- позиціонування за різницею в часі прибуття сигналу (time difference of arrival, TDoA);
- зворотна схема TDoA;
- позиціонування за різницею фаз прийнятого сигналу (Phase Difference of Arrival, PDoA).

Для розуміння способу вимірювання відстані та місцезнаходження за допомогою цієї технології застосовуються поняття «якір» та «мітка». Якір, як правило, є фіксованим НШС-пристроєм з відомим місцем розташування. Мітка зазвичай належить до мобільного НШС-пристрою. Якір і мітка обмінюються інформацією, що дозволяє визначити відстань між ними. Точне місце розташування мітки визначається шляхом взаємодії з декількома якорями. Деякі пристрої можуть виступати як якір, так і як мітка. Наприклад, коли два мобільні телефони використовують НШС-зв'язок для обчислення відстані між ними, вони можуть під час процесу мінятися ролями, чергуючи мітку і якір.

Метод TWR обчислює відстань між міткою і якорем за часом ToF, що витрачається на проходження між ними радіосигналів, а потім множить його на швидкість світла. Прикладом системи,

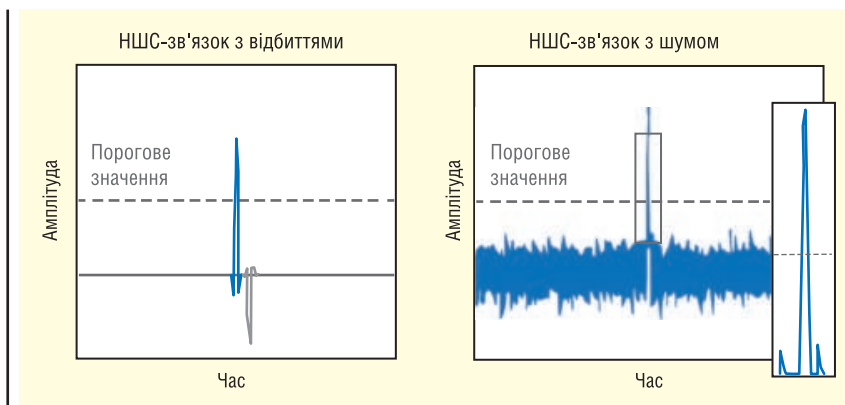


Рис. 2. НШС-імпульси не піддаються впливу відбиттів або шуму

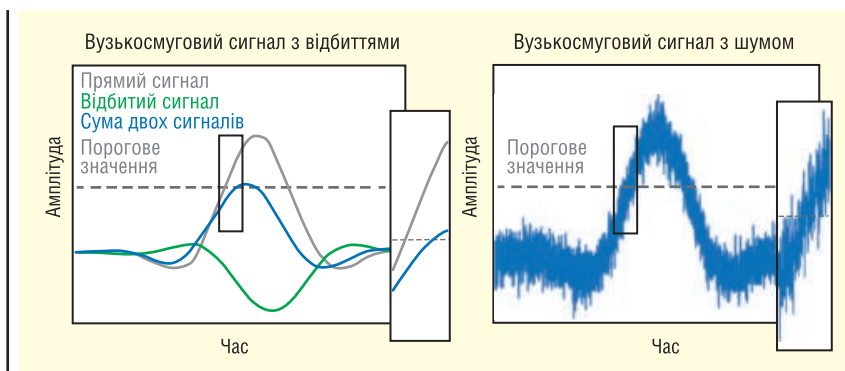


Рис. 3. Вплив відбиттів і шуму на вимірювання ToA вузькосмугових сигналів

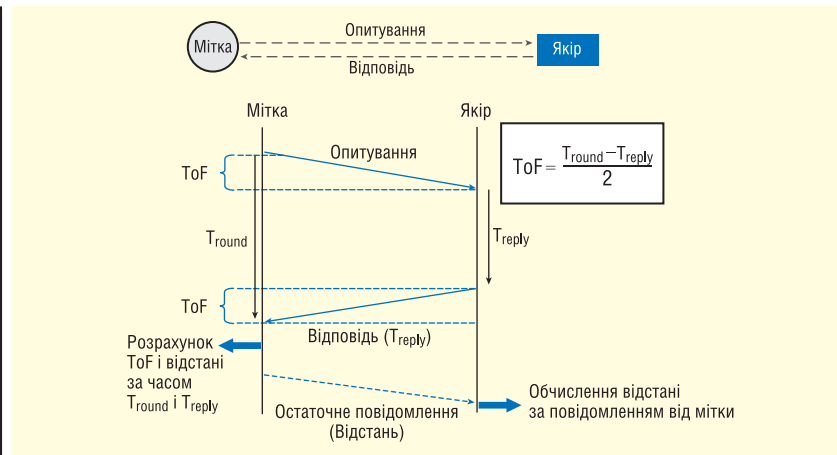


Рис. 4. Безпечний зв'язок між НШС-міткою та якорем

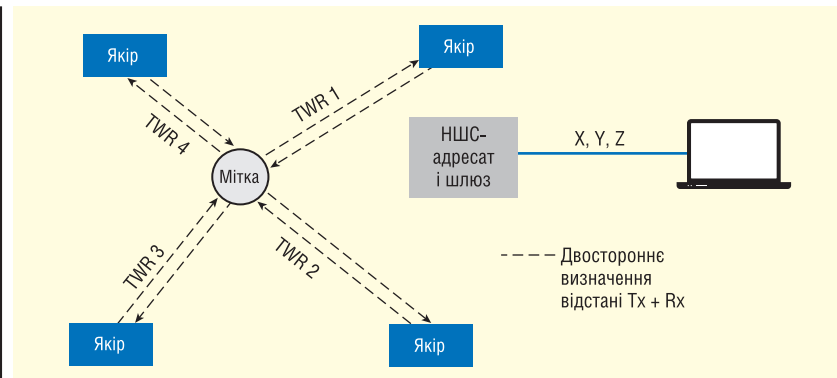


Рис. 5. Двосторонній зв'язок з адресатом з використанням 2D- або 3D-геолокації

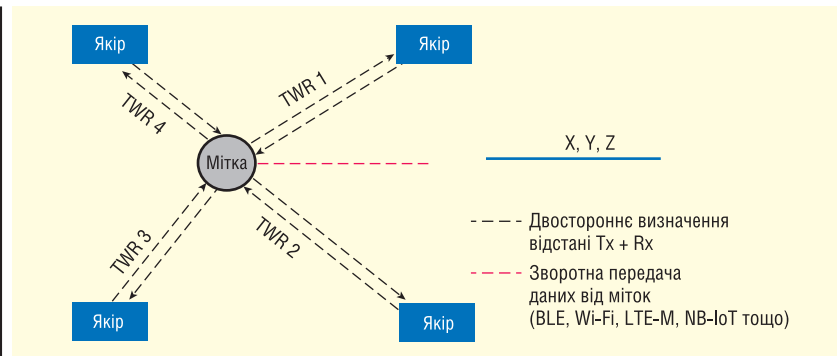


Рис. 6. Двосторонній зв'язок з використанням 2D- або 3D-геолокації та зворотної передачі даних від міток

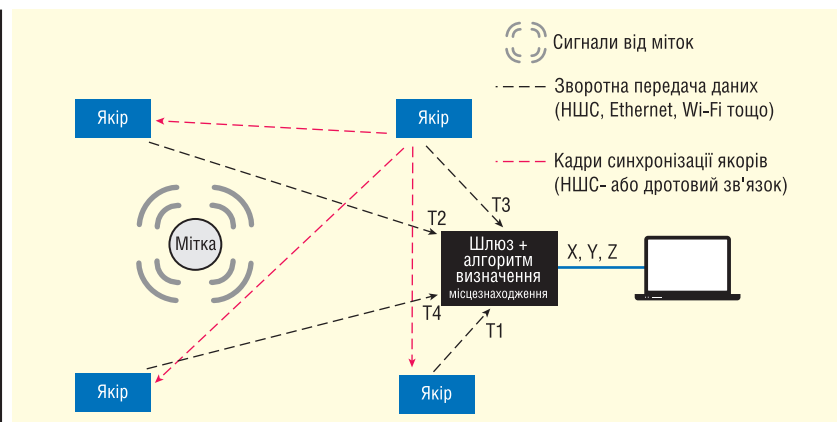


Рис. 7. Визначення місцезнаходження методом TDoA

що використовує TWR для безпечного і точного визначення відстані, є система доступу до автомобіля без ключа (рис. 4). Як видно з рисунка, мітка відправляє сигнал із заданою адресою якоря. Якір записує час отримання повідомлення і відправляє відповідь. Коли мітка отримує відповідь, вона обчислює ToF сигналу на основі часу проходження сигналу в прямому і зворотному напрямках  $T_{\text{round}}$  і часу, за який якір обробляє і відповідає на початку повідомлення  $T_{\text{reply}}$ . Відстань обчислюється шляхом множення ToF на швидкість світла. Потім, якщо потрібно, мітка передає обчислену відстань якорю в остаточному повідомленні.

Використовуючи кілька якорів, метод TWR дозволяє встановити абсолютне положення мобільних пристроїв або інших міток. Визначаючи відстань до трьох або більше якорів, що знаходяться у відомих місцях, пристрій з великою точністю визначає своє місцезнаходження. Потім воно передає інформацію про відстань по НШС-мережі або за допомогою інших бездротових технологій програмам геолокації або шлюзам (рис. 5, 6). Недолік використання методу TWR для визначення місця розташування таким способом полягає в необхідності обміну даними великого обсягу, що збільшує енергоспоживання і обмежує масштабованість.

Навпаки, метод TDoA є надзвичайно масштабованим. Оскільки в цьому випадку сигнал від мітки передається тільки один раз, пристрої споживають дуже мало енергії, а їхні батареї мають дуже тривалий термін служби. Кілька якорів встановлюються у фіксованих і відомих місцях, а також строго синхронізуються за часом. Коли мобільний пристрій надсилає сигнал, кожен якір, що приймає сигнал, відзначає час його прибуття на основі загальної синхронізованої часової осі. Часові мітки від декількох якорів пересилаються в центральний механізм визначення місцезнаходження, який запускає алгоритми мультilateraції для розрахунку місцезнаходження пристрою на основі відмінностей у часі прибуття сигналу на кожен якір (рис. 7). В результаті визначається 2D- або 3D-позиція мобільного пристрою.

Крім того, можна реалізувати зворотну систему TDoA — RTDoA, робота якої частково схожа на функціонування GPS. Якорі передають синхронізовані імпульси з фіксованими або відомими зміщеннями, що дозволяють уникнути конфліктів, а мобільні пристрої вико-

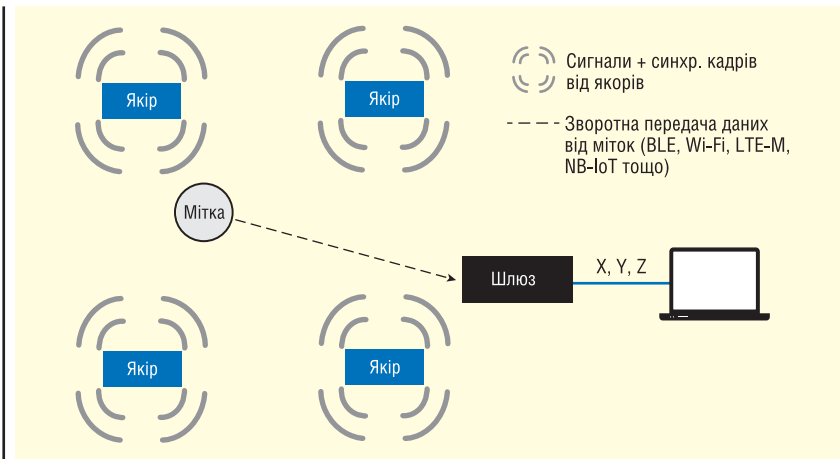


Рис. 8. Зворотний метод TDoA

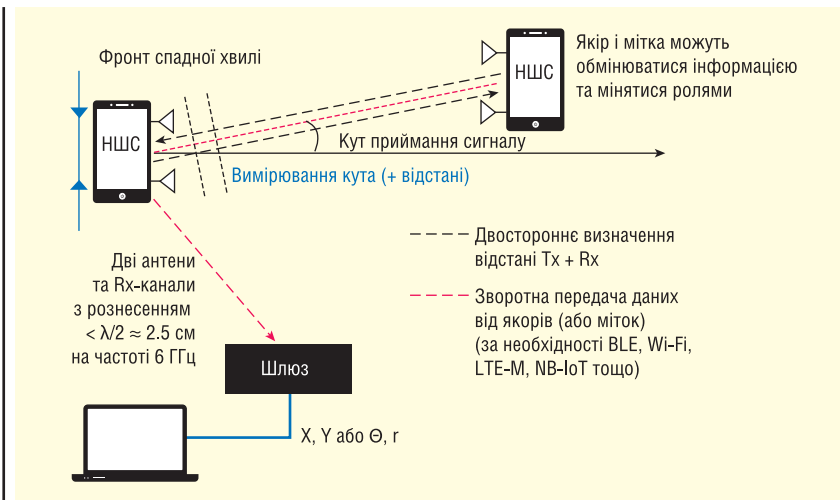


Рис. 9. Використання PDoA для обчислення напрямку і відстані

ристовують алгоритми TDoA і мультилатератії для обчислення їхнього місцезнаходження (рис. 8).

Метод PDoA дозволяє двом пристроям обчислювати їх відносне положення без допомоги будь-якої іншої інфраструктури, використовуючи інформацію про відстань і напрямки. Даний метод застосовується в додатках типу «точка–точка» або для скорочення використовуваної інфраструктури. Для роботи методу PDoA один із пристроїв повинен мати, щонайменше, дві антени (рис. 9). Коли цей пристрій приймає сигнал від іншого пристрою, він вимірює різницю в фазі сигналу, що надходить на кожну антену. На основі цієї різниці він обчислює кут, з якого надійшов вхідний сигнал. Отримавши цю інформацію, приймальний пристрій дізнається не тільки напрямки, в якому знаходиться передавальний пристрій, але і відстань до нього.

Для простоти на рисунках 5–9 показана тільки одна мітка; проте технологія НШС може підтримувати безліч міток.

## ЧАСТОТИ НШС

Оскільки НШС-зв'язок працює в нелицензованому спектрі, будь-хто може здійснювати його без ліцензії на телекомунікаційні послуги, якщо система функціонує в допустимому діапазоні частот і потужності. Федеральна комісія зв'язку США визначає діапазон частот НШС в діапазоні 3.1–10.6 ГГц, а НШС-системи як системи, що працюють з абсолютною смугою пропускання вище 500 МГц при максимальній щільності потужності на центральній частоті  $f_c > 2.5$  ГГц, або з відносною смугою пропускання більше ніж 0.2 при  $f_c < 2.5$  ГГц. Спектр НШС розділений на канали; не всі канали використовуються в усіх регіонах (табл. 1).

При великій ширині смуги пропускання частоти, що використовуються, перекриваються з частотами інших комунікаційних технологій (рис. 10). Щоб уникнути завад, органи регулювання обмежують потужність НШС-передач (табл. 2). Наприклад, Федеральна ко-

## ПЕРИФЕРІЙНИЙ КОНТРОЛЕР USB 2.0

Компанія **Infinion Technologies AG** представила EZ-USB™ FX2G3, периферійний контролер USB 2.0 нового покоління, розроблений для забезпечення високої продуктивності, надійної безпеки та підвищеної енергоефективності USB-пристроїв. Цей новий контролер базується на перевірній платформі EZ-USB™ FX2LP і пропонує високоадаптивне рішення для галузей, що потребують безперебійного та безпечного підключення.

Попит на ефективну та безпечну передачу даних стимулює інновації в різних галузях промисловості, і технологія USB відіграє важливу роль у забезпеченні цієї зв'язності. Контролери EZ-USB FX2G3 містять блоки послідовної комунікації (SCB), криптографічний механізм для підвищення безпеки та підсистему даних з високою пропускною здатністю, яка полегшує передачу даних DMA від входу LVCMOS до виходу USB зі швидкістю до 480 Мбіт/с, що підходить для хост-систем на базі USB Hi-Speed. У підсистему передачі даних з високою пропускною здатністю інтегровано 1024 КБ SRAM для забезпечення достатньої буферизації даних.

Універсальність EZ-USB FX2G3 дозволяє йому безперешкодно інтегруватися в різні галузі промисловості. Наприклад, у біометричних системах FX2G3 забезпечує безпечне та швидке розпізнавання відбитків пальців або аутентифікацію за обличчям, надаючи споживачам зручний та безпечний спосіб доступу до своїх пристроїв. У медичних та оздоровчих пристроях контролер керує портативними діагностичними інструментами, системами візуалізації та моніторингом пацієнтів, що дозволяє медичним працівникам надавати більш ефективну та результативну допомогу. У промислових системах контролер полегшує збір даних та комунікацію в режимі реального часу в системах робототехніки та автоматизації, підвищуючи продуктивність та ефективність. У побутовій електроніці швидкість та ефективність контролера покращують ігрові пристрої, аудіопериферію та інші USB-аксесуари, надаючи споживачам більш приємний та захоплюючий досвід. У робототехніці EZ-USB FX2G3 підтримує інтеграцію датчиків та розширене управління, забезпечуючи високу чутливість як у промислових, так і в споживчих конструкціях.

[www.infineon.com](http://www.infineon.com)

Таблиця 1. Канали НШС-зв'язку та географія їх використання

Канал	Носійна частота, МГц	Смуга пропускання, МГц	Регіон
0	499.2	499.2	Пропріетарний
1	3494.4	499.2	США, ЄС
2	3993.6	499.2	США, ЄС, Японія, Корея
3	4492.8	499.2	США, ЄС, Японія, Корея
4	3993.6	1331.2	США, ЄС
5	6489.6	499.2	США, ЄС, Китай
6	6988.8	499.2	США, ЄС, Китай
7	6489.6	1081.6	США
8	7488	499.2	США, ЄС, Корея, Китай
9	7987.2	499.2	США, ЄС, Японія, Корея, Китай
10	8486.4	499.2	США, ЄС, Японія, Корея, Китай
11	7987.2	1331.2	США, Японія, Корея
12	8985.6	499.2	США, Японія, Корея
13	9484.6	499.2	США, Японія, Корея
14	9984	499.2	США, Японія, Корея
15	9484.8	1354.97	США, Японія, Корея

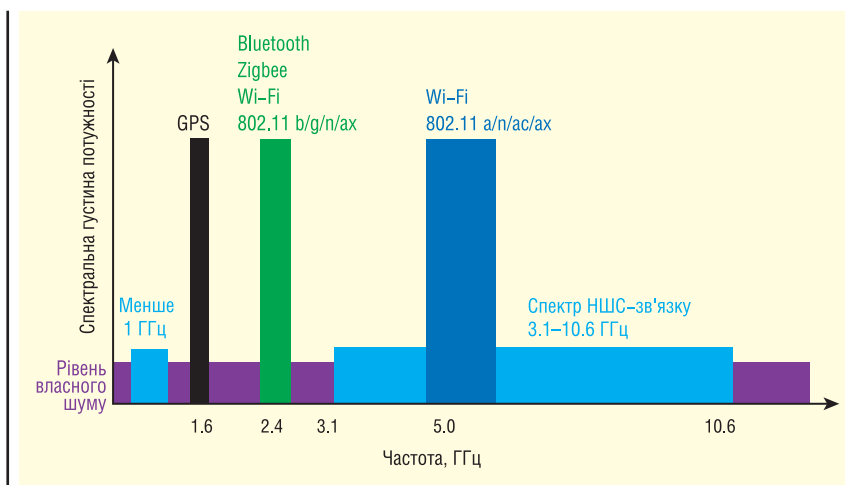


Рис. 10. Використання спектра поширеними бездротовими технологіями

Таблиця 2. Межі EIRP UWB

Частота, МГц	EIRP, дБм
960–1610	–75.3
1610–1990	–53.3
1990–3100	–51.3
3100–10600	–41.3
Вище 10600	–51.3

- безпечний доступ до автомобіля без ключа;
- пошук предметів;
- підвищення продуктивності та безпеки на заводах;
- керування інтелектуальними пристроями в будинках на основі місцезнаходження користувача.

Інтеграція технології НШС у смартфони є ключовим кроком до її використання в повсякденному житті. Підтримка НШС в смартфонах призведе до розвитку широкої екосистеми нових пристроїв і додатків, які не можуть бути реалізовані за допомогою інших технологій. НШС — потенційно революційна технологія, яка в кінцевому підсумку стане повсюдною.

Однак, як правило, потрібен час, щоб повністю реалізувати потенціал нової технології та впровадити її в масове використання. Важко передбачити її майбутнє, і все ж історія дає

нам підказки щодо можливого шляху її розвитку. Наприклад, технологія Wi-Fi з'явилася на початку 1990-х рр. як пропріетарне рішення для бездротового зв'язку касових апаратів. Підтримка Wi-Fi компанією Apple в 1999 р. допомогла прискорити впровадження цієї технології, створивши багату екосистему пристроїв і мережевий ефект, що призвів до щорічних продажів мільярдів пристроїв.

Ключем до масового впровадження є сумісність, а також розробка повнофункціональних програмних пакетів і апаратних рішень, які розробники можуть використовувати в якості компонентів блоків. Кілька галузевих консорціумів працюють над функціональною сумісністю, варіантами використання і регулюванням НШС-зв'язку. Серед учасників — постачальники напівпровідників і виробники пристроїв, автомобільні виробники, постачальники випробувального обладнання та розробники програм. Консорціум FiRa розробляє варіанти використання НШС-зв'язку в багатьох галузях, зокрема керування доступом без допомоги рук, визначення місцезнаходження та навігація в приміщеннях, а також програми типу «точка-точка». Місія консорціуму полягає в розробці методів випробувань, програм сертифікації та заходів для забезпечення сумісності між НШС-пристроями.

Консорціум Car Connectivity працює над рішеннями для підключення смартфонів до автомобілів. Він розробляє Digital Key — новий відкритий стандарт, що дозволяє таким інтелектуальним пристроям, як смартфони та смарт-годинники, виступати у ролі ключів від автомобіля. Альянс UWB співпрацює з глобальними органами регулювання та організаціями, щоб забезпечити сприятливе середовище регулювання та використання спектра для максимального зростання ринку НШС-зв'язку.

## ВИСНОВКИ

НШС-технологія має унікальну здатність обчислювати місце розташування, відстань і напрямок з безпрецедентною точністю, в приміщеннях і на відкритому повітрі, безпечно і в режимі реального часу. Ці можливості призведуть до появи ряду нових додатків для надточного визначення місцезнаходження, що надають раніше недоступні функції.

CN

## МАЙБУТНЄ НШС-ЗВ'ЯЗКУ

НШС-технологія знаходиться на порозі масового впровадження і зараз використовується для широкого кола застосувань на понад 40 вертикальних ринках, у тому числі: