

# Зв'язок 6G, або наступний горизонт



Загляньмо у рік 2030-й і подивімось на ще більш мобільний зв'язок.

**М**ережі 5G лишень почали з'являтися, а вчені та інженери вже потроху обговорюють напрямки подальшого розвитку мобільних комунікацій. Вже створено кілька організацій, які займаються цією проблемою. Все поки що дуже розмито, і багатьох технологій навіть не існує, проте у середовищі фахівців уже вимальовується консенсус стосовно того, що закладатиметься у нове покоління зв'язку: зокрема, терагерцові частоти, машинне навчання, інтеграція наземних і висотних компонентів тощо.

Тож хоча до реалізації ще дуже далеко, можна приблизно уявити, як виглядатиме 6G і навіщо її створюють.

## Послуги шостого покоління

То, власне, для чого буде потрібен зв'язок 6G? У 2020 році компанії **Samsung** і **Nokia** оприлюднили свої бачення 6G, і значна частина того, про що йдеться нижче, ґрунтується на тезах їхніх звітів.

Отже, Samsung виходить з прогнозів, що до 2030 року у світі буде 500 млрд підключених пристроїв — у 59 разів більше, ніж населення Землі на той час (8,5 млрд). Зокрема, це мобільні пристрої, які набуватимуть різноманітних форм-факторів (зокрема, термінали голографічного зв'язку, окуляри віртуальної і доповненої реальності), а також машини: автомобілі, роботи, хатня техніка, датчики, будівельне і заводське устаткування тощо.

Як прогнозує Nokia, за десять років набудуть поширення різноманітні пристрої, що носяться — вшиті в одяг, натільні або імплантовані, а також, можливо, й нейросенсори для управління машинами. Набір тексту на сенсорному екрані вийде з ужитку, натомість нормою стане управління голосом і жестами. Автомобілі з автономним водінням; камери спостереження та інші датчики, які встановлюватимуться буквально скрізь; цифрові ключі та гаманці; різноманітні домашні роботи, споряджені відеокамерами; пристрої цілодобового моніторингу здоров'я — усе це стане повсякденною реальністю.

Бездротові технології історично розвивалися з огляду на людину, хоча мережі п'ятого покоління також проєктуються з урахуванням підключення пристроїв «Інтернету речей». Проте, наголошує Samsung, технології 6G розроблятимуться спеціально для підключення мільярдів машин, які й стануть їхніми основними «користувачами». Зокрема, вони муситимуть передавати значно більше інформації про зовнішнє середовище, ніж та, що доступна людським органам чуттів. Наприклад, якщо людське око має роздільну здатність  $1/150^\circ$  при куті зору  $200^\circ$  по азимуту і  $130^\circ$  по зеніту, то машинний зір цими параметрами не обмежений, оскільки може послуговуватись багатьма камерами з різними функціями.

Samsung зазначає, що у наступному поколінні продовжиться розвиток можливостей, які вже надає 5G, а саме: надширокосмуговий мобільний доступ (eMBB), наднадійний міжмашинний зв'язок з низькими затримками (URLLC) і масовий міжмашинний зв'язок (mMTC). Своєю чергою, розвиток комунікацій (а також технологій фотографування, відображення тощо) уможливить розвиток цілком нових мультимедійних сервісів.

Зокрема, це XR з ефектом присутності. Під терміном «XR» розуміють загалом віртуальну (VR), доповнену (AR), а також змішану (MR) реальність. Передбачається, що ці сервіси відкриють нові горизонти в медицині, освіті, виробництві та інших галузях, проте досі критичною перешкодою є можливості апаратного забезпечення. Сучасним пристроям бракує обчислювальної потужності для реалізації XR, а існуючі бездротові мережі не дозволяють передати обчислення зовнішнім серверам. Окрім того, вони не мають пропускної здатності для передавання мультимедійних потоків. Наприклад, сучасна технологія AR вимагає швидкості 55,3 Мбіт/с для передавання картинки у якості 8K на дисплей смартфона з 1 млн пікселів. Проте для забезпечення AR з ефектом присутності знадобиться вже 16 млн пікселів і відповідно 0,44 Гбіт/с. VR, імовірно, вимагатиме пропускної здатності як для відео у якості 16K, і тут вже знадобиться канал у 0,9 Гбіт/с. Можливості нинішніх мереж 5G до цього не дотягують.

Ще більші швидкості знадобляться для голографічного зв'язку (як у «Зоряних війнах»). Голографічний дисплей дозволить передавати жестикуляцію і міміку, проте пересилання голограм у реальному часі вимагатиме пропускної здатності, у сотні разів більшої, аніж у 5G. Приміром, для відображення голограм над дисплеєм з діагоналлю 6,7 дюйма при розмірі пікселя 1 мкм потрібно буде 0,58 Тбіт/с, при тому, що пікова швидкість у 5G становить 20 Гбіт/с. З іншого боку, для зменшення обсягів даних може придатися штучний інтелект (ШІ), який забезпечуватиме компресію і рендеринг голограм.

## Щось на кшталт телепортації

Ще одне застосування 6G — цифрові репліки. Ця технологія дозволяє створювати точні копії реальних об'єктів у віртуальному світі, щоб потім дистанційно стежити за станом оригіналів. За допомогою VR-пристроїв або

голографічних дисплеїв, а також віддалено керованих сенсорів і актуаторів користувач зможе реально взаємодіяти з об'єктами: наприклад, «пересуватись» віддаленою локацією, керуючи реплікою реального робота, який там перебуває. Також завдяки цифровій реплікації і штучному інтелекту можна буде вирішувати проблеми у реальному світі без втручання людини. Проте це також вимагатиме великої пропускної здатності. Наприклад, для реплікації площі  $1 \times 1$  м знадобиться терапіксельне зображення, яке вимагатиме пропускної здатності у 0,8 Тбіт/с за умови періодичної синхронізації кожні 100 мс і компресії 1/300.

На думку професора Рахіма Тафазоллі, голови центру інновацій 5G в Університеті Каррея, що її наводить сайт 6G World, мережі шостого покоління розвинути можливість віртуальної й доповненої реальності до чогось на зразок телепортації. Окрім перенесення тривимірного зображення об'єкта, стане можливим передавання нової інформації — зокрема такої, що сприймається людськими органами чуття. Її можна імітувати, інтегрувавши систему зв'язку з «штучною біологією». Це дозволить людям взаємодіяти у цифровому світі таким самим чином, як і у реальному. «Уявіть, що лікар зможе бути віртуально присутнім у вашому домі, доторкнутись до вашої руки або помацати лоба, щоб поміряти температуру, і загалом взаємодіяти з пацієнтами звичайним людським чином», — сказав Тафазоллі. Аналогічно зможуть координувати свої дії роботи і автомобілі, що рухаються містом.

Проте такого типу сервіси потребуватимуть повної синхронізації між цифровим і реальним світами, а також скорочення джиттеру, що ніколи не закладалося у специфікації 5G. Загалом ця синхронізація, повсюдне покриття і геолокація у реальному часі мають стати наріжними каменями 6G, тоді як 5G поки що зосереджується на забезпеченні високих швидкостей.

За словами Вільяма Вебба, глави консалтингової компанії **Webb Search**, якого також цитує 6G World, може цілком виявитися так, що 6G закрие прогалини, які залишить 5G, так само як у 2G було усунуто недоліки 1G, а в 4G — забезпечено швидкісний мобільний Інтернет, який нам обіцяли ще в 3G. «У 4G не було ніяких нових послуг, — каже Вебб. — Це було щось на кшталт: а давайте полагодимо 3G, забезпечивши пристойну швидкість, низьку затримку і стабільний зв'язок. І ось тепер 5G — знов стрибок у невідоме».

## Архітектурні новації

Для задоволення чималих потреб майбутніх сервісів мережі зв'язку 6G також повинні будуть мати надзвичайно високі характеристики роботи, які наразі недоступні (**рис. 1**). Насамперед це стосується пропускної здатності. Наприклад — як йдеться у звіті Samsung, — якщо у 5G пікова швидкість становить 1 Гбіт/с, а середня — 100 Мбіт/с, то у 6G ці показники мають становити відповідно 20 і 1 Гбіт/с. Спектральна ефективність (тобто швидкість передавання в обрахунку на ширину смуги частот) також має подвоїтися.



**Рис. 1.** Порівняння основних показників роботи мереж 5G і 6G (джерело: Samsung)

Застосунки реального часу, такі як інтерактивний тактильний Інтернет, потребуватимуть затримки у радіомережі на рівні менш ніж 100 мкс, наскрізної затримки менш ніж 1 мс і джитера на рівні кількох мілісекунд. За умови виконання цих вимог затримка для користувача буде меншою за 10 мс, що є вимогою для показника Photon-to Motion (тобто часу повного відображення руху на екрані) для сервісів XR. Для підтримки застосунків реального часу, що вимагають надвисокої надійності (промислова автоматика, дистанційна хірургія тощо), Samsung пропонує покращити коефіцієнт помилок у 100 разів порівняно з 5G (до  $10^{-7}$ ). Кількість підключених пристроїв на квадратний кілометр має зрости на порядок (до  $10^7$ ), енергоефективність терміналів та мереж — щонайменше удвічі.

Архітектура мережі повинна враховувати обмежені обчислювальні можливості кінцевих пристроїв і підтримувати передачу тих обчислень більш потужним системам, які знаходяться в мережі. Якщо в 4G вони здійснюються в хмарі, а в 5G — на серверах крайових обчислень у ядрі або біля базових станцій, то в 6G має бути досягнута конвергенція комунікаційних і обчислювальних потужностей. Як зазначає Nokia, ми наближаємося до граничної кількості транзисторів, які можна вмістити в певний об'єм, до того ж майбутні пристрої, що носяться, будуть обмежені в своїх розмірах і відповідно в обчислювальних можливостях, тому мережі 6G повинні включати комп'ютерні ресурси, доступні локально, але відокремлені від кінцевого обладнання.

З точки зору власне комунікаційних можливостей Nokia бачить дві тенденції, що почалися ще в 5G: віртуалізацію частини функцій мережі радіодоступу, які тепер виконуються на краю (edge) або в хмарі, і одночасну децентралізацію функцій пакетного ядра, які також реалізуються в регіональній хмарі. Завдяки цьому архітектуру мережі можна буде спростити, об'єднавши деякі функції RAN і ядра.

Ще одна архітектурна новація полягає в тому, що в усі мережеві компоненти має бути вбудований штучний інтелект. Це дозволить оптимізувати розміщення базових станцій, покращити якість хендоверу, забезпечити прогнозування і виявлення аномалій, а також самовідновлення мережі. Окрім того, він дозволить зменшити споживання електроенергії. Механізми машинного навчання забезпечать самооптимізацію параметрів сигналів, що передаються, управління розподілом частот як між різними операторами, так і між окремими технологіями на мережі однієї компанії. Також стане можливим контекстно-орієнтований зв'язок (наприклад, використовуючи дані з камер спостереження, розташованих у заводському цеху, система враховуватиме рух різних механізмів і відповідно завади поширенню радіохвиль, які вони створюють).

Nokia зазначає: оскільки мережа 6G повинна забезпечувати надійний (на рівні дротового) зв'язок у промислових середовищах (від нерухомих ізольованих пристроїв до роїв дронів, які є взаємопоеднаними, проте потребують прямого доступу до мережі, коли відокремлені від рою), є сенс виділяти окремі підмережі, де якість послуг зберігатиметься, навіть якщо у мережі в цілому вона деградує.

Важливим напрямком, на думку Samsung, може стати використання ПО з відкритим кодом для реалізації мережевих функцій на процесорах загального призначення (зокрема, систем радіодоступу і управління мережею). Це знизить бар'єри для доступу на ринок, покращить взаємодію і скоротить час розробки мережевого ПО. З іншого боку, це може спричинити серйозні проблеми з кібербезпекою, адже буде важко забезпечити захищеність відкритого коду від дій злоумисників, а до того ж доступ постачальників ПО до даних користувачів може потенційно призвести до витоку цієї інформації. Наразі складно визначити, якими саме будуть вимоги щодо кіберзахисту, проте можна передбачити такі напрями: створення захищеного апаратного середовища для безпечного виконання програм і збереження облікових даних; принцип «безпечності за визначенням», який гарантує, що будь-якому програмному і апаратному забезпеченню можна довіряти; принцип прозорості, тобто система повинна бачити, як і коли ШІ отримує доступ до даних і наскільки він захищений проти ворожих засобів машинного навчання.

## Терагерцовий зв'язок і метаповерхні

У 2019 році Федеральна комісія зі зв'язку США (FCC) відкрила частоти 95–3000 ГГц для експериментального застосування без ліцензій. Терагерцовий діапазон дозволить використовувати канали шириною у десятки ГГц, що потенційно відкриє можливість забезпечити терабітні швидкості, яких потребуватимуть сервіси 6G. Принагідно зв'язок у терагерцовому діапазоні забезпечить позиціонування більш високої точності у тривимірному просторі.

Проте для організації стабільного зв'язку на терагерцових частотах доведеться подолати низку фундаментальних

технічних проблем. Насамперед це загасання, яке буде дуже значимим. Високочастотні сигнали легко блокуються поверхнями. Понад те, в цьому діапазоні розташовані спектральні лінії поглинання кисню і води, що вимагатиме розроблення точних моделей багатопроменевого поширення сигналу. Імовірно, знадобляться нові схеми модуляції і кодування сигналів.

Чимало труднощів передбачається і зі створенням електроніки, що працює в терагерцовому діапазоні. Донедавна її взагалі не існувало, хоча останнім часом досягнуто деякого прогресу. Наприклад, у 2019 році дослідники з Наньянського технологічного університету (Сінгапур) і Осацького університету (Японія) створили чіп, який може передавати і обробляти інформацію з використанням терагерцових частот, при цьому було досягнуто швидкості передавання 16 Гбіт/с. Керівник проекту Ранджан Сінгх зазначив, що вченим вдалося виявити схему хвилеводу, який забезпечує поширення випромінювання фактично з нульовими втратами, а також дозволяє огинати вкрай гострі повороти всередині кремнієвого кристалу. Сінг сподівається в подальшому завдяки більш складним схемам модуляції вийти на 100 Гбіт/с, а також очікує, що за п'ять років буде досягнуто терабітних швидкостей.

Також у 2019 році Європейський консорціум фотонної промисловості (EPIC), утворений шістьма компаніями і університетами, продемонстрував передачу даних на швидкості 107 Гбіт/с з використанням частот, вищих за 100 ГГц. А група дослідників з університету Карлсруе успішно здійснила передачу сесії зв'язку (хендвер) між пристроями, які знаходились на відстані 110 м один від одного і працювали на частоті 0,3 ТГц.

Для компенсації загасання, ймовірно, на базових станціях використовуватимуться надвеликі антенні масиви — Ultra-massive MIMO. Вони генеруватимуть надзвичайно сфокусовані промені, подібні до лазерних, в результаті зв'язок відбуватиметься лише у прямій видимості.

Іншим перспективним напрямком є використання метаматеріалів на основі керованих елементів (PIN-діодів, варикапів тощо), які утворюють рисунок, дрібніший за довжину хвилі. Змінюючи параметри цього рисунка, можна маніпулювати електромагнітними хвилями: блокувати, посилювати, перенаправляти тощо. Наприклад, за допомогою такої антени можна лінзувати випромінювання, створювати спрямовані промені або забезпечувати їх поширення там, де немає прямої видимості.

Значні надії покладають на «великі розумні поверхні» (Large Intelligent Surfaces — LIS). Це масиви пасивних компонентів, які також за розмірами менші за довжину хвилі і можуть вибірково пропускати або блокувати випромінювання. Такі панелі можна буде розташовувати на стінах і стелях (або всередині них). За задумом, LIS мають створювати більш сприятливе середовище для поширення радіохвиль, забезпечуючи належну якість обслуговування (наприклад, завдяки мінімізації інтерференції).

У січні 2020 року японська компанія **NTT DoCoMo** здійснила випробування «прозорої динамічної метаповерхні» (рис. 2), виконаної у «форм-факторі» віконного скла. Поверхня складалась з великої кількості дрібних елементів, що утворювали рисунок на двовимірній панелі і були накріті скляною пластиною. Залежно від положення пластини прототип можна було переводити в один з трьох режимів: пропускання падаючих радіохвиль, часткового або повного їх відбиття. Випробування проводились на частоті 28 ГГц, проте NTT наголошує, що технологія працює і в більш високих діапазонах частот, аніж ті, що використовуються у 5G.



Рис. 2. Прототип прозорої динамічної метаповерхні NTT DoCoMo

Між тим в Європі утворено проект AIMM (AI-enabled Massive MIMO), який має до 2022 року розробити технології використання метаповерхонь для створення «розумного» середовища для поширення радіохвиль, а також забезпечення недорогого і енергоефективного «голографічного MIMO». Для точного моделювання електромагнітних властивостей поверхонь і оптимізації розташування цих поверхонь використовуватимуть машинне навчання. Серед учасників проекту — BT, Nokia Bel Labs і університет Париж-Сакле.

## Модуляція часу і простору

Пропонуються й інші методи збільшення пропускної здатності мереж. Одним з них може бути перехід до повнодуплексного режиму зв'язку. Традиційно канали передавання і приймання використовують різні частоти або часові інтервали (залежно від типу мультиплексування). Перерозподіл цих ресурсів залежно від реального трафіку дозволить збільшити спектральну ефективність, проте для цього треба вирішити питання перехресних і власних завад.

Інший шлях — заміна схеми модуляції. Замість OFDM, яка вірою і правдою служить в 4G і 5G, розглядається ортогональна часово-частотна і просторова модуляція (Orthogonal Frequency-Time and Space — OTFS). IEEE має намір наступного року провести семінар, присвячений використанню цієї технології в 6G.

Як пояснює один з розробників OTFS, професор Ронні Хадані з Техаського університету, в інтерв'ю сайту 6G World, перевагою цієї технології є те, що сигнал практично не зазнає спотворень під час поширення, що дуже важливо для зв'язку з високорухомими об'єктами. Це, знову-таки, закрийє «дірку» в можливостях 5G, де також обіцяли підтримку зв'язку під час руху з високою

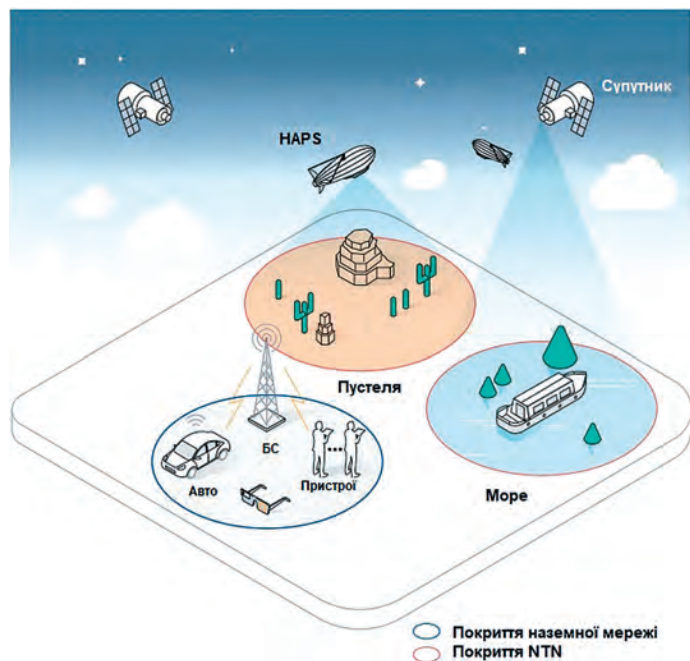
швидкістю, проте на практиці все вперлося в можливість OFDM. «На вищих рівнях 5G забезпечує велику гнучкість, проте на фізичному, найбільш фундаментальному, 5G виявилось поколінням, яке розчарувало», — зазначив Хадані.

Окрім того, сигнал OTFS може одночасно працювати як радар, даючи змогу вимірювати відстань до об'єкта і його швидкість. Це особливо потрібно для технології V2X (Vehicle-to-Everything), яка дозволяє автомобілю комунікувати з іншими машинами і елементами дорожньої інфраструктури.

Загалом вчений називає OTFS зміною парадигми, оскільки ця технологія дозволить перейти від стільникової структури до координації базових станцій, які діятимуть як одна велика БС. Побічним ефектом такої координації є збільшення затримки передавання з сотень мікросекунд до десятків мілісекунд, і для врахування змін середовища навколо користувацьких терміналів знадобиться можливість певного передбачення. За словами Хадані, OTFS таку можливість дає.

## На небі, як і на землі

Окрім того, мережі 6G «здіймуться в небо» і підтримуватимуть не лише наземні компоненти, але й супутники (геостационарні і модні низькоорбітальні), а також висотні платформи (High Altitude Platform System — HAPS), або так звані «атмосферні супутники» — квазістационарні дирижаблі або безпілотники, які розташуються на висоті 20–50 км і забезпечать зв'язок в ізольованих місцевостях (рис. 3).



**Рис. 3.** Включення космічних і стратосферних компонентів у мобільний зв'язок (джерело: Samsung)

Ця концепція, що носить назву Non-Terrestrial Network (NTN), тобто «мережа, відмінна від наземної», також потребуватиме вирішення низки нових завдань: у тому

числі підтримки рухомих чарунок, великих чарунок завбільшки у сотні кілометрів, значних втрат і затримок при поширенні сигналу, а також доплерівського зсуву, спричиненого швидким рухом компонентів NTN.

6 листопада Китай відправив у космос «перший у світі супутник 6G». Апарат «Тяньянь-5» масою 70 кг обладнаний камерою для дистанційного зондування Землі, проте основне його призначення — експерименти в області швидкісного зв'язку. Повідомлялося, що супутник буде використовуватись для тестування комунікацій у терагерцовому діапазоні.

## Робота почалася

Тим часом у світі створюються групи і альянси для розробки і стандартизації технологій 6G. Китай оголосив про початок такої роботи ще кілька років тому, навесні оператор China Unicom і компанія-виробник ZTE уклали угоди щодо технологічної співпраці у 6G. Подібні ініціативи висунули Японія й Південна Корея. У жовтні США та Канада сформували організацію Next G Alliance, яка має закласти підвалини розвитку 6G у Північній Америці, вона планує оприлюднити «дорожню карту» у 2021 році. (До складу увійшли як місцеві оператори зв'язку, так і провідні виробники: Cisco, Ericsson, Intel, Nokia та багато інших, нещодавно до них доєднались Apple і Google).

У грудні було створено проект Неха-Х, який фінансується Європейським Союзом і має на меті дослідження у царині нового покоління мобільних мереж. У проекті, який очолює Nokia, беруть участь Ericsson, Intel, Siemens, оператори Orange і Telefonica, університети Оулу (Фінляндія) і Пізи (Італія). Неха-Х є частиною дослідницько-інноваційної програми Horizon 2020.

То коли ця фантастика стане реальністю? Samsung зазначає, що покоління мобільного зв'язку в середньому змінюються кожні 10 років, проте час від формування концепції до розробки стандартів скорочується: для 3G це зайняло 15 років, для 5G — вісім. Компанія розраховує, що ITU-R розпочне роботу з визначення параметрів 6G у 2021 році; фіналізованих стандартів і перших комерційних проектів слід очікувати у 2028-му, а масове впровадження розпочнеться у 2030-му.

Такої самої думки дотримується NTT DoCoMo, яка у січні 2020 року розпочала розробку стратегії 6G з прицілом на комерційне впровадження у 2030-му.

Процитований вище Вільям Вебб застерігає проти надмірно швидкого розвитку 6G, попереджаючи, що в результаті ми отримуємо просто «5G на стероїдах». Адже якщо 5G не виправдає сподівань, а роботи 6G просунуться далеко, міняти курс буде вже запізно.

Втім, до всього цього ще треба дожити.

**Василь ТКАЧЕНКО, Мережі та Бізнес**