

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-30>

УДК 621.396.4

СТЕПАНОВ Михайло

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-6376-4268>

e-mail: 2m.stepanov@gmail.com

ЛАВРІНЕНКО Владислав

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0008-4914-5805>

e-mail: Lavrinenko_@ukr.net

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ЗВ'ЯЗКУ ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Дана стаття зосереджена на актуальності та перспективах мереж п'ятого покоління, яка стає особливо важливою в контексті зростаючої кількості мобільних пристроїв і пристроїв для міжмашинної взаємодії. Головною метою цієї статті є розгляд можливих сценаріїв використання технології 5G NR та варіантів розгортання архітектури, їх переваг та недоліків.

Основний акцент також приділяється опису мережі бездротового доступу в мережах п'ятого покоління, зокрема радіо-інтерфейсу, його архітектурі та ключовим компонентам. Висновки цієї статті базуються на матеріалах, які підкреслюють гнучкість та функціональність мереж 5G в залежності від їх мети та місця розгортання.

Стаття підкреслює, що мережі п'ятого покоління можуть бути використані для різних проектів та сценаріїв розгортання, з різною початковою конфігурацією, забезпечуючи надійний та швидкісний зв'язок для мережевих елементів, мобільних пристроїв та інших пристроїв. Технології 5G відкривають широкий спектр можливостей для операторів, промисловості та муніципальних служб, що відбувається завдяки різноманітності та характеристикам діапазонів в мережах 5G, таким як високочастотні діапазони, які забезпечують високу пропускну здатність, і технології, наприклад, масовий MU-MIMO, які покращують користувацький досвід.

Такі передові технології дозволяють розвивати автоматизацію виробництва, розумні міста, галузь охорони здоров'я та інші галузі, створюючи нові джерела доходу, поліпшуючи користувацький досвід та спонукаючи до наукового та технологічного прогресу. У підсумку, мережі п'ятого покоління є ключовим компонентом сучасного світу, який допомагає вирішувати різні завдання та сприяє розвитку суспільства в цифрову епоху.

Ключові слова: 5G NR, eMBB, mMTC, URLLC, NSA, SA.

STEPANOV Mikhailo, LAVRINENKO Vladyslav

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

AN OVERVIEW OF DEPLOYMENT AND APPLICATION OPTIONS FOR 5G NR TECHNOLOGY-BASED NETWORKS

This paper is focused on the relevance and prospects of fifth-generation networks (5G), which becomes particularly important in the context of the increasing number of mobile devices and devices for machine-to-machine interaction. The main goal of this article is to explore possible scenarios for the use of 5G NR technology and deployment options, highlighting their advantages and disadvantages.

The primary emphasis is also placed on describing wireless access networks within fifth-generation networks, including the radio interface, its architecture, and key components. The conclusions of this article are based on materials that underscore the flexibility and functionality of 5G networks depending on their purpose and deployment location.

The article highlights that 5G networks can be used for various projects and deployment scenarios, each with different initial configurations, providing reliable and high-speed communication for network elements, mobile devices, and other equipment. 5G technologies offer a wide range of possibilities for network operators, industries, and municipal services, thanks to the diversity and characteristics of frequency bands in 5G networks, such as high-frequency bands that provide high bandwidth, and technologies like massive Multiple-Input Multiple-Output (MU-MIMO) that enhance the user experience.

These advanced technologies enable the development of industrial automation, smart cities, healthcare, and other fields, creating new sources of revenue, improving the user experience, and driving scientific and technological progress. In conclusion, fifth-generation networks (5G) are a key component of the modern world, helping to address various challenges and promote societal development in the digital era.

Keywords: 5G NR, eMBB, mMTC, URLLC, NSA, SA.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У двадцять першому столітті вагоме місце займають інформаційно-телекомунікаційні технології, зокрема технології мобільного зв'язку, які постійно впливають на спосіб життя суспільства. Звичайно, далеко не останню роль відіграють технології мобільного зв'язку у сфері бізнесу та виробництва, під час пандемії COVID-19 та війни. У таких умовах традиційні форми ділового спілкування, зокрема пошта та паперове діловодство, відходять на другий план. Цифрові комунікаційні платформи, наприклад мобільні, стають все більш популярними, а в деяких умовах – це єдиний спосіб комунікації. У кризових умовах компанії почали шукати інші шляхи роботи з персоналом, дозволяючи робітникам працювати віддалено.

Бізнес переходить до використання хмарних технологій, що дає їм змогу покращити організацію, ефективність, автономію, мобільність сервісів та працівників [1].

За оцінками Cisco більш ніж 5,7 мільярда людей матимуть мобільний зв'язок до 2023 року, що становить більш ніж 70% від населення Землі. Також кількість мобільних пристроїв зростає до 13.1 мільярда, у тому числі й кількість пристроїв у сфері міжмашинної взаємодії. Станом на 2023 рік, передбачається зростання швидкості стільникового зв'язку до близько 43,9 Мбіт/с та завантаження понад 299 мільярдів мобільних застосунків [2].

Найбільш перспективні на цей час стільникові мережі п'ятого покоління. Під п'ятим поколінням у телекомунікаційній індустрії мають на увазі технології що належать до 5G New Radio (NR). NR розглядається, як набір технологій від фізичного рівня радіо-доступу в мережу до ядра мережі. Кількість абонентів у мережах 5G постійно зростає та має досягти понад мільярд користувачів до кінця 2022 року та наблизитися до п'яти у 2028-му році (див. рис 1) [3].

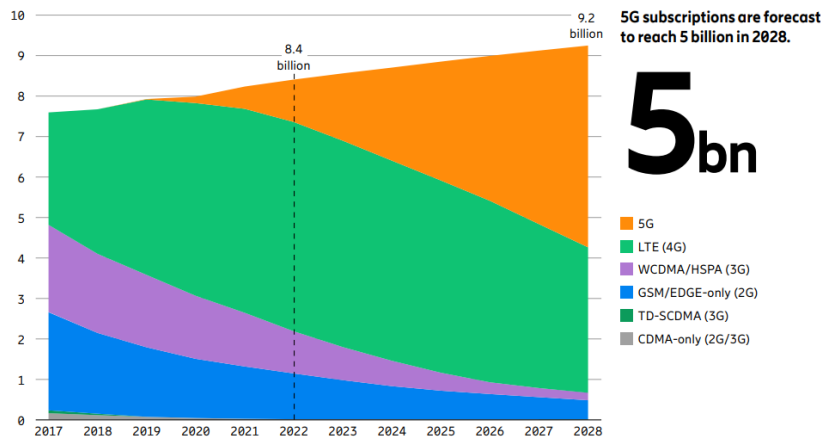


Рис. 1. Кількість користувачів у залежності від технології, що використовується [3].

Мобільні мережі 5G NR відрізняються від попередніх поколінь тим, що забезпечують наднадійний зв'язок із малою затримкою, уможливають зв'язок машинного типу, а також включають розширений мобільний широкопasmовий зв'язок. Ці три головні аспекти формують основу варіантів використання та сфери застосування 5G.

Можливі сценарії використання. Інновації, які має привнести 5G в бездротові технології, були визначені в трьох широких категоріях у рамках проекту 3GPP SMARTER (Study on New Services and Markets Technology Enablers)[4]: вдосконалений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB), масовий зв'язок машинного типу (mMTC), ультранадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC)(див. рис 2) [5].

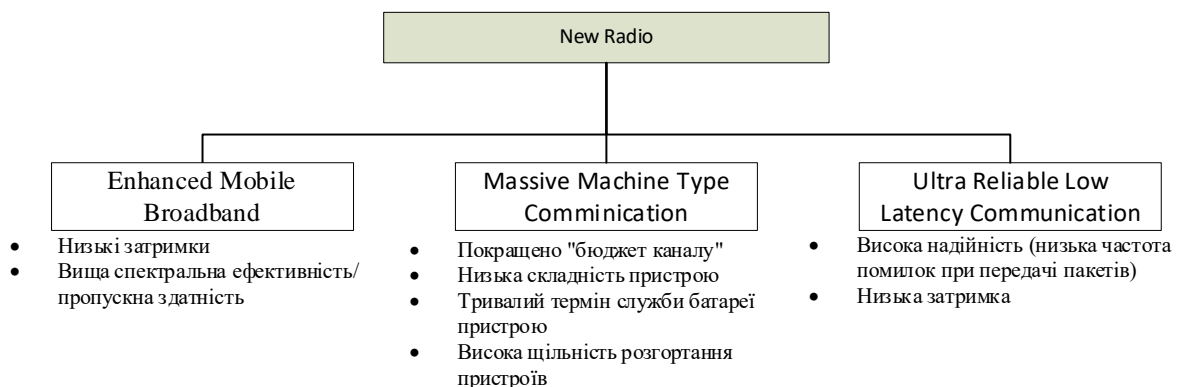


Рис. 2. Три основні сценарії використання технології 5G NR.

Удосконалений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB), передбачає різні сценарії доступу до сервісів, даних та мультимедійного контенту. До eMBB висувуються вимоги щодо високих швидкостей передачі даних, збільшення трафіку, щільності абонентів та їх висока мобільність. Пропонуються різні сценарії розгортання та покриття, що стосуються різних зон обслуговування, наприклад, у приміщенні чи назовні, у міських, сільських районах, офісі та вдома, підключення до локальних і великих зон, а також спеціальні розгортання (наприклад, масові зібрання, трансляції, житлові та високошвидкісні мережі, транспортні засоби)(див. табл. 1)[6].

Таблиця 1.

Вимоги до ефективності для різних сценаріїв швидкості та щільності трафіку [6]

Сценарій	Випробувана швидкість передачі даних (Нижня лінія зв'язку)	Випробувана швидкість передачі даних (Висхідна лінія зв'язку)	Пропускна здатність ділянки (НЛЗ)	Пропускна здатність ділянки (ВЛЗ)	Загальна щільність користувачів	Фактор активності	Швидкість переміщення обладнання абонента	Покриття
Для міста	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	100 (Гбіт/с/км ²)	50 (Гбіт/с/км ²)	[10,000]/(км ²)	20 %	Пішоходи та користувачі транспортних засобів (аж до 120 км/год)	Вся мережа
Для сільської місцевості	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	1 (Гбіт/с/км ²)	500 (Мбіт/с/км ²)	[100]/(км ²)	20 %	Пішоходи та користувачі транспортних засобів (аж до 120 км/год)	Вся мережа
Точка доступу в приміщенні	1 (Гбіт/с)	500 (Мбіт/с)	15 (Тбіт/с/км ²)	2 (Тбіт/с/км ²)	[250,000]/(км ²)	Передбачається певна суміш трафіку; лише деякі користувачі використовують сервіси, які потребують найвищих швидкостей передачі даних	Пішоходи	Зона офісу
Ширококутовий доступ у натовпі	25 (Мбіт/с)	50 (Мбіт/с)	3.75 (Тбіт/с/км ²)	7.5 (Тбіт/с/км ²)	[500,000]/(км ²)	30 %	Пішоходи	Обмежена зона
Щільна забудова	300 (Мбіт/с)	50 (Мбіт/с)	750 (Гбіт/с/км ²)	125 (Гбіт/с/км ²)	[25,000]/(км ²)	10 %	Пішоходи та користувачі транспортних засобів (аж до 60 км/год)	Ділова частина міста
Трансляції	Максимум 200 (Гбіт/с) (на TV канал)	Не застосовується або незначні (наприклад 500 (кбіт/с/на користувач))	Не застосовується	Не застосовується	[15] TV каналів по [20 (Гбіт/с)] на одній нісній	N/A	Стационарні користувачі, пішоходи та користувачі в транспортних засобах (аж до 500 км/год)	Вся мережа
Швидкісний потяг	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	15 (Гбіт/с/потяг)	7.5 (Гбіт/с/потяг)	[1,000]/потяг	30 %	Користувачі у потягах (аж до 500 км/год)	Вздовж залізниць
Швидкісний транспортний засіб	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	100 (Гбіт/с/км ²)	50 (Гбіт/с/км ²)	[4,000]/(км ²)	50 %	Користувачі в транспортних засобах (аж до 250 км/год)	Вздовж доріг
Підключення в літаку	15 (Мбіт/с)	7.5 (Мбіт/с)	1.2 (Гбіт/с/літак)	[600] (Мбіт/с/літак)	400/(літак)	20 %	Користувачі в літаках (аж до 1,000 км/год)	

Ультранадійний зв'язок із низькою затримкою (URLCC). Деякі сфери застосування вимагають від технології стійкості, високої доступності послуги зв'язку та дуже низьких затримок, що зумовлено використанням у критичній інфраструктурі та промисловій автоматизації. У цілому, загальна затримка в обслуговуванні залежать від затримки на радіо інтерфейсі, передачі в мережі 5G, передачі на сервер, що може бути поза мережею та обробки даних. Таким чином, деякі фактори залежать безпосередньо від системи, а решту можна зменшити за допомогою покращення взаємодії мережі 5G з сервісами за її межами, наприклад, за рахунок локального хостингу служб. У рамках автоматизації процесів та дистанційного керування очікується отримати надійність 99,999%, при швидкостях передачі даних користувача до 100 Мбіт/с та затримкою 50мс, цього можна досягти завдяки обчисленням на "кордоні мережі" (Edge Computing). Прикладом автоматизації процесів може бути керування придорожною інфраструктурою, наприклад, контролери світлофорів чи інших придорожніх пристроїв, засобів, моніторинг руху вздовж автомагістралей чи в міських районах, вулицях, за допомогою бездротового підключення до центрів контролю, керування та управління дорожнім рухом (див. табл. 2). [6]

Таблиця 2.

Приклад вимоги до продуктивності для сценарію інтелектуальної транспортної інфраструктури з бездротовим зв'язком [6].

Сценарій	Макс. дозволена наскрізна затримка	Survival time	Доступність послуг зв'язку	Надійність	Швидкість передачі даних користувача	Розмір корисного навантаження(корисних даних)	Щільність трафіку	Щільність з'єднання	Розмір зони обслуговування
Транспортна придорожна інфраструктура з бездротовим зв'язком	30 (мс)	100 (мс)	99.999.9 %	99.999 %	10 (Мбіт/с)	Від малого до великого	10 (Гбіт/с/км ²)	1,000/(км ²)	2 кілометри вздовж дороги

Комунікації машинного типу характеризуються повністю автоматичним створенням даних, обміном, обробкою та активацією між інтелектуальними машинами без або з незначним втручанням людини. Використання технологій та сценаріїв масового зв'язку машинного типу (mMTC) ставить за мету консолідувати всі відомі та використовувані комунікації машинного типу та пов'язані з ними служби та додатки, що може призвести до концепції середовища розумних міст, мережевого суспільства та Інтернету всього (Internet of Everything) шляхом збільшення кількості підключених до мережі інтелектуальних машин. [7]

Варіанти архітектури. Згідно зі специфікаціями 3GPP, розгортання 5G New Radio відбувається поетапно, та існує кілька варіантів розгортання 5G. Мережі 5-го покоління можуть бути впровадженні, як «Non-Stand Alone» (NSA), так і «Stand-Alone» (SA)[8].

Архітектура NSA означає, що мережа радіодоступу 5G (5G Access Network) з її інтерфейсом NR використовується в поєднанні з Evolved Packet Core (EPC) ядром мережі, яка існує Long Term Evolution (LTE). У такому випадку технологія NR стає доступною без повної заміни мережі. Щоправда, у такому варіанті доступні лише послуги 4G, але з використанням можливостей, які пропонує 5G New Radio, наприклад, менша затримка та вища надійність. NSA також називають «E-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC)» або «Architecture Option 3» (див. рис. 3), [8].

На цьому зображенні, MME — Mobility Management Entity; S-GW — Serving Gateway; E-UTRAN — Evolved Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Terrestrial Radio Access; eNB — E-UTRAN Node B or Evolved Node B, тобто базові станції що можуть працювати в мережах стандарту LTE; en-gNB — en-gNB представляє gNB, який може з'єднуватися з EPC та eNB; gNB — gNodeB — це 3GPP-сумісна реалізація базової станції 5G-NR; S1 — інтерфейс в LTE, який використовується між eNodeB і EPC; S1-U — інтерфейс S1 у площині користувача; X2 — інтерфейс сигналізації між eNodeB.

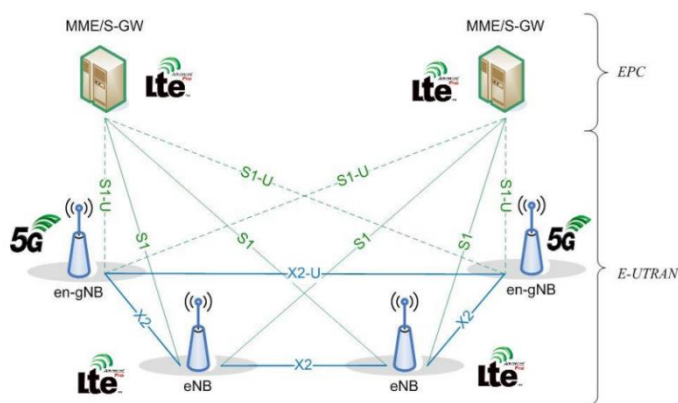


Рис. 3. NSA Архітектура (3GPP) [8].

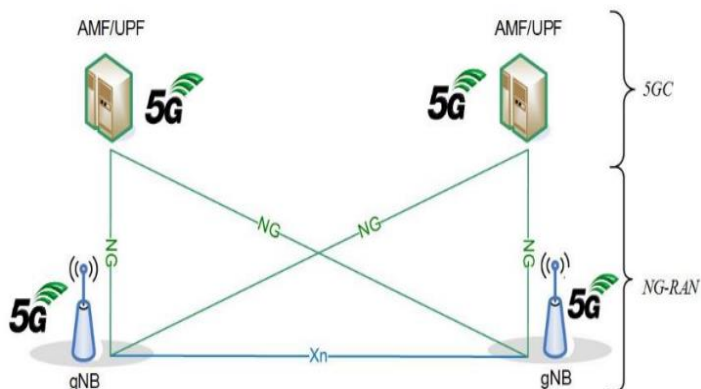


Рис. 4. SA Архітектура (3GPP) [8].

належать до категорії NSA [9].

Оскільки нові покоління стільникових мереж постійно розвиваються, відкриваючи нові можливості для розвитку телекомунікацій, а також загалом покращують користувацький досвід, використання стільникових мереж важливо постійно впроваджувати у практику. Зрозуміло, що залежно від початкової конфігурації вже існуючої мережі, стандарти пропонують гнучкі варіанти впровадження п'ятого покоління, щоб забезпечити максимальне перевикористання наявних ресурсів на шляху до реалізації автономної версії архітектури та впровадження повного обсягу функціональності 5G NR.

Натомість, в архітектурі SA, технології NR підключено до ядра мережі 5G (5G Core Network) (див. рис.4). Тільки в цій конфігурації підтримується повний набір послуг 5G Phase 1. Архітектуру SA вже можна розглядати як «повне розгортання 5G», без потреби в будь-яких частинах мережі 4G, для функціонування [8].

де AMF — функція управління доступом і мобільністю; UPF — функція площини користувача; gNB — gNodeB є реалізацією базової станції в 5G-NR; NG — інтерфейс, який існує між 5GC і базовими станціями; Xn — інтерфейс визначено між двома вузлами NG-RAN;

При таких сценаріях розгортання може бути шість варіантів, залежно від комбінацій архітектури та функціональних потреб. (див. рис. 5) Варіанти 1, 2 і 5 належать до категорії SA, а варіанти 3, 4 і 7

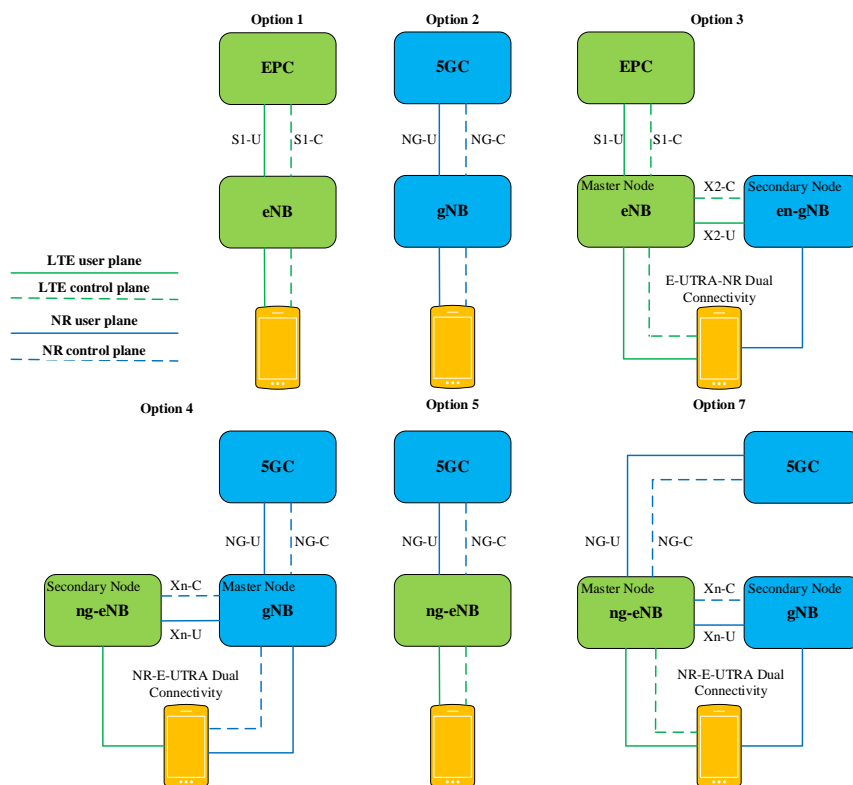


Рис. 5. Шість варіантів комбінацій архітектур для розгортання NR.

Опис RAN частини. Мережу бездротового доступу до ядра (базової), стільникової мережі можна описати, як Next Generation Radio Access Network (NG RAN). Мережа радіодоступу наступного покоління може забезпечувати доступ як до LTE, так і NR, тому відповідно вузлом NG-RAN може бути або gNB (базова станція 5G), або ng-eNB(базова станція 4G нового покоління). Таким чином, NG-RAN забезпечує зв'язок мобільних терміналів, резервуючи радіоресурси між терміналом та базовою станцією ng-eNB на одній носійній у варіанті LTE, чи кількох у випадку LTE-Advanced, або ж між терміналом та базовою станцією gNB в кількох діапазонах частот 5G-NR. Базові станції ng-eNB та gNB взаємодіють між собою через інтерфейс Xn, з'єднуючись з ядром мережі 5G через інтерфейс NG [10].

Отже, інтерфейс NG є перехідною точкою між NG-RAN і ядром 5G. Оскільки в мережах 5-го покоління використовують принцип CUPS(Control Plane/ User Plane separation), тобто розділення шляхів проходження службового та корисного трафіку, то існує NG-C та NG-U. Інтерфейс NG-C, це інтерфейс між радіовузлом і сервісом, що називається функцією керування доступом і мобільністю (AMF), підтримуючи передачу сигналів протоколу додатків наступного покоління (NG-AP). Інтерфейс NG-U - це інтерфейс між радіовузлом і сервісом, що відповідає за функції користувача (UPF), з метою тунелювання, тобто організацію його доставлення між кінцевими точками, через протокол GTP-U(GPRS Tunneling) [10]. Щоб передача корисних даних відбулася, UPF налаштовується через ще один сервіс SMF (Session Management Function) під контролем AMF.

Таким чином, мета мобільного терміналу – обмін даними з певною кінцевою мережею (Data Network), такий обмін відбувається через логічне з'єднання, яке називають Protocol Data Unit. Сам, так званий, логічний зв'язок, що відбувається за допомогою описаних вище елементів, розділено на дві частини. NG-RAN відповідає за з'єднання мобільного терміналу з базовою станцією, та поєднує площини керування та корисних даних з базовою мережею, а базова ж мережа 5G далі дозволяє підключити NG-RAN до потрібної DN для обміну даними, забезпечуючи при цьому моніторинг їх мобільності, гарантуючи неперервність з'єднання та певну якість QoS(Quality of Service). Загальна схема такого підключення зображена на рисунку 6.

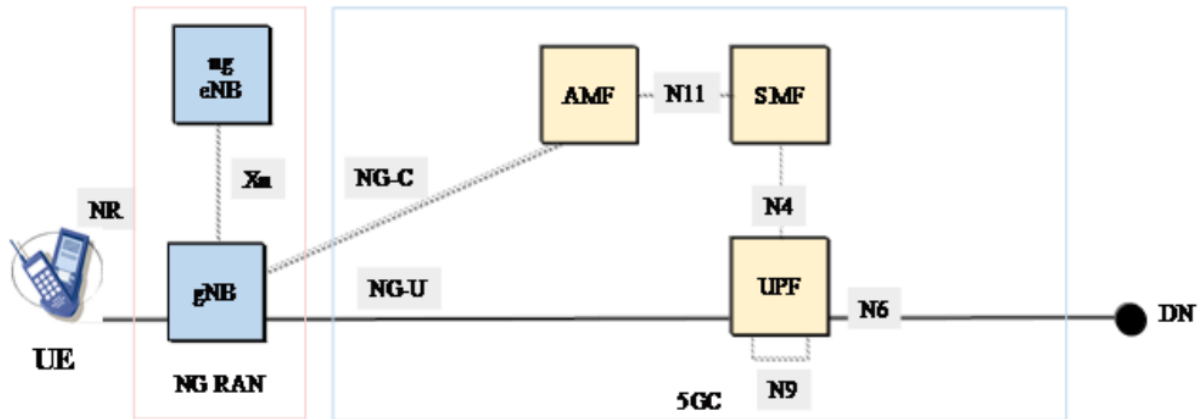


Рис. 6. Загальна архітектура NG-RAN

Архітектура протоколу радіоінтерфейсу ділиться на два прошарки/рівні (stratum) (див. рис 7).

Рівень доступу (Access stratum) охоплює радіоінтерфейс, забезпечуючи функціонал, пов'язаний із каналним рівнем та нижньою частиною третього рівня, відповідно до моделі OSI. Рівень доступу має справу з радіопротоколами інтерфейсу Uu і з протоколами, керованими через наземний інтерфейс NG (Next Generation);

Рівень без доступу, котрий відповідає за обмін даними між стільниковою та базовою мережею, а отже використовує протоколи, що дозволяють обмінюватися сигналами обладнанню користувача з об'єктом AMF 5G. На даному рівні надаються послуги, що стосуються мобільності, автентифікації, запитів на обслуговування [10].

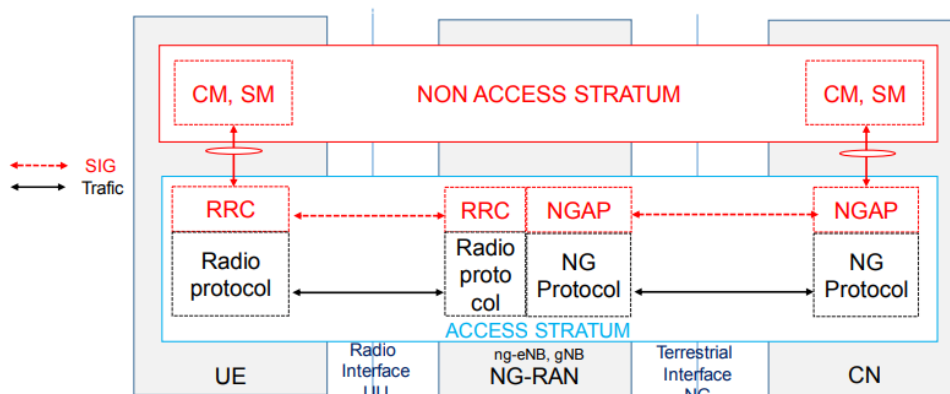


Рис. 7. Протоколи в інтерфейсі 5G.

Радіоінтерфейс використовує OFDM модуляцію, яка відповідно складається з модуляції ортогональних піднесених (див. рис. 8).

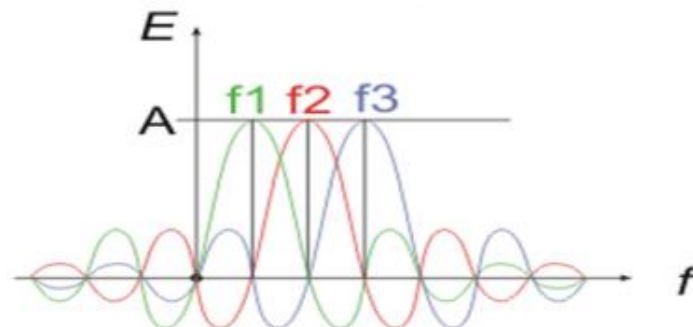


Рис. 7. OFDM модуляція на трьох піднесених.

Дві піднесені будуть ортогональними тільки тоді, якщо їх скалярний добуток буде рівний нулю(1):

$$\langle c_1(t), c_2(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t) dt = 0. \quad (1)$$

Тривалість символу визначається як $T = \frac{1}{\Delta f}$, де Δf інтервал піднесеної.

Ортогональна модуляція забезпечує добру спектральну ефективність та стійкість до частотно-селективного завмирання в радіоканалах.

OFDM сигнали використовуються в низхідних лініях, оскільки забезпечують ємність для множинного доступу (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Також завдяки техніці доповнення нулями (zero-padding) вдається зменшити значення коефіцієнта середньої потужності (Power Average Power Ratio) та розсіювання потужності на сусідні діапазони. PAPR представляє відношення максимальної потужності сигналу OFDM до середньої потужності в смузі пропускання [10].

Для передачі висхідної лінії зв'язку використовується або сигнал OFDM, або сигнал DFT-S-OFDM (OFDM з дискретним перетворенням Фур'є). Сигнал DFT-S-OFDM виходить із модуляції OFDM за допомогою попереднього кодування перетворення та застосовується в ширшому діапазоні частот, ніж сигнал OFDM. Метод мультиплексування, який використовується у висхідній лінії зв'язку, – це OFDMA або SC-FDMA (одна носійна – FDMA)[10].

Також для доступу існують такі варіанти технологій, як Мультиплексування множинного доступу з просторовим розділенням (SDMA), також відоме як режим передачі Multi-User MIMO (MU-MIMO), що дозволяє одночасну передачу в тих самих частотних діапазонах для кількох користувачів. Мультиплексування SDMA вимагає використання кількох антен.

Починаючи з випуску R.16, 5G-NR [10, 11] пропонує мультиплексування неортогонального доступу (NOMA), для якого частотно-часові ресурси однієї антени, використовуються одночасно кількома користувачами. За допомогою NOMA приймач встановлює архітектуру MUD (багатокористувацьке виявлення), щоб усунути перешкоди від інших користувачів, за допомогою алгоритму SIC (Successive Interference Cancellation). Після алгоритму SIC кожен користувач може відновити власний сигнал [12].

Визначається два діапазони частот (frequency ranges) FR котрі наведені в Таблиці 2 та Таблиці 3.

Таблиця 2.

Операційні діапазони 5G-NR-FR1

5G-NR-FR1 operational bands			
Band	Frequency [MHz]	Bandwidth [MHz]	Duplexing method
n77	3300-4200	10-100	TDD
n78	3300-3800	10-100	TDD
n79	440-5000	40-100	TDD
n80	1710-1785	5-30	SUL
n81	880-915	5-20	SUL
n82	832-862	5-20	SUL
n83	703-748	5-20	SUL
n84	1920-1980	5-20	SUL
n86	1710-1780	5-40	SUL
n90	2496-2690	10-100	TDD

Таблиця 3.

Операційні діапазони 5G-NR-FR2

5G-NR-FR2 operational bands			
Band	Frequency [MHz]	Bandwidth [MHz]	Duplexing method
n257	26.5-29.5	50-400	TDD
n258	24.25-27.5	50-400	TDD
n259	39.5-43.5	50-400	TDD
n260	37-40	50-400	TDD
n261	27.5-28.35	50-400	TDD

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Отже, мережі п'ятого покоління можуть бути використані для різних проєктів та сценаріїв розгортання, з різною початковою конфігурацією, забезпечуючи надійний та швидкісний зв'язок для мережевих елементів, мобільних пристроїв тощо. Технології 5G відкривають широкий діапазон можливостей для операторів, промисловості та муніципальних служб. Це стало можливим завдяки тому, що організація 3GPP передбачає кілька варіантів розгортання NR, включаючи міграцію від мереж попередніх стандартів. У залежності від завдань, SA архітектура може надавати повний спектр можливих послуг з першого дня розгортання, у той час як NSA надає обмежені послуги, але може перевикористати вже наявні

розгорнуті ресурси, зменшуючи початкові інвестиції. Різноманіття та характеристики діапазонів в мережах 5G дозволяють операторам, у залежності від завдання, розгортати мережі у густонаселених районах, використовувати високочастотні діапазони, забезпечувати високу пропускну здатність чи середню, балансує між потужністю та покриттям. Передові технології, наприклад, масовий MU-MIMO покращують користувацький досвід. Технології 5G дозволяють розвивати функціонал автоматизації виробництв, розумних міст, у сфері охорони здоров'я тощо. Таким чином, все це стимулює нові джерела доходу, покращує користувацький досвід та спонукає прогрес.

Література

1. Slotosch A. Top 7 Reasons to Embrace Mobile Communication in Your Company. Beekeeper. URL: <https://www.beekeeper.io/blog/why-mobile-communication-is-important-for-your-companys-operations/> (date of access: 01.02.2023).
2. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. Cisco Systems, Inc. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (дата звернення: 01.02.2023).
3. Ericsson Mobility Report. ericsson.com. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report> (дата звернення: 01.02.2023).
4. Chochliouros, I.P., et al.: Enhanced mobile broadband as enabler for 5G: actions from the framework of the 5G-DRIVE project. In: MacIntyre, J., Maglogiannis, I., Iliadis, L., Pimenidis, E. (eds.) AIAI 2019. IAICT, vol. 560, pp. 31–45. Springer, Cham (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-030-19909-8_3
5. Formal (3GPP) Definition. ShareTechnote. URL: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Definition.html#Formal_Definition (дата звернення: 02.10.2022).
6. 5G; Service requirements for next generation new services and markets (3GPP TS 22.261 version 15.7.0 Release 15).
7. Jovovic, Ivan & Forenbacher, Ivan & Periša, Marko. (2015). Massive Machine-Type Communications: An Overview and Perspectives Towards 5G. 10.18638/rcitd.2015.3.1.73.
8. 3GPP TR 21.915 V15.0.0, Summary of Rel-15 Work Items, 2019.
9. 5G standalone architecture. samsung.com. URL: <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/white-papers/0107-5g-standalone-architecture/> (дата звернення: 01.02.2023).
10. Pyatin, I. Boiko, J., Eromenko, O., Parkhomey, I. Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio //TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control). –2023. –Т. 21. –No. 3. –С. 496-505.
11. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko, "Analysis of Signal Synchronization Conditions in 5G Mobile Information Technologies," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 01-06, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9766899.
12. Launay F. NG-RAN and 5G-NR: 5G Radio Access Network and Radio Interface : монографія. Wiley-ISTE, 2021. 288 ст.

References

1. Slotosch A. Top 7 Reasons to Embrace Mobile Communication in Your Company. Beekeeper. URL: <https://www.beekeeper.io/blog/why-mobile-communication-is-important-for-your-companys-operations/> (date of access: 01.02.2023).
2. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. Cisco Systems, Inc. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (date of access: 01.02.2023).
3. Ericsson Mobility Report. ericsson.com. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report> (date of access: 01.02.2023).
4. Chochliouros, I.P., et al.: Enhanced mobile broadband as enabler for 5G: actions from the framework of the 5G-DRIVE project. In: MacIntyre, J., Maglogiannis, I., Iliadis, L., Pimenidis, E. (eds.) AIAI 2019. IAICT, vol. 560, pp. 31–45. Springer, Cham (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-030-19909-8_3
5. Formal (3GPP) Definition. ShareTechnote. URL: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Definition.html#Formal_Definition (date of access: 02.10.2022).
6. 5G; Service requirements for next generation new services and markets (3GPP TS 22.261 version 15.7.0 Release 15).
7. Jovovic, Ivan & Forenbacher, Ivan & Periša, Marko. (2015). Massive Machine-Type Communications: An Overview and Perspectives Towards 5G. 10.18638/rcitd.2015.3.1.73.
8. 3GPP TR 21.915 V15.0.0, Summary of Rel-15 Work Items, 2019.
9. 5G standalone architecture. samsung.com. URL: <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/white-papers/0107-5g-standalone-architecture/> (date of access: 01.02.2023).
10. Pyatin, I. Boiko, J., Eromenko, O., Parkhomey, I. Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio //TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control). –2023. –Vol. 21. –No. 3. –С. 496-505.
11. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko, "Analysis of Signal Synchronization Conditions in 5G Mobile Information Technologies," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 01-06, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9766899.
12. Launay F. NG-RAN and 5G-NR: 5G Radio Access Network and Radio Interface: monograph. Wiley-ISTE, 2021. 288 p.