

Сивик О.С., магістр; Топчій В.М., магістр; Шеховцов В.С., магістр;
Лазебний С.Г., аспірант; Березнюк А.В., аспірант; Кондратенко В.А.

АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СЦЕНАРІЇВ РОЗГОРТАННЯ NTN МЕРЕЖ

Syvyyk O.S., Topchii V.M., Shekhovtsov V.S., Lazebnyi S.H., Bereznyuk A.V., Kondratenko V.A. Analysis and improvement of scenarios for the deployment of NTN networks. The era of fifth-generation mobile or wireless networking technology has just begun, and it is this technology that can actually improve system performance to an extremely high level. Mobile communications from space are evolving rapidly. Non-terrestrial networks have the ability to provide reliable connections to areas that were previously difficult to connect, which has a high impact on the economic situation. A non-terrestrial network with 5G support can be an effective solution for providing services anywhere and anytime and expand the coverage area. This paper analyzes possible solutions for satellite systems and multi-beam data technologies due to their ability to increase bandwidth through frequency reuse, as well as increase data rates. To adapt 5G to support non-terrestrial, you need to consider and explore a holistic architecture or design that can cover many areas and users. The article analyzes and explores the main aspects of non-terrestrial networks, analyzes in detail the design possibilities, problems of implementation and construction, as well as areas of research. Fifth generation (5G) technologies and systems will meet the needs of users around the world anywhere, anytime. Extraterrestrial Network (NTN) systems are able to meet connection requests anywhere, offering a wide coverage area and ensuring continuity, availability and scalability of services. In this article, we will look at NTN's capabilities and its potential to meet the expectations of users on and off 5G networks. The current situation, current research and unresolved issues underscore the importance of NTN in the field of wireless communications.

Keywords: 5G, non-terrestrial network, high-altitude platform systems, HAPS, network architecture, satellite access

Сивик О.С., Топчій В.М., Шеховцов В.С., Лазебний С.Г., Березнюк А.В., Кондратенко В.А. Аналіз та вдосконалення сценаріїв розгортання NTN мереж. Епоха технології п'ятого покоління (5G) тільки почалася, і її обіцянки суттєво покращити продуктивність системи стали реальністю. Неназемна мережа (NTN) з підтримкою 5G можливо стануть ефективним рішенням для надання послуг у будь-який час, у будь-якому місці та збільшить зону покриття. У цьому контексті в роботі аналізуються рішення для супутникових систем з високою пропускну здатністю та вдосконаленою технологією багатопроменевої передачі, завдяки їхній здатності збільшувати пропускну здатність системи за рахунок повторного використання частот, збільшення швидкості передачі даних користувачем та спектральної ефективності системи. Адаптація 5G для підтримки неназемних мереж спричиняє цілісний дизайн, що охоплює безліч областей, від мережі радіодоступу до послуг та системних аспектів. У статті аналізуються основні теми неназемних мереж, докладно аналізуються аспекти проектування, проблеми реалізації та напрями наступних досліджень.

Ключові слова: 5G, неназемні мережі, non-terrestrial network, системи висотних платформ, HAPS, архітектура мереж, супутниковий доступ

Сывик А.С., Топчий В.М., Шеховцов В.С., Лазебный С.Г., Березнюк А.В., Кондратенко В.А. Анализ и усовершенствование сценариев развертывания NTN сетей. Эпоха технологии пятого поколения (5G) только началась и ее обещания существенно улучшить производительность системы стали реальностью. Неназемная сеть (NTN) с поддержкой 5G может стать эффективным решением для предоставления услуг в любое время, в любом месте и увеличит зону покрытия. В этом контексте в работе анализируются решения для спутниковых систем с высокой пропускной способностью и усовершенствованной технологией многолучевой передачи благодаря их способности увеличивать пропускную способность системы за счет повторного использования частот, увеличения скорости передачи данных пользователем и спектральной эффективности системы. Адаптация 5G для поддержки неназемных сетей приводит к целостному дизайну, охватывающему множество областей, от сети радиодоступа до услуг и системных аспектов. В статье анализируются основные темы неназемных сетей, анализируются аспекты проектирования, проблемы реализации и направления последующих исследований.

Ключевые слова: 5G, неназемные сети, non-terrestrial network, системы высотных платформ, HAPS, архитектура сетей, спутниковый доступ

Вступ

Постановка задачі. Технології NTN (англ. non-terrestrial network) стає загальним терміном для будь-якої мережі, яка включає літаючі неназемні об'єкти. Сімейство NTN включає мережі супутникового зв'язку, системи висотних платформ (HAPS) та мережі "повітря-земля", як показано на рис. 1.

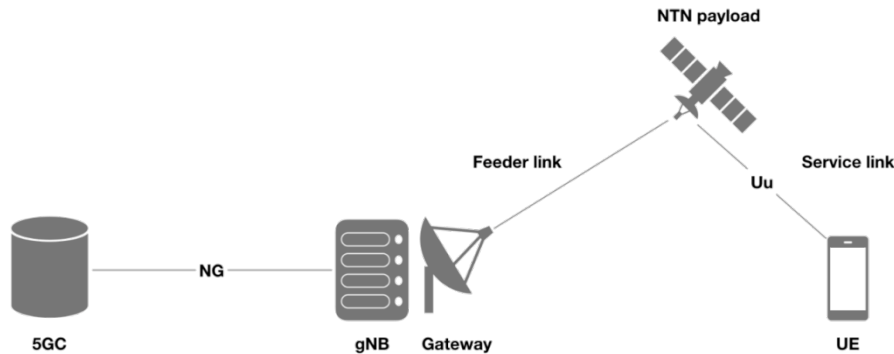


Рис. 1. Архітектура NTN із прозорим корисним навантаженням

Аналіз літературних джерел. У мережах супутникового зв'язку використовуються космічні платформи, які включають супутники на низькій навколоземній орбіті (LEO), супутники на середній навколоземній орбіті (MEO) та супутники на геостаціонарній навколоземній орбіті (GEO). За останні кілька років світ став свідком відродження інтересу до ширококутового зв'язку, що надається мережами LEO NTN із великими супутниковими угрупованнями (наприклад, Starlink, Kuiper та OneWeb). Щоб отримати вигоду від масштабу системи 5G [1] супутникова індустрія підключилася до процесу 3GPP для інтеграції супутникових мереж в систему 5G NR (нова технологія стільникового зв'язку). HAPS - це повітряні платформи, які можуть включати літаки, повітряні кулі і дирижаблі. У технології NTN основна увага приділяється станціям із висотною платформою, таким як базові станції міжнародного мобільного зв'язку, відомі як HIBS (англ. high-altitude platform stations as IMT base stations). Система HIBS надає послуги мобільного зв'язку в тих же смугах частот, що і наземні мобільні мережі.

Мережі "повітря-земля" призначені для забезпечення зв'язку в польоті для літаків за рахунок використання наземних станцій, які відіграють ту саму роль, що й базові станції (BS) у наземних мобільних мережах. Але антени наземних станцій у мережі "повітря-земля" спрямовані до неба, і відстані між положеннями станцій набагато більші, ніж у наземних мобільних мереж.

Досі робота NTN була зосереджена на мережах супутникового зв'язку з неявною сумісністю для підтримки систем HIBS та мереж "повітря-земля". Варто відзначити, що система також працює із маловисотними літальними безпілотними апаратами з мобільними пристроями (БПЛА, також відомими як безпілотні літальні апарати), які можна розглядати як частину сімейства NTN в широкому сенсі. Однак у 3GPP цей напрямок роботи було проведено в окремому напрямку. Тому тут ми зосередимося на мережах супутникового зв'язку і зведемо до мінімуму обробку інших типів NTN.

NTN на основі 5G New Radio (NR) була основним напрямком [2]. NR був розроблений для прямої сумісності, підтримки низької затримки, передових антенних технологій та гнучкості спектру, включаючи роботу в діапазонах низьких, середніх та високих частот. Це забезпечує міцну основу адаптації NR для підтримки NTN.

Зростає інтерес до варіантів використання масового Інтернету речей (IoT) на основі NTN з використанням вузькосмугового IoT (NB-IoT) та довгострокового розвитку (LTE) для

зв'язку машинного типу (LTE-M). В результаті 3GPP вивчає можливість адаптації NB-ІоТ та LTE-M для підтримки NTN у своїй версії 17 [3].

У роботі [4] обговорюються проблеми та можливості NTN, а також представлений практичний приклад використання частот міліметрового діапазону для підключення мобільних терміналів. Детальний огляд NTN представлений у [5], але обговорення роботи 3GPP NTN у ньому залишається високому рівні.

Мета та задачі дослідження. Мета цієї статті – проаналізувати варіанти роботи NTN, заглибившись у детальні аспекти та фундаментальні обґрунтування застосування технологій, що впливають на стандартизацію. Зокрема, у цьому документі обговорюються ключові рішення NTN, що охоплюють безліч областей, від мережі радіодоступу до послуг та системних аспектів до ядра та терміналів.

1. Мережі радіодоступу для NR NTN

Робота над NR NTN розпочалася у 2017 році з дослідження, присвяченого сценаріям розгортання та моделям каналів [6]. Першою основною метою дослідження було вибрати кілька еталонних сценаріїв розгортання NTN та узгодити ключові параметри, такі як архітектура, висота орбіти, смуги частот тощо.

Ключові сценарії та моделі включають:

- 1) використання S- та Ka-діапазонів;
- 2) супутники GEO, супутники LEO та HAPS;
- 3) спрямовані до Землі промені (тобто промені, які прямують на ділянку землі якомога довше) і промені, що рухаються (тобто промені, що рухаються по поверхні Землі слідом за рухом супутника);
- 4) типові розміри зони обслуговування та мінімальні кути місця (елевації) для розгортань GEO, LEO та HAPS;
- 5) два типи терміналів NTN: портативні термінали та термінали з дуже малою апертурою (VSAT) (оснащені параболічними антенами і зазвичай встановлюються на будівлях або транспортних засобах);
- 6) моделі антени для супутникової антени та антени HAPS.

Друга основна мета дослідження полягала у аналізі моделей каналів NTN з урахуванням моделей наземних каналів. Різні моделі каналів підтримують низку сценаріїв розгортання, включаючи міські, приміські та сільські.

Багатопрореневість - типове явище в умовах наземного поширення. Для NTN велика відстань до супутника призводить до того, що різні траєкторії майже паралельні, і кутовий розкид, таким чином, близький до нуля. Тому великомасштабні параметри (імовірність прямої видимості, кутовий розкид, розкид затримок тощо.) відрізняються від наземного випадку і залежить від кута місця обслуговуючого супутника.

Основна мета полягає у визначенні мінімального набору необхідних функцій, що забезпечують підтримку з наземних NR для NTN (особливо для супутникових мереж), що включало архітектуру, протоколи вищого рівня та аспекти фізичного рівня.

RAN наступного покоління (NG-RAN) підтримує поділ базової станції 5G (gNB) на центральний блок (CU) та розподілений блок (DU). Досліджено безліч варіантів архітектури NG-RAN на основі NTN та зроблено висновок, що немає жодних перешкод підтримки зазначених варіантів архітектури.

Стек протоколів верхнього рівня NR поділено на площину користувача (UP), яка керує передачею даних, та площину управління (англ. control plane, CP), що відповідає за сигналізацію. Для UP основний вплив мають тривалі затримки поширення в NTN.

Відповідно, було вивчено вплив тривалих затримок на управління доступом до середовища (англ. medium access control, MAC), управління радіоканалом (англ. radio link control, RLC), протокол конвергенції пакетних даних (англ. packet data convergence protocol, PDCP) та протокол адаптації службових даних (англ. service data adaptation protocol, SDAP). Було зроблено висновок, що вдосконалення MAC будуть потрібні для довільного доступу,

переривчастого прийому (англ. discontinuous reception, DRX), запиту планування та автоматичного гібридного запиту на повторення (англ. hybrid automatic repeat request, HARQ). Було рекомендовано зосередити увагу на повідомленні про стан та порядкові номери на рівні RLC, а також на відкиданні одиниць службових даних та порядкових номерів на рівні PDCP. Було виявлено, що для SDAP немає необхідності вносити зміни для підтримки NTN.

Для CP основна увага в дослідженні приділялася процедурам управління мобільністю через переміщення платформ NTN, особливо супутників LEO. Для режиму очікування потрібно ввести специфічну системну інформацію NTN.

З погляду фізичного рівня, великі оцінки канального та системного рівнів проводилися у двох номінальних смугах частот: діапазонах S та Ka. З аналізу [6-8] можна зробити висновок, що при відповідних схемах розташування супутникових променів портативне обладнання (UE) може обслуговуватися мережами LEO і GEO в S-діапазоні, а інше UE з високим коефіцієнтом підсилення передавальної та приймальної антен терміналу (VSAT) і UE, можуть обслуговуватися LEO і GEO як в S-, так і в Ka-діапазонах.

Наземні мережі NR утворюють хорошу основу для підтримки NTN, незважаючи на проблеми, пов'язані з тривалими затримками поширення, великими доплерівськими зсувами і рухомими об'єктами в NTN. Було визначено, що необхідні удосконалення в областях часових співвідношень, часової та частотної синхронізації висхідної лінії зв'язку та HARQ.

Мета останніх досліджень [1-8] полягає у визначенні покращень, необхідних для NTN на базі LEO та GEO, а також націлити на неявну підтримку NAPS та мереж "повітря-земля". Це включає аспекти фізичного рівня, протоколи та архітектуру, а також управління радіоресурсами, вимоги до радіочастот та використання смуги частот. Основна увага приділяється прозорій архітектурі корисного навантаження з фіксованими наземними зонами та системами дуплексного зв'язку із частотним розподілом (FDD), де передбачається, що всі UE мають можливості глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS).

На рис. 1 показано архітектуру NTN з прозорим корисним навантаженням. Базова мережа 5G (5GC) підключається до gNB за допомогою NG-інтерфейсу. GNB розташований на землі та підключається до шлюзу NTN, який через фідерне з'єднання підключається до корисного навантаження NTN (мережевий вузол, встановлений на борту супутника або NAPS). Корисне навантаження NTN підключається до UE через службове посилення за допомогою інтерфейсу Uu.

Наземний користувач UE з можливостями GNSS може розрахувати відносну швидкість між UE та супутником, а також час прийому-передачі (англ. round-trip time, RTT) між UE та супутником. Виходячи з відносної швидкості, UE може розрахувати та застосувати попередню компенсацію для доплерівської частоти, щоб гарантувати, що його сигнал висхідної лінії зв'язку приймається на супутнику або gNB на бажаній частоті. GNB надає UE загальне випередження синхронізації (англ. timing advance, TA), яке сигналізує RTT між супутником та gNB. UE додає час RTT між UE та супутником до загальної TA, щоб отримати повну TA. Повний TA використовується як зсув між прийнятою синхронізацією низхідної лінії зв'язку і синхронізацією передачі висхідної лінії зв'язку в UE, тобто, якщо slot n низхідній лінії зв'язку починається в момент часу t_1 , то slot n висхідної лінії зв'язку починається в момент часу t_1 мінус повне TA. Це дозволяє UE відправляти передачі по висхідній лінії зв'язку з точною синхронізацією прийому gNB як для довільного доступу, так і для передачі даних в підключеному режимі.

Як показано в [6-8] передачі в NR засновані на 16 процесах HARQ із зупинкою та очікуванням для безперервних передач. Процес HARQ не може бути повторно використаний для нової передачі, доки не буде отримано зворотний зв'язок для попередньої передачі. При тривалих RTT та використанні протоколу зупинки та очікування передачі зупиняться, коли всі процеси HARQ очікують зворотного зв'язку, що знижує пропускну здатність зв'язку. Щоб зменшити зрив, кількість процесів HARQ збільшена до 32, що може охоплювати деякі

сценарії "повітря-земля". Однак 32 процесів HARQ недостатньо для покриття RTT NTN на основі LEO та GEO. Оскільки подальше збільшення кількості процесів HARQ вважається небажаним, необхідно використовувати схеми для повторного використання того самого процесу HARQ до того, як пройде повний RTT, щоб уникнути зупинки. При повторному використанні процесу HARQ для передачі по низхідній лінії зв'язку до того, як пройде RTT, зворотний зв'язок HARQ стає непотрібним і таким чином відключається. Для висхідної лінії зв'язку немає зворотного зв'язку HARQ, і gNB може динамічно вирішувати, чи повторно використовувати процес HARQ до того, як пройде RTT, відправивши гранти для нових даних або гранти для повторних передач, або дочекатися, поки він не декодує передачу по висхідній лінії. Показано, щоб реалізувати в реальному часі RTT NTN для UE необхідно (повторно) вибрати новий супутник, який заснований на існуючих критеріях і може включати нові критерії, такі як час, коли супутник перестає покривати зону, де знаходиться UE. Умовна передача обслуговування заснована на місцезнаходженні UE та синхронізації супутникового покриття з місцем розташування UE.

2. Послуги та системні аспекти NR NTN

У дослідженні, задокументованому в [7], визначено варіанти використання супутників, що використовуються як технології доступу від UE, так і як транзитного каналу між наземною базовою станцією (BS) і мережею між BS (англ. core network, CN). Для супутникового доступу UE варіанти використання включають, наприклад, використання супутника для ширококомовної послуги, щоб гарантувати покриття для пристроїв IoT і забезпечити критично важливий доступ у надзвичайних ситуаціях. Для сценаріїв супутникового зворотного зв'язку варіанти використання включають, наприклад, фіксований зворотний зв'язок між BS у віддаленій області і CN, а також зворотний між рухомою BS, розгорнутої в поїзді, і CN.

Вимоги охоплюють супутниковий доступ на основі NTN RAN для доступу, так і варіанти використання транзитного з'єднання, а також можливість використання супутникових радіотехнологій. Сучасні наземні системи зазвичай розгортаються таким чином, що вони забезпечують покриття лише в межах однієї країни, виконуючи відповідні нормативні зобов'язання цієї конкретної країни. Однак, супутникові радіосистеми можуть охоплювати кілька країн або міжнародні води. Дослідження архітектурних аспектів використання супутникового доступу 5G полягає у вивченні впливу підтримки супутникового доступу та транзитного з'єднання в системах 5G з метою повторного використання існуючих рішень. Ядро мереж 5G (5GC) передбачає фіксовані наземні зони спостереження (англ. tracking areas, TAs), і навіть те, що ідентифікатори (ID) стільників застосовуються для конкретних географічних зонах. Ідентифікатори TAs та ідентифікатори стільників використовуються в 5GC і на рівні послуг як інформація про місцезнаходження UE. Припускаючи, що наземні фіксовані TAs і що NTN RAN повідомляють ідентифікатори стільників, які можуть бути зіставлені з географічними областями, це гарантує, що 5GC і рівень послуг можуть продовжувати використовувати ідентифікатори UE, навіть якщо вони рухаються.

Потенційно широке охоплення супутниковими радіосистемами у багатьох країнах є проблемою, коли справа доходить до виконання нормативних вимог. Функція управління доступом та мобільністю (англ. access and mobility management function, AMF) може потребувати перевірки того, що UE знаходиться в зоні (країні), яку AMF може обслуговувати, як показано на рис.2. Перевірка може здійснюватися за допомогою RAN.

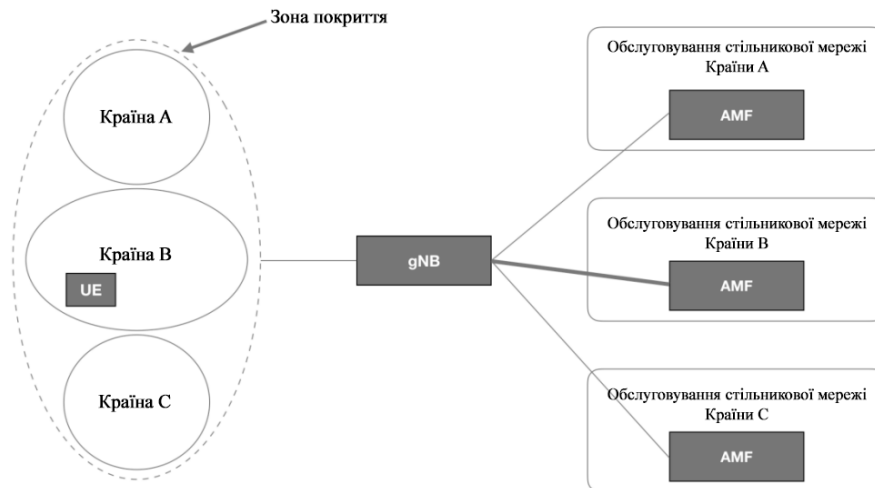


Рис. 2. Супутниковий доступ, що охоплює декілька країн та gNB, підключений до стільникових мереж, що обслуговують різні країни

Структура якості обслуговування (QoS) 5G має бути повторно використана з невеликими покращеннями. Зокрема, при використанні супутника GEO супутникове з'єднання може робити значний внесок у наскрізну затримку, яка в багатьох випадках може виходити за межі того, що сьогодні дозволено стандартизованими класами QoS 5G. Ймовірно, знадобиться деяке коригування існуючих класів QoS 5G або визначення нових класів QoS 5G.

Одним із рішень є технологія доступу, що використовується UE (наприклад, LTE або WiFi). Щоб зробити це можливим для різних типів супутників NR NTN (LEO, MEO, GEO), а також дозволити диференціацію з наземним NR. Це дозволить мережевим функціям 5GC керувати сеансом, політичними регламентами, нарахуванням оплати, а також на рівні обслуговування (AF) знати, коли UE використовує супутниковий доступ.

У 2019 році SA5 розпочала дослідження аспектів управління та оркестрування з інтегрованими супутниковими компонентами у мережі 5G [8]. Основна мета – вивчити бізнес-ролі, а також послуги, управління мережею та оркестрування мережі 5G з інтегрованими супутниковими компонентами. Об'єм включає супутниковий доступ на основі NTN RAN, так і супутниковий доступ, не пов'язаний з 3GPP, а також аспекти транзитного з'єднання. Мета полягає в тому, щоб повторно використовувати існуючу бізнес-модель, управління та оркестрування поточної мережі 5G, щоб мінімізувати вплив.

Результат дослідження задокументований у [8], який включає варіанти використання, а також потенційні вимоги та рішення, наприклад, для управління та моніторингу компонентів gNB та управління мережевим сегментом. Порівняно з наземним NR, впливи в основному відбуваються через сценарії LEO/MEO, де компоненти gNB, такі як gNB-DU, розташовані на борту супутникових апаратів і, таким чином, будуть переміщатися щодо Землі. Інші покращення необхідні через тривалі затримки, які впливають на деякі функції моніторингу та ключові показники ефективності. Для покращення ефективності запропоновано концепції мереж, що самоорганізуються (англ. self organizing network, SON) для 5G необхідно, а також обробка вимірювань робочих характеристик, які використовують процес HARQ, що може бути недоступний при використанні супутникової RAN. Крім того, функції моніторингу, що підтримують використання балансування навантаження між різними радіотехнологіями, повинні бути розширені, щоб охопити балансування навантаження між наземною RAN та не наземною RAN.

Висновки

Безперервна еволюція технології 5G спрямована на підвищення продуктивності та вирішення нових варіантів використання. Властива технології 5G гнучкість забезпечує міцну основу для її адаптації для підтримки неназемних мереж NTN. NTN та, особливо, мережі міжсупутникового зв'язку є складними системами, для проектування яких необхідний

цілісний підхід. В проведеному аналізі надано огляд сучасного стану роботи NTN в рамках 3GPP, детально пояснені аспекти проектування. Показано, що реалізація технологій 5G для неназемних мереж є реальністю. Але необхідні не лише стандартизація, а й подальші дослідження аспектів проектування NTN. Будемо сподіватись, що технології 5G відіграватиме важливу роль у забезпеченні зв'язку з космосу в найближчі роки.

Список використаної літератури

1. EMEA Satellite Operators Association, “ESOA satellite action plan for 5G standards,” white paper. [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://esoa.net/wp-content/uploads/2018-06-ESOA-5G-standards.pdf> (29.10.2021)
2. X. Lin et al., “5G New Radio evolution meets satellite communications: Opportunities, challenges, and solutions,” in 5G and Beyond: Fundamentals and Standards, X. Lin and N. Lee, Eds. Springer, 2021.
3. RP-193235, “Study on NB-IoT/eMTC support for non-terrestrial network”, 3GPP TSG-RAN Meeting #86, December 2019 [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3747> (29.10.2021)
4. M. Giordani and M. Zorzi, “Non-terrestrial communication in the 6G era: Challenges and opportunities,” arXiv preprint arXiv:1912.10226, December 2019.
5. F. Rinaldi et al., “Non-terrestrial networks in 5G & beyond: A survey,” IEEE Access, vol. 8, pp. 165178-165200, 2020.
6. TR 38.811, “Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks,” V15.4.0, October 2020. [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3234> (30.10.2021)
7. TR 22.822, “Study on using satellite access in 5G,” V16.0.0, August 2018. [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3372> (30.10.2021)
8. TR 28.808, “Study on management and orchestration aspects of integrated satellite components in a 5G network,” V1.1.0, January 2021. [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3617> (30.10.2021)

Автори статті

Сивик Олександр Степанович – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.
Топчій Владислав Миколайович – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.
Шеховцов Владислав Сергійович – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.
Лазебний Сергій Геннадійович - аспірант, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.
Березнюк Андрій Володимирович - аспірант, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.
Кондратенко Владислав Андрійович - студент, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Syvuk Oleksandr Stepanovich – master, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.
Topchii Vladyslav Mykolayovych – master, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.
Shekhovtsov Vladyslav Serhiyovych – master, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.
Lazebnyi Serhii Hennadiiovych - postgraduate, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.
Bereznyuk Andriy Volodymyrovych - postgraduate, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.
Kondratenko Vladyslav Andriiovych – student, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Дата надходження в редакцію 03.11.2021 р.

Рецензент: д.т.н., професор А.О. Макаренко