

Informatics and Information Technologies

DOI: <https://10.15407/kvt197.03.005>

УДК 004.72

ГРИЦЕНКО В.І., член-кореспондент НАН України,
директор Міжнародного науково-навчального центру
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України
e-mail: vig@irtc.org.ua

СУРОВЦЕВ І.В., д-р. техн. наук, старш. наук. співроб.,
зав. відд. екологічних цифрових систем
e-mail: dep175@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com

БАБАК О.В., канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
старш. наук. співроб. відд. екологічних цифрових систем
e-mail: dep175@irtc.org.ua

Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України,
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

СИСТЕМА БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

***Вступ.** Високошвидкісна мобільна система зв'язку 5G активно розвивається у багатьох країнах світу. Важливо розуміти наукові та технічні передумови бездротової технології 5G, щоб ефективно використовувати їх у нових інтелектуальних інформаційних технологіях.*

***Мета статті** — проаналізувати архітектурні особливості, методи комунікації та завдання, покладені в основу проектування технології 5G.*

***Результати.** Показано, які конкретні технічні та технологічні проблеми повинні бути вирішені для досягнення широким можливостей мобільного зв'язку 5G. Водночас, технологію 5G незабаром буде стандартизовано та впроваджено у всьому світі, включаючи Україну. Можливість підключення безлічі зовнішніх пристроїв в умовах електромагнітних перешкод з використанням LTE-з'єднань у разі розподілення по великій площі та за суворих вимог до затримок виконання технологічних процесів дає змогу стверджувати, що технологія бездротового зв'язку 5G є необхідною і незамінною в дослідженнях і виробництві.*

***Висновки.** Бездротові технології 5G та хмарні обчислення є необхідними умовами для створення швидкісного мобільного зв'язку, кіберфізичних систем та надання широкого спектру послуг споживачам.*

***Ключові слова:** технологія 5G, мобільний зв'язок, архітектура зв'язку 5G, Інтернет, кіберфізичні системи.*

© ГРИЦЕНКО В.І., СУРОВЦЕВ І.В., БАБАК О.В., 2019

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). Сyb. and comp. eng. 2019. № 3 (197)

ВСТУП

Технології мобільного бездротового зв'язку стали невід'ємною частиною нашого життя, зумовлюючи значний соціально-економічний вплив на розвиток країн світової спільноти. Різке зростання кількості мобільних пристроїв і обсягу трафіку привів до появи технології бездротового зв'язку 4G, надаючи засіб для широкосмугових мобільних послуг у будь-який час та в будь-якому місці. Однак, потреби ринку настільки великі, що вже є розробленою і розгортається мережа мобільного зв'язку 5G. Перспективи її використання пов'язують зі створенням нових інтелектуальних інформаційних технологій та систем. Бездротовий зв'язок 5G вже частково впроваджено у Німеччини, Великобританії, США, Японії, Китаї, Південної Кореї. З огляду на це, вкрай важливо розуміти, на яких наукових і технічних засадах побудовано технологію 5G. Дуже коротко зупинимося на історичних і практичних аспектах створення нової технології 5G і розробленні, яке потрібно виконати для її розвитку. Порівняння всіх поколінь технологій бездротового зв'язку (1G-5G) відображено в Табл. 1.

Аналізуючи хронологію еволюції поколінь бездротового зв'язку, можна зробити висновок, що технологію 5G буде стандартизовано і розгорнуто в світі на початку 2020-х років. Запропонована стаття присвячена деяким важливим питанням технології бездротового зв'язку 5G, яка використовується під час розроблення кіберфізичних систем, що активно розвиваються.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зараз для мобільного зв'язку, обслуговування соціальних мереж і веб-сайтів використовують технологію бездротового зв'язку четвертого покоління (4G), призначену для забезпечення високих швидкостей передачі даних і великої пропускної здатності мережі. До розгляду можливостей технології 5G зупинимося на історичному розвитку, перевагах та недоліках сучасної технології мобільного зв'язку 4G.

Таблиця 1. Порівняння характеристик поколінь технологій бездротового зв'язку

Технологія	1G	2G	3G	4G	5G
Розгортання	1970–1980	1990-2001	2001-2010	2011-2020	2021
Пропускна здатність	2 Кбіт/с	1,6 Мбіт/с	2 Мбіт/с	1 Гбіт/с	вище 1 Гбіт/с
Смуга частот	-	1,25 МГц	5 МГц	20 МГц	вище 20 МГц
Технологія	Аналоговий стільниковий, технологія FM-радіо	Цифровий стільниковий, технологія GSM	CDMA 2000 (1xRTT, EVDO) UMTS, EDGE	Wi-Max LTE Wi-Fi	WWW (скоро)

В системі 4G прийнято такі зведені вимоги IMT-Advanced [1]:

- пікова швидкість передачі даних для високої мобільності (до 360 км / г) 100 Мбіт / с, для стаціонарних або мобільних користувачів — 1 Гбіт / с;
- затримка в призначеній для користувача площині менше за 10 мс;
- смуга пропускання від 40 МГц до 100 МГц.

Для забезпечення переходу на новий рівень продуктивності систему стільникового зв'язку LTE (Long Term Evolution) було вдосконалено від рівня 3GPP (3G) до 4G (вище 4G) з версіями стандарту LTE Release від R-8 до R-13, останній з яких було прийнято у 2013 році.

Системи 4G були спочатку запропоновані двома технологіями-конкурентами, а саме: технологією глобальної сумісності для мікрохвильового доступу (WiMAX) та технологією довгострокового розвитку (LTE) [2], основаної на 3GPP, який став найпоширенішим стандартом для мобільних послуг 4G на сьогодні. Це дає можливість користувачам безперешкодно перемикатися між провайдерами бездротового зв'язку, використовуючи тепер дійсно глобальний стандарт LTE-A (IMT-Advanced 4G), прийнятий у 2010 році [3].

Зараз найпоширенішим засобом зв'язку для інтелектуальних мобільних пристроїв є стандарт IEEE 802.11, більш відомий за маркетинговим терміном як WiFi. Набір стандартів, що лежить в основі технології та визначений для бездротової локальної мережі (WLAN), дає змогу розділити протокол доступу до середовища і до специфікації фізичного рівня [4]. Залежно від фактичної реалізації, фізичний рівень ґрунтується на базових швидкостях в 1–2 Мбіт / с, смугах 2,4 ГГц та інфрачервоному LOS (поширення радіоліній прямої видимості). Завдяки розподілу на два рівня, визначення базових каналів може виконуватися окремо від реальних механізмів, що уможливорює вільне застосування різних промислових, наукових і медичних діапазонів (ISM) у всьому світі. Згодом з'явилися просунутіші версії від 802.11a до 802.11n і 802.11ac, які збільшують пропускну здатність за рахунок об'єднання каналів та робочих змін у смугах частот понад 300 і 400 Мбіт / с [5].

Термінали користувача у мережі 4G повинні мати можливість вибирати цільові бездротові системи. Базові станції періодично транслюють сигнальні повідомлення у наявні системи GSM для передплати на послуги мобільного зв'язку. Однак цей процес є складним у гетерогенних системах 4G через відмінності в бездротових технологіях та протоколах доступу. Для надання бездротових послуг у будь-який час і в будь-якому місці мобільність терміналу є обов'язковою умовою в інфраструктурі 4G. Мобільність дає змогу клієнтам переміщатися по географічних регіонах через кордони бездротових мереж. Існує дві основні проблеми мобільності терміналу: керування місцем розташування та керування передачею. За керування місцем розташування система відстежує та знаходить мобільний термінал для можливого підключення. Керування розташуванням включає в себе оброблення всієї інформації про роумінг терміналу, такої як оригінальні і поточні осередки, інформація про автентифікацію тощо. З іншого боку, керування передачею обслуговування підтримує постійний зв'язок, коли термінал переміщається. Мобільний IPv6 (MIPv6) — це стандартизований IP-протокол мобільності для бездротових систем IPv6. У цій схемі кожний термінал має домашню адресу IPv6. Кожний раз, коли термінал виходить за межі локальної мережі, домашня адреса стає недійсною і тер-

мінал отримує у поточній мережі нову службову IPv6-адресу. Крім схеми з широким доступом, вдосконалені методи передачі каналу з багатьма входами та виходами (MIMO) і значну координацію між декількома стільниковими вузлами, що має назву скоординованої багато точкової передачі/прийому (CoMP), було прийнято в якості ключових методів для LTE [6].

Мета статті — проаналізувати архітектурні особливості, методи комунікації та завдання, покладені в основу проектування технології 5G.

НОВІ МОБІЛЬНІ БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ — ОСНОВА ТЕХНОЛОГІЇ 5G

Мережі п'ятого покоління 5G можуть бути повноцінним бездротовим зв'язком без обмежень — World Wide Wireless Web (WWWW). На цей момент, 5G перестав бути терміном, який офіційно використовується для конкретної специфікації в офіційному документі, оприлюднюється телекомунікаційними компаніями або органами стандартизації. Кожна нова версія підвищує продуктивність системи і додає нові можливості з новими галузями застосування. IEEE 802.16 — це серія стандартів бездротового широкосмугового зв'язку, затверджених Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), яка отримала назву «WiMAX» (Всесвітня сумісність для мікрохвильового доступу) галузевого альянсу WiMAX Forum. IEEE 802.16 стандартизує радіоінтерфейс і пов'язані з ним функції бездротового локального зв'язку 5G [7].

Для досягнення проектних можливостей мобільної мережі було поставлено конкретні завдання, які визначаються як 10 ключових фундаментальних блоків для 5G [1]:

1. Еволюція багаторівневої технології багатоадресного доступу (RAT). 5G, швидше за все, буде набором RAT, що включає в себе еволюцію наявних технологій, доповнену новими революційними розробками. LTE повинен розвиватися, щоб використовувати розширене формування променя для подальшого поліпшення можливостей подолання перешкод у сценаріях розгортання з малою щільністю для малих осередків. WiFi [8] також повинен розвиватися, щоб краще використовувати доступний неліцензійний спектр для забезпечення широкосмугових бездротових каналів зі швидкостями передачі даних до декількох Гбіт / с, підтримуючи одночасну передачу до чотирьох потоків з використанням технології для багатьох користувачів MIMO [9]. Так, великі телекомунікаційні компанії, такі як Qualcomm, останнім часом працюють над розробленням LTE в неліцензованому спектрі та над інтеграцією приймачів 3G / 4G / WiFi у єдиний модуль багаторежимної базової станції (BS) [10].

2. Розгортання дуже малих осередків — ще одне слушне рішення, що дає змогу впоратися з обмеженням ємності, одночасно додаючи в систему значну енергоефективність. Це інноваційне рішення, що зветься HetNets (гетерогенні мережі мобільного інтернету), може допомогти значно підвищити спектральну ефективність зони. Воно включає два різні способи реалізації: «накладення стільникової системи на маленькі комірки з однаковою технологією, тобто на мікро-, піко- або фемтосоти; накладення з невеликими сотами різних технологій на відміну від стільникового (наприклад, високошвидкісний пакетний доступ (HSPA, LTE, WiFi і т.д.))» (див. [1], с. 7). Однак зменшення

розміру комірки збільшує міжсотові перешкоди та необхідну керувальну сигналізацію. Щоб подолати цей недолік, необхідно удосконалити методи керування міжсотовими перешкодами на системному рівні разом з додатковими методами подолання перешкод [11–13].

3. Самоорганізація мережі. Можливість мережі самоорганізовуватися (SON) є ще одним ключовим компонентом 5G. У міру того, як популяція маленьких клітин збільшується, SON отримує більшого імпульсу [14, 15]. «Майже 80% бездротового трафіку генерується в приміщенні. Щоб нести цей величезний трафік, потрібні занадто щільні розгортання невеликих осередків в будинках, які встановлюються і обслуговуються в основному користувачами, поза контролем операторів. Ці маленькі внутрішні осередки повинні бути самоналагоджувальними та встановлюватися у режимі «підключи і працюй». Крім того, вони повинні мати можливість SON інтелектуально налаштовуватися до сусідніх малих стільників, щоб мінімізувати міжсотові перешкоди. Наприклад, невеликий осередок може зробити це шляхом автономної синхронізації з мережею та розумним налаштуванням радіопокриття» (див. [1], с. 8).

4. Зв'язок між пристроями різних типів. Зв'язок МТС (поліпшений сеанс зв'язку з під'єднанням одного або двох кінцевих користувачів) є ще одним фундаментальним аспектом 5G, який ставить дві основні проблеми в мережі. По-перше, кількість пристроїв, які необхідно підключити, надзвичайно велика. Інша проблема — це зростання попиту у реальному часі та дистанційне керування мобільними пристроями (наприклад, транспортними засобами) за допомоги мережі. Для цього потрібно мати надзвичайно низьку затримку, яка не перевищує мілісекунди, та так званий «тактильний Інтернет» [16–18], який вимагає 20-разового покращення затримки від 4G до 5G.

5. Розроблення міліметрових хвиль RAT. «Традиційний спектр на частоті менше за 3 ГГц стає все перевантаженішим, це призводить до наближення розроблених RAT до межі пропускну здатності Шеннона. Проводять масштабні дослідження з використанням діапазонів cmWave та mmWave для мобільного зв'язку. Є три основні перешкоди для мобільного зв'язку mmWave. По-перше, втрати в тракці відносно вищі в цих смугах порівняно зі звичайними смугами частот, які є нижчими за 3 ГГц. По-друге, електромагнітні хвилі мають тенденцію поширюватися у напрямку прямої видимості (LOS), що робить радіолінії уразливими для блокування рухомими об'єктами або людьми. Нарешті, втрати проникнення через будівлі в цих діапазонах істотно вище, блокуючи зовнішні RAT для внутрішніх користувачів» (див. [1], с. 8). Крім того, передачі в міліметровому діапазоні можуть зазнавати значного ослаблення також через сильний дощ, оскільки краплі дощу мають приблизно такий саме розмір, що і довжина радіохвиль (міліметри), тому вони можуть викликати розсіювання. Незважаючи на ці обмеження, є безліч переваг для зв'язку mmWave. Планується виділення доступного неліцензованого спектру 9 ГГц у смузі mmWave 60 ГГц, що може повністю змінити мобільний зв'язок, надаючи надширокі смугові бездротові канали, які можуть безперешкодно сполучати дротові та бездротові мережі. Інші переваги зв'язку mmWave — це малі розміри антен та їхня мала відстань, що дає можливість об'єднувати десятки антенних елементів всього на одному квадратному сантиметрі. Це, в свою чергу, дає змогу досягати дуже високих коефіцієнтів посилення формування проме-

ню у відносно невеликих областях. Використовуючи інтелектуальні фазовані антенні решітки, можна повною мірою використовувати просторову ступінь свободи бездротового каналу (застосовуючи розширений доступ з просторовим розділенням каналів (SDMA)), що може ще більше підвищити пропускну здатність системи [19–20].

6. Модернізація транзитних посилань [21] «є наступною критичною проблемою мобільного зв'язку 5G. Паралельно з поліпшенням RAN необхідно також модернізувати транзитні з'єднання для перенесення величезного обсягу призначеного для користувача трафіку, що генерується в комірках. В іншому випадку, транзитні з'єднання стануть вузьким місцем, погрожуючи правильній роботі всієї системи. Проблема посилюється відповідно до збільшення популяції дрібних комірок. Зокрема, двоточкові лінії зв'язку mmWave, які використовують антенні решітки з дуже гострими променями, можуть розглядатися для надійної самостійної зворотної передачі без втручання в інші стільники або в лінії доступу» (див. [1], с. 9).

7. Енергоефективність залишається важливою проблемою проектування під час розроблення системи 5G. За даними на 2012 рік, «інформаційні та комунікаційні технології споживають до 5% електроенергії, виробленої у всьому світі, і забезпечують приблизно 2% глобальних викидів парникових газів, що еквівалентно викидам, які створює вся авіаційна промисловість» (див. [1], с. 9). Отже, необхідно використовувати енергоефективні підходи до проектування RAN і транзитних з'єднань, які призначені для обладнання користувача [22]. Особливо важливо враховувати, що підвищення енергоефективності надає можливість продовжити термін використання батареї як один з найголовніших критеріїв для більшості споживачів, які купують мобільний телефон.

8. Розподіл нового спектра є ще однією важливою проблемою 5G для забезпечення бездротового зв'язку. Стрімке збільшення потоку та трафіку навряд чи можна контролювати, підвищуючи тільки спектральну ефективність або щільність. Крім технологічних інновацій, для задоволення попиту потрібно збільшити ширину спектру [23], наприклад, шляхом «розподілу смуги близько 100 МГц у смузі 700 МГц, смуги 400 МГц на частоті близько 3,6 ГГц, смуги завширшки кілька ГГц у см- або мм-смугах частот» (див. [1], с. 10).

9. Спільне використання спектру. «Процес регулювання розподілу нового спектру часто займає дуже багато часу, тому ефективне використання доступного спектру завжди має вирішальне значення. Великий діапазон радіоспектру традиційно виділяється для військових радарів, де спектр використовується постійно не повністю або не у всьому географічному регіоні» (див. [1], с. 10). Фірма Qualcomm запропонувала модель авторизованого / ліцензійного спільного доступу до використання спектру в невеликих сотах (з обмеженим покриттям) без втручання користувача, що може компенсувати дуже повільний процес очищення спектра. Для спільного використання ліцензійних та неліцензійних спектрів може бути використано концепції когнітивного радіо (Cognitive Radio) або інші моделі [24].

10. Віртуалізація RAN є не менш важливим фактором 5G, який уможливорює спільне використання бездротової інфраструктури між декількома операторами. Для мережі віртуалізації, інтелект повинен бути витягнутий з обладнання RAN і централізовано налаштовуватися з використанням програ-

много забезпечення, що може бути зроблено на різних рівнях» (див. [1], с. 10). Це може надати багато переваг бездротовому зв'язку за рахунок: спільного використання мережі; поліпшеної енергоефективності та простоти обслуговування обладнання; керування необхідними ресурсами на вимогу; скорочення часу виходу на ринок інноваційних послуг; швидкого усунення пошкоджень завдяки підвищеній прозорості мережі [25]. «Можуть бути використані багаторежимні RAN, що підтримують 3G, 4G або WiFi, в яких різні радіоінтерфейси можуть вмикатися/вимикатися для кінцевих користувачів за допомоги центрального програмного блоку керування» (див. [1], с. 11).

АРХІТЕКТУРА ТА ІНТЕРНЕТ 5G

Передбачається, що з 5G будуть легко інтегруватися наявні RAT (GSM, HSPA, LTE і WiFi) та нові, винайдені для смуг mmWave. Технологія mmWave зробить революцію у мобільній індустрії не тільки завдяки великому обсягу доступного спектру в цій смузі (що уможливило використання бездротових каналів Gbps), але також завдяки зменшенню розмірів антен, що дає змогу виготовляти антенні решітки з сотнями або тисячами антенних елементів. Інтелектуальні антени з формуванням променя та можливістю фазированої решітки будуть використовуватися для направлення променя антени у потрібне місце з високою точністю, повернутого електронним способом за допомоги зсуву фази. Технологія mmWave забезпечить надширокі смугові транзитні з'єднання для передачі трафіку до малих базових або ретрансляційних станцій, забезпечуючи додаткову гнучкість розгортання для операторів порівняно з провідною (мідною або оптоволоконною) транзитною лінією. Поряд з розробленням нових RAT і розгортанням дуже щільних невеликих осередків, наявні RAT будуть продовжувати розвиватися, щоб забезпечити вищу енергоефективність. Отже, технологія mmWave, дуже щільна мережа HetNet, віртуалізація RAN і масивний MTC — все це є головними напрямками, які розглядають для модернізації стільникової системи для досягнення можливостей 5G [26].

Передбачається, що пристрої користувача 5G будуть багаторежимними інтелектуальними пристроями. Вони будуть досить розумними, щоб автономно вибирати правильний інтерфейс для підключення до мережі на основі якості каналу, заряду батареї, енергоефективності різних RAN і вимог до якості обслуговування у програмному забезпеченні. Ці розумні й ефективні 5G пристрої зможуть підтримувати 3D-мультимедіа зі швидкістю до 10 Гбіт / с.

Хмарне обчислення потенційно може бути застосовано до RAN та мобільних користувачів, які можуть формувати віртуальний пул ресурсів для керування мережею. Перенесення застосунків через хмару ближче до кінцевого користувача знижує затримку зв'язку під час керування в реальному часі. Сучасна концепція хмарної мережі в основному включає центри оброблення даних. Віртуалізація мобільних мереж підштовхне цю концепцію до транзитного з'єднання і RAN, щоб уможливити спільне використання транзитних з'єднань та базових станцій між різними операторами.

Сучасний Інтернет надає багату палітру послуг [18], що включає: мультимедійні розваги (аудіо, відео та онлайн-ігри високої чіткості), персоналізацію (застосунки, які за присутністю забезпечують визначення свого місцезнаходження), соціальні системи (форуми, контакти, Facebook, Messenger), вкрай

важливі програми (електронна комерція, електронна охорона здоров'я, громадська безпека). Майже кожний фізичний об'єкт, який ми бачимо (одяг, автомобілі, поїзди тощо), буде підключено до мобільної системи, створивши Інтернет речей (IoT) [27]. Усі види послуг і застосунки, від низької пропускної здатності (дані датчиків та IoT) до вищої (потоківідео високої чіткості), повинні бути сумісні для підтримки різних затримок і пристроїв. Наприклад, інтерактивне відео, потоки відеоконференцій, застосунки VoIP (Voice over IP — голосовий зв'язок за Інтернет протоколом) вимагають не більше за 150 мс затримки, 30 мс тремтіння і не більше за 1% втрати пакетів, щоб підтримувати оптимальну якість сприйняття користувачем.

Стає зрозумілим, що в мережах зв'язку настає переломний момент з поступовим впровадженням програмно визначеної мережі (SDN) та віртуалізації мережевих функцій для забезпечення необхідної гнучкості та реактивності. Так, SDN пропонує відокремити площину керування мережею від площини даних (наприклад, у хмарі), а віртуалізація мережі дає можливість створювати безліч різних функцій логічної мережі над однією загальною фізичною інфраструктурою.

Ці підходи надали змогу скоротити розрив між фізичним та цифровим світом і уможливили інтегрування пристроїв у великомасштабні платформи, що складають Smart City, Smart Agricole та багато інших сценаріїв. У них інформацію, яку отримують від різних типів давачів (наприклад, температура, вологість, забруднення, відео), об'єднано з алгоритмами керування для вироблення автоматичних рішень виконавчих пристроїв (наприклад, зміна світлофорів для зменшення забруднення CO₂ в перенаселених районах в Smart Traffic, оптимізація споживання води в сценаріях Smart Utilities або автоматизація поливу сільськогосподарських культур в сценаріях «Розумне землеробство»).

Зазначені аспекти зумовлено зростанням залежності від хмарних обчислень, коли різні моделі, такі як програмне забезпечення як послуга (SaaS), платформа як послуга (PaaS), інфраструктура як послуга (IaaS), мережеві операції і послуги, віртуально розміщують в Інтернеті [28]. Зокрема, SaaS є модель хмарного сервісу для доставки програмного забезпечення, де програмне забезпечення і відповідні дані розміщуються в хмарі, а доступ може бути виконано за допомогою простої навігації у браузері. Крім того, модель PaaS дає можливість надавати послуги нищого рівня, такі як операційна система, веб-сервер або інтерпретатор комп'ютерної мови. Наприклад, використовуючи PaaS, програмісти можуть розробляти власні програми, не встановлюючи важке програмне забезпечення на власних комп'ютерах. Крім того, модель IaaS надає мережеві інфраструктури, включаючи сервери в центрах оброблення даних (DC), які клієнти можуть використовувати в хмарах на платній основі (наприклад, Elastic Compute Cloud від Amazon). Отже, оскільки віртуалізація дає змогу емулювати комп'ютерне апаратне забезпечення, то кілька таких віртуальних комп'ютерів можуть одночасно працювати на одному фізичному комп'ютері, всю інфраструктуру і мережевий транспорт буде ефективно надано в якості служби з різними сценаріями, починаючи від мережі підприємства до поліпшення всього керування інтернет-провайдером. Це долає наявні бар'єри для збільшення пропускної здатності сервісів. Замість того, щоб вимагати від провайдера фізичного розширення ресурсів, треба покладатися на загальний віртуалізований розподілений пул ресурсів мережі, оброблення та зберігання даних.

Забезпеченість співпраці і тенденція до контекстно-орієнтованих мереж відкрили нові можливості в сфері хмарних сервісів, що виходять за рамки D2D («від пристрою до пристрою»), це так звані комунікації «пристрій-хмара» [1]. Фактично, пропозиція загальних ресурсів безлічі клієнтів стала реальністю ще на початку 1990-х років. Згодом, з розширенням мережевих клієнт-серверних комунікацій ця парадигма перетворилася у термін «хмара». В останнє десятиліття цей підхід також називався AAS, або «сервісом», в результаті чого одним з найбільш поширених явищ було використання SAAS (Software As A Service). Сприйняття мобільних пристроїв змістилося з орієнтованого на користувача мультимедійного засобу зв'язку на просто «ресурс», який може запропонувати безліч послуг з точки зору обчислювальної потужності, зберігання і контексту. Тому, якщо цей ресурс може стати частиною хмари і сформувати пул віртуальних ресурсів, то це може зіграти провідну роль як технологічна і сервісна платформи для 5G і вище. Наприклад, в сценарії хмарних обчислень окремі вузли оброблення забезпечують обчислювальну потужність для пулу ресурсів хмари, який, в свою чергу, є доступним споживачеві послуг. Однак розташування вузлів, які підтримують програму, або їхні фізичні реалізації не мають значення для споживача, оскільки важливим є тільки доступ до пулу загальних ресурсів хмари. Це дає змогу постачальнику послуг оптимізувати місце розміщення, конфігурацію і планування доступності ресурсів [29].

Віртуальний хмарний пул, включаючи мобільні пристрої, уможливорює надання додаткових ресурсів, які є доступними тільки в мобільному контексті, таких як бездротовий зв'язок, виконавчі механізми та інші різні функції. Включення самих мобільних пристроїв в пули ресурсів різних потужностей хмарних сервісів забезпечує більшу гнучкість.

Загальноприйнятим для більшості сучасних сценаріїв є те, що окремі вузли обмінюються даними з використанням бездротових ліній ближньої дії крім підключення до каналу далекого зв'язку, наприклад, стільникових мереж або мереж точок доступу. Отже, компроміс між передачею на великі і на короткі відстані є звичайним явищем. Бездротові глобальні мережі зазвичай є стільниковими мережами. Крім того, є можливими інші типи з'єднання: прямі двоточкові або двоточкові бездротові з'єднання, які основано на мікрохвильовому або оптичному зв'язку з використанням технологій прямої видимості (LOS).

НОВІ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗДРОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ 5G

За останні 5 років технології мобільного зв'язку 5G зробили неймовірний стрибок у своєму розвитку, особливо в бік підтримки робототехніки промислового виробництва. Інтернет речей (IoT), раніше розглянутий як окремий об'єкт досліджень, став частиною вивчення кіберфізичних систем (CPS).

Кіберфізична система (Cyber Physical Systems — CPS) складається з набору пристроїв, які взаємодіють один з одним та з фізичним світом [30]. CPS об'єднує обчислювальні і комунікаційні аспекти разом з методами контролю і моніторингу. Основною метою CPS є керування фізичним процесом за допомоги зворотного зв'язку і адаптація до нових умов в реальному часі. Різні програми CPS можна знайти практично у всіх сферах людського життя, таких як виробничі системи, інтелектуальні мережі, робототе-

хніка, транспортні системи, медичні пристрої, військові, домашні мережі, інтелектуальні будівлі тощо. Прикладом кіберфізичної системи є розумна фабрика, в якій механічні системи, роботи, сировина і продукти між собою взаємодіють. Ця взаємодія надає можливість машинному інтелекту здійснювати моніторинг і контроль операцій на всіх рівнях підприємства.

CPS містить мережу зв'язку, людино-машинні інтерфейси і механічні, електричні та електронні гетерогенні елементи, які керують програмним забезпеченням. Це складне завдання — зрозуміти взаємодію фізичного, кібернетичного і людського світів. Системні моделі будуть визначати еволюцію кожного стану системи у часі. Всеосяжна модель буде необхідна для інтеграції відповідних системних моделей під час розгляду всіх можливих динамічних взаємодій. Вона є керувальною програмою, яка забезпечує детерміновану поведінку для кожної підсистеми. Поточні інструменти проектування необхідно постійно оновлювати, щоб врахувати взаємодію між різними системами, їхніми інтерфейсами та абстракціями.

Починаючи з 2011 р., Німеччина впроваджує свою програму «Industry 4.0», яка активно використовує в промисловості інтелектуальні роботи, адаптивне виробництво і системи самонавчання [31]. В рамках цієї ініціативи було розроблено багато принципово нових концепцій, які привели до квантового стрибку в мережі людей, машин, роботів та продуктів. Лідери виробництва об'єднують інформаційні технології та операційні технології для створення цінності абсолютно новими способами. Кіберфізичні виробничі лінії є найпередовішими сьогодні, але будуть стандартом завтрашнього дня. Комбінація бездротових давачів і високопродуктивних мереж зв'язку, таких як 5G, грає ключову роль у цьому процесі, забезпечуючи збір даних з рівня цеху (виробничі лінії) і передачу даних в хмарні системи для безперервного моніторингу та контролю. Водночас, обчислення в кіберфізичній системі виконуються в потужному, інтелектуальному та розподіленому обчислювальному середовищі, яке називають платформою Industrial Cloud, що вбудована в мережу і живиться даними. Цифрування заводських операцій, що забезпечується технологіями CPS, дає можливість цьому сприяти. Цифрові інструменти зможуть контролювати всі процеси виробництва, збираючи дані з тисячі давачів, щоб створити цифрове зображення реалізованого товару, яке зазвичай називають «цифровою тінню».

ВИСНОВКИ

Високоякісний бездротовий зв'язок має важливе значення для концепції сучасного цифрового підприємства. Дротяний зв'язок зі складними кабелями був би неможливий в цьому постійно мінливому оточенні через те, що модернізація кабелю тягне за собою високі експлуатаційні витрати. Бездротовий зв'язок поєднає всі фізичні елементи виробничого підприємства з машинними (обчислювальними) елементами, спроможними збирати та обробляти величезні обсяги даних з хмарою, яка відповідає за ці операції. Можливість підключення безлічі зовнішніх пристроїв з використанням LTE-з'єднань в умовах електромагнітних перешкод та за суворих вимог до затримок виконання технологічних процесів дає змогу стверджувати, що технологія бездротового зв'язку 5G є необхідною та незамінною в дослідженнях і виробництві.

Розгортання мереж 5G, бізнес моделі операторів і конкретні сценарії все ще знаходяться на ранній стадії розроблення навіть на передових споживчих ринках. Зауважимо, що технологія 5G не тільки надає нові можливості операторам, але й забезпечує значне розширення спектру послуг для користувачів.

Багато країн усвідомили стратегічну важливість бездротового зв'язку 5G і розробили національні плани його розвитку, щоб допомогти своєчасному розгортанню нових мереж 5G, а також, щоб стимулювати появу нових послуг. Водночас, особлива увага приділяється орієнтації на конкретні потреби місцевого ринку. Подібні ініціативи можуть включати створення комітетів на високому рівні з метою прийняття нормативної бази і спонсування національних випробувальних майданчиків для тестування 5G.

На всій території України впроваджується технологія мобільного бездротового зв'язку 4G. Розгортання технології 5G є питанням недалекого майбутнього, воно знаходиться на стадії тестування та розроблення [33].

Планується кілька етапів впровадження мереж 5-го покоління: спочатку запрацює бездротовий зв'язок 5G NR Non stand-alone, який буде використовувати вже наявну мережу 4G LTE eNB; потім технологія зв'язку 5G отримає власні частоти для збільшення пропускної спроможності та швидкості передачі інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rodriguez J. (Ed.) *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Wiley, 2015. 333 p. ISBN: 1118867521, 9781118867525.
2. Pankaj Sharma. Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network. *IJCSMC*. 2013. Vol. 2. no 8. P. 47–53. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/8e32/078c7b0848c5e8c573861878cde417e89e.pdf>
3. Liu L., Chen R., Geirhofer S. Downlink MIMO in LTE-Advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO. *IEEE Communications Magazine*. 2012. № 50(2) P. 140–147.
4. Jordan R. and Abdallah C.T. Wireless Communications and Networking: An Overview *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2002. Vol. 44. no. 1. 185–193.
5. IEEE, “Approved Draft Standard for IT – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – LAN/MAN – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications – Amd 4: Enhancements for Very High Throughput for operation in bands below 6GHz”. 2013. P. 1–456.
6. Palaskas Y., Ravi A. and Pellerano S. ‘MIMO Techniques for High Data Rate Radio Communications’, *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, 2008. CICC 2008.
7. Hu Fei. Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective. CRC Press, 2016. 561 p. ISBN-10: 1498739547. ISBN-13: 978-1498739542. URL: https://www.broadcom.com/docs/press/80211ac_for_Enterprise.pdf
8. *Broadcom*. World’s First 5G WiFi 802.11ac SoC. 2012. URL: https://www.broadcom.com/docs/press/80211ac_for_Enterprise.pdf
9. Wallace J.W. and Jensen M.A. Mutual Coupling in MIMO Wireless Systems: A Rigorous Network Theory Analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2004. Vol. 3. no. 4. P. 1317–1325.
10. *Qualcomm* (2013a) 1000x: More Spectrum – Especially for Small Cells. URL: <https://www.qualcomm.com/documents/1000x-more-spectrum-especially-small-cells>
11. Yavuz M., Meshkati F., Nanda S. Interference Management and Performance Analysis of UMTS/HSPA+ Femtocells. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 6. no. 9.
12. Tudzarov A., Janevski T. Functional Architecture for 5G Mobile Networks. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2011. № 3(2): P. 65–78.

13. Zahir T., Arshad K., Nakata A. and Moessner K. Interference Management in Femto-cells. *Communications Surveys & Tutorials*. 2013. Vol. 15. no. 1. P. 293–311.
14. 3GPP, ‘Telecommunication Management; Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements’, TS 32.500 (Release 11), 2011.
15. Feng S. and Seidel E. Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution. *NOMOR whitepaper*, May 2010.
16. METIS . 2012. Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Two Information Society 5G. FP7 ICT project. URL: <https://www.metis2020.com>
17. Fettweis G. and Alamouti S. 5G: Personal Mobile Internet beyond What Cellular Did to Telephony. *IEEE Communications Magazine* 2014. № 52(2). P. 140–145.
18. Xiang Wei, Zheng Kan et al. (Eds.) 5G Mobile Communications. Springer, 2016. 690 p. ISBN 10 3319342061. ISBN 13 978-978-3319342061.
19. Rajagopal, S., Abu-Surra, S., Pi, Z. and Khan, F. Antenna Array Design for Multi-Gbps mmWave Mobile Broadband Communication. *Samsung, IEEE Globecom*. 2011.
20. Rusek F., Persson D., Lau B.K. Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2013. Vol. 30 no. 1. P. 40–60.
21. Bizaki H.K. (Ed.) Towards 5G Wireless Networks: A Physical Layer Perspective. *ExLi4EvA*, 2016. 235 p. ISBN: 9535128345.
22. Pirmoradian M., Adigun O. and Politis C. Adaptive Power Control Scheme for Energy Efficient Cognitive Radio Networks IEEE ICC 2012 Workshop on Cognitive Radio and Cooperation for Green Networking (10–15th of June 2012, Ottawa, Canada). Ottawa, 2012.
23. ITU, ‘GSR 2012: Spectrum Policy in a Hyper-connected Digital Mobile World’, 2012. URL: <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/toolkit/docs/Document/4030>
24. Gur G. and Alagoz F. Green Wireless Communications via Cognitive Dimension: An Overview. *Network, IEEE*. Vol. 25. no. 2. P. 50–56, March–April 2011.
25. Chowdhury N. M. K. and Boutaba R. Network Virtualization: State of the Art and Research Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2009. № 47(7). P. 20–26.
26. Osseiran A., Monserrat J.F., Marsch P., Dohler M., Nakamura T. (ed.) 5G Mobile and Wireless Communications Technology. Cambridge University Press, 2016. 410 p. ISBN 978-1107130098.
27. Mavromoustakis C., Matorakis G., Batalla J. (edit.) Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies. Springer, 2016. 499 p. ISBN 978-3319309118.
28. Gold N., Mohan A., Knight C. and Munro M. Understanding Service-Oriented Software *IEEE Software*. 2004. Vol. 21. no. 2. P. 71–77.
29. Fitzek F.H.P. and Katz M. Mobile Clouds: Exploiting Distributed Resources in Wireless, Mobile and Social Networks, Hoboken, NJ, 2014. ISBN: 978-0-470-97389-9.
30. Platzer A. Logical Foundations of Cyber-Physical Systems. *Springer*, Cham, 2018. 659 p. ISBN 978-3-319-63587-3.
31. Sabella R., Thuelig A, Carrozza M.C., Ippolito M. Industrial automation enabled by robotics, machine intelligence and 5G. 2018. URL: <https://www.ericsson.com/en/ericsson-technology-review/archive/2018/industrial-automation-enabled-by-robotics-machine-intelligence-and-5g>
32. Перри Ли. Архитектура интернета вещей. *ДМК-Пресс*, 2019. 456 с. ISBN 978-5-97060-672-8.
33. Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Дика Н.В. Дослідження вимог до стільникових мереж нового покоління та можливості їх розгортання в Україні. *Проблеми інформатизації та управління*. 2016. № 2(54). С. 52–59.

Отримано 03.07.2019

REFERENCES

1. Rodriguez J. (Ed.) *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Wiley, 2015.
2. Pankaj Sharma. Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network. *IJCSMC*. 2013. Vol. 2, no 8. pp. 47–53.
3. Liu L., Chen R., Geirhofer S. Downlink MIMO in LTE-Advanced: SU-MIMO vs. MU-MIMO. *IEEE Communications Magazine*. 2012. № 50(2). pp. 140–147.

4. Jordan R. and Abdallah C.T. Wireless Communications and Networking: An Overview. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2002. Vol. 44. no 1. pp.185–193.
5. Approved Draft Standard for IT – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – LAN/MAN – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications – Amd 4: Enhancements for Very High Throughput for operation in bands below 6GHz?. 2013. pp. 1–456.
6. Palaskas Y., Ravi A. and Pellerano S. MIMO Techniques for High Data Rate Radio Communications, *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, 2008. CICC 2008.
7. Hu Fei. Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective. CRC Press, 2016.
8. World's First 5G WiFi 802.11ac SoC. 2012. URL: https://www.broadcom.com/docs/press/80211ac_for_Enterprise.pdf
9. Wallace J.W. and Jensen M.A. Mutual Coupling in MIMO Wireless Systems: A Rigorous Network Theory Analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2004. Vol. 3. no 4. pp. 1317–1325.
10. More Spectrum – Especially for Small Cells. URL: <https://www.qualcomm.com/documents/1000x-more-spectrum-especially-small-cells>
11. Yavuz M., Meshkati F., Nanda S. Interference Management and Performance Analysis of UMTS/HSPA+ Femtocells. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 6, no 9.
12. Tudzarov A., Janevski T. Functional Architecture for 5G Mobile Networks. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2011, no 3(2), pp. 65–78.
13. Zahir T., Arshad K., Nakata A. and Moessner K. Interference Management in Femtocells. *Communications Surveys & Tutorials*. 2013. Vol. 15. no 1. pp. 293–311.
14. Telecommunication Management; Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements, TS 32.500 (Release 11), 2011.
15. Feng S. and Seidel E. Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution. *NOMOR whitepaper*, May 2010.
16. Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Two Information Society 5G. FP7 ICT project. URL: <https://www.metis2020.com>
17. Fettweis G. and Alamouti S. 5G: Personal Mobile Internet beyond What Cellular Did to Telephony. *IEEE Communications Magazine*. 2014, no 52(2), pp. 140–145.
18. Xiang Wei, Zheng Kan et al. (Eds.) *5G Mobile Communications*. Springer, 2016. 690 p.
19. Rajagopal, S., Abu-Surra, S., Pi, Z. and Khan, F. Antenna Array Design for Multi-Gbps mmWave Mobile Broadband Communication. Samsung, *IEEE Globecom*. 2011.
20. Rusek F., Persson D., Lau B.K. Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2013. Vol. 30, no 1, pp. 40–60.
21. Bizaki H.K. (Ed.) *Towards 5G Wireless Networks: A Physical Layer Perspective*. ExLi4EvA, 2016.
22. Pirmoradian M., Adigun O. and Politis C. Adaptive Power Control Scheme for Energy Efficient Cognitive Radio Networks. IEEE ICC 2012 Workshop on Cognitive Radio and Cooperation for Green Networking (10–15th of June 2012, Ottawa, Canada). Ottawa, 2012.
23. GSR 2012: Spectrum Policy in a Hyper-connected Digital Mobile World, 2012. URL: <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/toolkit/docs/Document/4030>
24. Gur G. and Alagoz F. Green Wireless Communications via Cognitive Dimension: An Overview. *Network, IEEE*. Vol. 25, no. 2, pp. 50–56, March–April 2011.
25. Chowdhury N. M. K. and Boutaba R. Network Virtualization: State of the Art and Research Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2009, no 47(7), pp. 20–26.
26. Osseiran A., Monserrat J.F., Marsch P., Dohler M., Nakamura T. (ed.) *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. Cambridge University Press, 2016.
27. Mavromoustakis C., Mastorakis G., Batalla J. (edit.) *Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies*. Springer, 2016.
28. Gold N., Mohan A., Knight C. and Munro M. Understanding Service-Oriented Software. *IEEE Software*. 2004. Vol. 21, no. 2, pp. 71–77.

29. Fitzek F.H.P. and Katz M. *Mobile Clouds: Exploiting Distributed Resources in Wireless, Mobile and Social Networks*. NJ: Hoboken, 2014.
30. Platzer A. *Logical Foundations of Cyber-Physical Systems*. Springer, Cham, 2018. 659 p.
31. Sabella R., Thuelig A., Carrozza M.C., Ippolito M. Industrial automation enabled by robotics, machine intelligence and 5G. 2018. URL: <https://www.ericsson.com/en/ericsson-technology-review/archive/2018/industrial-automation-enabled-by-robotics-machine-intelligence-and-5g>
32. Perry Lee. *The architecture of the Internet of things*. DMK-Press, 2019 . (in Russian).
33. Odarchenko R.S., Abakumova A.O., Dyka N.V. Doslidzhennya vymoh do stilnykovykh merezh novoho pokolinnya ta mozhlyvosti yikh rozhortannya v Ukraini. *Problems of Informatization and Management*. 2016. Vol. 2(54), pp. 52–59. (in Ukrainian).

Received 03.07.2019

Гриценко В.И., член-корреспондент НАН Украины,
директор Международного научно-учебного центра
информационных технологий и систем
НАН Украины и МОН Украины
e-mail: vig@irtc.org.ua
Суровцев И.В., д-р. техн. наук, старш. науч. сотр.,
зав. отд. экологических цифровых систем
e-mail: dep175@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com
Бабак О.В., канд. техн. наук, старш. науч. сотр.,
старш. науч. сотр. отд. экологических цифровых систем
e-mail: dep175@irtc.org.ua
Международный научно-учебный центр
информационных технологий и систем
НАН Украины и МОН Украины,
пр. Акад. Глушкова 40, г. Киев, 03187, Украина

СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ 5G

Введение. Высокоскоростная мобильная система связи 5G активно развивается во многих странах мира. Важно понимать научные и технические предпосылки беспроводной технологии 5G, чтобы эффективно использовать их в новых интеллектуальных информационных технологиях.

Цель статьи — проанализировать архитектурные особенности, методы коммуникации и задачи, положенные в основу проектирования технологии 5G.

Результаты. Показано, какие конкретные технические и технологические проблемы должны быть решены для достижения широких возможностей мобильной связи 5G. Вскоре технология 5G будет стандартизирована и внедрена во всем мире, включая Украину. Возможность подключения множества внешних устройств в условиях электромагнитных помех с помощью LTE-соединений в случае распределения на большой площади и при суровых требованиях к задержкам технологических процессов позволяет утверждать, что беспроводная технология 5G является необходимой и незаменимой в исследованиях и производстве

Выводы. Беспроводные технологии 5G и облачные вычисления являются необходимыми условиями для создания скоростной мобильной связи, киберфизических систем и предоставления широкого спектра услуг потребителям.

Ключевые слова: технология 5G, мобильная связь, архитектура связи 5G, Интернет, киберфизические системы.

Gritsenko V.I., Corresponding Member of NAS of Ukraine,
Director of International Research and Training
Center for Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine
e-mail: vig@irtc.org.ua

Surovtsev I.V., DSc (Engineering),
Head of the Ecological Digital Systems Department
e-mail: dep175@irtc.org.ua, igorsur52@gmail.com

Babak O.V., PhD (Engineering), Senior Researcher
of the Ecological Digital Systems Department
e-mail: dep175@irtc.org.ua

International Research and Training Center for Information
Technologies and Systems of the National Academy
of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine,
40, Acad. Glushkov av., 03187, Kyiv, Ukraine

5G WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM

Introduction. The 5G high-speed mobile communication system is actively developing in many countries around the world. It is important to understand the scientific and technical prerequisites of 5G wireless technology in order to effectively utilize them in the new intelligent information technology.

The purpose of the paper is to describe in an accessible way the architectural features, communication methods, the Internet and the tasks that underlie 5G.

Results. It is shown that specific technical and technological problems have to be solved in order to reach the wide possibilities of 5G mobile communication. At the same time, 5G technology will soon be standardized and implemented around the world, including Ukraine. The ability to connect many external devices in conditions of electromagnetic interference using LTE connections in the case of distribution over a large area and with strict requirements for process delays makes it possible to state that 5G wireless technology is necessary and indispensable in research and production.

Conclusions. Wireless technology 5G and cloud computing are prerequisites for creating high-speed mobile communications, cyber-physical systems and providing a wide range of services to consumers.

Keywords: *technology 5G, mobile communication, communication architecture 5G, Internet, cyberphysical systems.*