

Яковець В.П., Горохов О.С., Колесніков О.Е.,
Руденко С.В., Гарячий А.Л., Швець Д.М.

ПРОБЛЕМИ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ ІНТЕГРОВАНОЇ СУПУТНИКОВО-НАЗЕМНОЇ NTN-МЕРЕЖІ

Yakovets V.P., Gorokhov O.S., Kolesnikov O.E., Rudenko S.V., Garyachy A.L., Shvets D.M.
Problems of implementation of integrated satellite-ground NTN-network. The article is devoted to the discussion of challenges that arise during the rapid technological progress in satellite communication systems. The paper proposes an integrated satellite-ground system for systems of the 5G generation and above, discusses its architecture, methods and problems of its implementation, and scenarios for the use of the described system. Application areas requiring the depicted integrated architecture are described, and how this flexible multi-technology system can be used to provide global coverage and reliable access, provide transport communication via a satellite link, and data processing and content caching at the mobile edge. A multi-level network architecture with satellite and terrestrial elements will allow to create a telecommunications network with minimal delay, high deployment speed, guaranteed high quality of service and dynamic scalability, which can be controlled depending on the degree of system load and user needs in real time. Among the necessary technological solutions required for the successful implementation of the proposed system in the implementation of 5G are the following: millimeter-band communication, multi-access edge computing, network management and sharing, and spectrum sharing solutions.

Key words: NTN, 5G, MEC, convergent network.

Яковець В.П., Горохов О.С., Колесніков О.Е., Руденко С.В., Гарячий А.Л., Швець Д.М.
Проблеми імплементації інтегрованої супутниково-наземної NTN-мережі. Стаття присвячена обговоренню викликів, що постають під час швидкого технологічного прогресу у супутникових системах зв'язку. В роботі запропонована інтегрована супутниково-наземна система для систем покоління 5G і вище, обговорюються її архітектура, методи та проблеми її імплементації і сценарії застосування описаної системи. Описуються сфери застосування, в яких необхідна зображена інтегрована архітектура, та визначаються способи використання цієї гнучкої мультитехнологічної системи для забезпечення глобального покриття та надійного доступу, надання транспортного зв'язку через супутниковий канал та обробки даних та кешування контенту на мобільній периферії. Багаторівнева мережева архітектура з супутниковими та наземними елементами дозволить створити телекомунікаційну мережу з мінімальною затримкою високою швидкістю розгортання, гарантовано високою якістю обслуговування та динамічною масштабованістю, що може керуватись в залежності від ступеню навантаження системи та потреб користувачів в реальному часі. Серед необхідних технологічних рішень, потрібних для успішної реалізації запропонованої системи при імплементації 5G, наводяться наступні: зв'язок у міліметровому діапазоні, граничні обчислення з множинним доступом, керування та поділ мережі та рішення зі спільного використання спектру.

Ключові слова: NTN, 5G, MEC, конвергентна мережа.

Вступ

5G - це мультирадіосистема, побудована на нових високопродуктивних інтерфейсах з малою затримкою та конвергенції існуючих радіотехнологій, таких як LTE та WiFi, у повсюдні мережі радіодоступу. У цьому документі ми приділимо особливу увагу на наступні варіанти використання. 1) Як технологія 5G може бути використана для підвищення безпеки дорожнього руху? Яку роль у цьому відіграють супутники? 2) Які найбільші проблеми із підключенням для автономних транспортних засобів? Вибрані варіанти використання являють собою області, де супутникові та наземні системи відіграють важливу роль у задоволенні вимог до надійності, пропускної спроможності та затримки, забезпечуючи поінформованість про місцезнаходження та передачу критичної інформації між різними об'єктами. Між цими випадками є деякі очевидні відмінності. Наприклад, вимоги до затримки для виявлення перешкод на шляху автомобіля на дорозі та реагування на них мають бути дуже швидкими, а критична інформація не повинна передаватися через супутник.

Постановка завдання. Багаторівнева мережева архітектура з інтегрованими елементами супутникової та наземної мережі дозволить створити систему надання телекомунікаційних послуг з мінімальною затримкою, високою швидкістю розгортання, гарантовано високою якістю обслуговування та динамічною масштабованістю, що може керуватись в залежності від ступеню навантаження системи та потреб користувачів в реальному часі [5]. Реалізація даної системи зв'язку має великий потенціал, але для її успішної імплементації необхідно задовільнити ряд потреб, серед яких необхідними є повноцінна імплементація технологій граничних обчислень множинного доступу, технологій керування конвергентною мережею та її поділом, а саме спільним доступом до спектру, в складі повноцінного упровадження 5G.

Згідно ІТУ-R, три основні варіанти використання 5G: 1) Розширений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB – Enhanced Mobile Broadband), що означає покращення існуючих мереж за рахунок більш високих швидкостей передачі даних та безперебійної роботи [6]. 2) Масовий зв'язок машинного типу (mMTC – Massive Machine Type Communications), тобто дуже велика кількість пристроїв з низькою швидкістю передачі даних і дуже тривалим терміном служби батареї; 3) Наднадійний зв'язок з малою затримкою (URLLC – Ultra-Reliable and Low Latency Communications), наприклад, для інтелектуальних мереж, зв'язку типу «транспортний засіб до X» (V2X – Vehicle-to-Everything) та безпеки дорожнього руху [7]. Гібридні супутниково-наземні системи необхідні для задоволення потреб багатьох нових сценаріїв, таких як автономне керування як на дорогах, так і на морі, масовий машинний зв'язок та забезпечення високоякісного Інтернету в будь-якій точці світу.

Системи 5G працюють у декількох діапазонах частот, і одним з найважливіших аспектів інтегрованих мереж є пошук та визначення діапазонів частот для роботи. В даний час проводяться дослідження того, чи можливе спільне застосування деяких з цих смуг між різними мережами, при виконанні вимог, встановлених сценаріями застосування. Європейська комісія (ЕС) визначила три нові діапазони 5G у Європі [8], а саме:

1) Діапазон 700 МГц (694–790 МГц), широкозонне покриття, послуги mMTC та URLLC. Цей діапазон підходить, наприклад, для нових послуг, таких як підключені між собою автомобілі та інтелектуальні датчики. У цьому діапазоні можна забезпечити покриття всередині приміщень.

2) Основний новий діапазон 3,4-3,8 ГГц підходить для міських eMBB. Цей діапазон може забезпечити смугу пропускання несучої 100 МГц та забезпечити швидкість передачі даних в один Гбіт/с.

3) 24,25-27,5 ГГц для точок доступу та послуг eMBB. Очікується, що загальний діапазон 28 ГГц (США та Корея) дозволить досягти загальної економії за рахунок масштабу. Доступна смуга пропускання несучої в кілька 100 МГц, що дозволяє забезпечити швидкість передачі >10 Гбіт/с.

Аналіз останніх досліджень. Супутникова індустрія в даний час знаходиться на етапі великої трансформації через швидкий технологічний прогрес у малих супутникових системах, розвитку мегагрупвань, супутникових систем з дуже високою пропускнуою здатністю, інтеграції радіосистем в 5G і вище, а також тенденції з'єднання всього один з одним. На відміну від мовлення, яке довгий час було основним завданням супутникового зв'язку, широкопasmовий зв'язок та мобільні системи (літаки, судна та рухомі платформи) розглядаються як основні рушійні сили майбутнього [1]. Існує необхідність як визначити найбільш важливі галузі застосування супутників, так і інтегрувати їх як невід'ємну частину майбутньої «мережі мереж» для забезпечення з'єднань, особливо у віддалених районах з недостатнім обслуговуванням.

Очікується, що 5G може стати важливим драйвером цифровізації в автомобільній промисловості [2]. У цій статті ми досліджуємо автомобільні сервіси, які можуть підвищити безпеку дорожнього руху та реалізуються завдяки інтегрованій архітектурі супутникової наземної мережі 5G. Це серйозна проблема в усьому світі, оскільки ефективно функціонуючі та безпечні дорожні мережі є основною вимогою для кожної країни. У цій роботі насамперед

обговорюються технічні вимоги та потенційні рішення щодо підвищення безпеки дорожнього руху з використанням багаторівневої супутниково-наземної мережевої архітектури.

Хмарні обчислення та хмарні мережі є основними факторами, що дозволяють створити індивідуалізовану мережеву інфраструктуру 5G для конкретних додатків та послуг, а також забезпечити плавну інтеграцію різних гетерогенних мереж, таких як супутникові мережі [3]. Найбільш багатообіцяючі засоби реалізації, що впливають як на архітектурні рішення, так і на механізми, включають периферійні обчислення з множинним доступом (MEC), програмно-визначувані мережі (SDN) і віртуалізацію мережевих функцій (NFV), які забезпечують економічне розгортання та час виконання мережевих функцій як тільки програмне забезпечення та динамічно програмовані мережі через централізовані точки управління. Програмно-визначені радіостанції (SDR) можуть забезпечити гнучкість терміналів, що підтримують інтеграцію мереж. У описаній системі використовуються інтелектуальні механізми вибору радіодоступу та маршрутизації. Однією з переваг технологій SDR/SDN і NFV є те, що вони можуть дозволити реалізувати супутникові мережі, які можуть оновлюватися у реальному часі, на відміну від поточних рішень, які відносно фіксовані на весь термін служби, зазвичай, від 10 до 15 років [4]. Однак обчислення на стороні супутника частково обмежені, наприклад, проблемами теплового проектування та бюджетом потужності

Метою роботи є опис архітектури системи, визначення найважливіших технологічних досягнень та розгляд проблем імплементації. Окремі варіанти використання являють собою області, де як супутникові, так і наземні системи відіграють важливу роль у задоволенні потреб у надійності, пропускну здатності та затримці, забезпечуючи поінформованість про місцезнаходження та передачу критичної інформації між різними об'єктами. Описано найбільш потенційні діапазони частот, включаючи новий діапазон 5G 24,25-27,5 ГГц, де методи спільного використання спектру, швидше за все, будуть використовуватися для забезпечення супутникової, так і наземної передачі. Ми обговоримо, як використовувати спільне використання радіочастот за допомогою бази даних для ефективного використання радіоспектру.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Передбачувана гібридна супутниково-наземна система 5G показана на рис. 1. Для ясності показана лише архітектура системи високого рівня та її основні компоненти. Модель конвергентної мережі передбачає архітектуру переважно супутникової мережі, що складається із супутників, які підключаються до супутникових шлюзів, так званих концентраторів, і супутникових терміналів через асиметричні канали. У цій спрощеній моделі немає ніяких архітектурних відмінностей між геостаціонарними (GEO) супутниками і угрупованнями негеостаціонарних супутників. Крім того, не передбачається, що супутники надають обчислювальні ресурси, які б дозволили супутникам підтримувати мережі радіодоступу (RAN – Radio Access Network) або основні мережеві функції наземних мереж [8].

Передбачувана гібридна супутниково-наземна система 5G показана на рис. 1. Для ясності показана лише архітектура системи високого рівня та її основні компоненти. Модель конвергентної мережі передбачає архітектуру переважно супутникової мережі, що складається із супутників, які підключаються до супутникових шлюзів, так званих концентраторів, і супутникових терміналів через асиметричні канали. У цій спрощеній моделі немає ніяких архітектурних відмінностей між геостаціонарними (GEO) супутниками і угрупованнями негеостаціонарних супутників. Крім того, не передбачається, що супутники надають обчислювальні ресурси, які б дозволили супутникам підтримувати мережі радіодоступу (RAN – Radio Access Network) або основні мережеві функції наземних мереж.

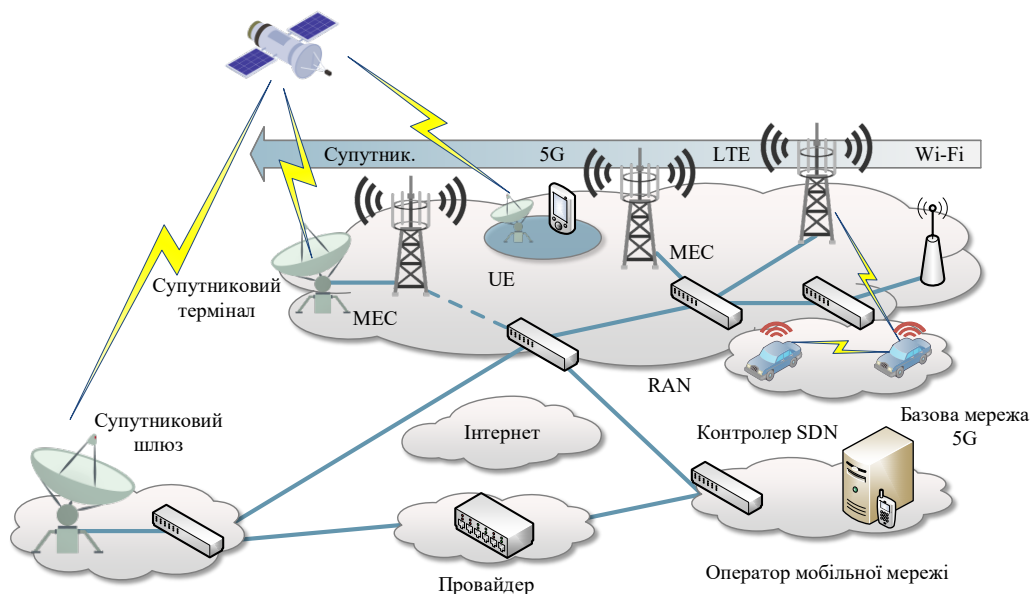


Рис. 1. Інтегрована супутниково-наземна мережа.

На рисунку показана конвергентна система, яка включає, крім супутника, ряд технологій радіодоступу (RAT), таких як нові радіостанції 5G, LTE і Wi-Fi. Для зв'язку між автомобілями можуть використовуватися радіостанції, розроблені спеціально для цих цілей. UE тут складається з мультирадіотерміналу (інтегрованого пристрою зв'язку будь-якого типу), включаючи супутниковий термінал. Передбачається, що транспорт RAN, включаючи супутникове ядро, підтримує SDN та колективну оренду (multitenancy). Ядро 5G підтримує безперерйну взаємодію між наземним та супутниковим сегментами та забезпечує управління QoS при передачі даних, наприклад, шляхом виділення частини ресурсів для додатків з більш високим пріоритетом.

Підтримка колективної оренди має важливе значення, оскільки практично різні RAN і транспортні мережі часто управляються окремими мережевими операторами. Технології віртуалізації та поділу мережі дозволяють різним операторам спільно використовувати мережеві ресурси з іншими (віртуальними) операторами та забезпечувати наскрізне з'єднання через межі операторів. Мережа контролюється централізованим об'єктом, контролером SDN, який контролює мережеві пристрої та має глобальні знання про стан мережі в межах адміністративного регіону.

Крім того, MEC надає можливості хмарних обчислень на межі мережі. Він може надавати локалізовані обчислювальні ресурси та ресурси зберігання додатків, а також інформацію в режимі реального часу про стан локальної мережі. Периферійні обчислення потрібні для надання послуг з низькою затримкою. Супутник може забезпечити надійний транзитний зв'язок для периферійних обчислень, оскільки транзитний зв'язок не впливає на затримку доставки послуг.

Програмні мережі, що забезпечують гнучке керування мережним трафіком з високим ступенем деталізації, разом з MEC, що дозволяє надавати масштабовані розподілені послуги та мережеві функції, створюють високоеластичну інтегровану супутниково-наземну систему. Ключем до інтеграції супутникових та наземних мереж є правильні мережеві абстракції та загальна структура контролю та управління. У цьому контексті технології SDN та NFV є необхідними помічниками, які підтримують гнучке розгортання функцій та можливість реконфігурації при наданні послуг.

Ця досить загальна інтегрована супутниково-наземна архітектура охоплює різні варіанти використання та сценарії розгортання мережевих послуг, такі як:

- 1) Глобальне покриття мережі та надійний доступ;

- 2) Транспортний зв'язок через супутникову лінію зв'язку, яка також може використовуватися як резервний для наземного транзитного зв'язку;
- 3) Обробка даних та кешування контенту на мобільній периферії.

Необхідні технологічні рішення для імплементації системи. Дуже важливими аспектами мереж 5G з технологічної точки зору є MIMO, зв'язок у міліметровому діапазоні хвиль та ущільнення мереж. Крім того, необхідні досягнення на мережевому рівні для підтримки ефективної роботи різних радіотехнологій та програм. Хмарні обчислення та хмарні мережі разом з такими технологіями, як SDN, NFV і MEC, є основними рушійними силами для створення мережевої інфраструктури 5G, що настроюється, для конкретних додатків і послуг, а також для плавної інтеграції різних гетерогенних мереж [9].

Хоча mMTC є однією з основних рушійних сил складного радіодоступу, супутники, ймовірно, також гратимуть роль у забезпеченні гетерогенного доступу, особливо в малонаселених або важкодоступних місцях. Супутники розширяють стільникові мережі 5G на морі, повітрі та віддалених районах. Супутниковий зв'язок разом з локалізованими послугами 5G MEC забезпечить високий потенціал для надання критично важливих послуг у зонах стихійного лиха і також може стати найбільш цінним засобом впровадження базових інтернет-послуг у країнах, що розвиваються. Супутникові мережі забезпечать відмовостійкість для покращення рівня обслуговування, зниженого через руйнівні умови навколишнього середовища, такі як землетрус, або переважання пропускнуої спроможності, наприклад при тимчасовому зростанні числа користувачів.

Граничні обчислення з множинним доступом. MEC забезпечує можливість розміщення сторонніх додатків на мобільних периферійних вузлах, розгорнутих на радіовузлах, точках агрегації або межі базової мережі. MEC створює нові можливості для мережевих операторів та додатків. По-перше, це забезпечує кращу підтримку додатків із низькою затримкою, розміщуючи їх у безпосередній близькості від користувачів, уникаючи проходження трафіку додатків через базову мережу. По-друге, мережеві оператори можуть надавати периферійні послуги, такі як визначення місцезнаходження та радіоінформацію, стороннім мобільним периферійним додаткам, щоб вони могли оптимізувати їхню продуктивність і швидкість реагування. Ґрунтуючись на концепції хмари, можливості MEC можна зробити динамічними та масштабованими. MEC відкриває набагато більше можливостей для розробників у мобільних мережах. MEC також забезпечує повністю локалізовані та ізольовані системи та сервіси зі зменшеним трафіком даних у хмарні сервіси, коли необхідні лише дані управління, якщо вони взагалі прямують назовні з локальної мережі.

Керування мережею та поділ мережі. Технології програмування мережі та віртуалізації функцій дозволяють розробляти нові механізми оптимізації, такі як розподіл мережі. Це можна використовувати для реалізації кількох окремих функціональних об'єктів та розподілу ресурсів у мережах на основі різних вимог до обслуговування, таких як якість обслуговування або безпека даних. Мережевий поділ може використовувати переваги ефективного розподілу ресурсів та оптимізації базової мережі для надання послуг з певними властивостями. Поділ можна використовувати в таких складних випадках, коли кілька операторів віртуальної мобільної мережі використовують ту саму фізичну мережу, якою управляє постачальник віртуалізованої інфраструктури [10]. Віртуальні оператори можуть контролювати власні сегменти і надавати підсегменти для використання своїм клієнтам. Віртуалізована інфраструктура також є однією з потенційних технологій побудови тимчасової ізольованої мережної інфраструктури.

Спільне використання спектру. Регламентуючі рішення та дослідження спільного використання спектру, проведені в супутникових діапазонах останніми роками, ясно показали

важливість розробки методів спільного використання відповідно до конкретних характеристик супутникової системи, таких як довгі лінії зв'язку та затримки передачі, а також широкі зони покриття. Велика робота з спільного використання спектру була проведена в наземній сфері, але через безліч відмінностей деякі методи не можуть застосовуватись у супутникових діапазонах, в той час як інші методи вимагають модифікацій. Найбільш перспективні методи спільного використання спектру включають управління потужністю, формування променя, стрибкоподібну перебудову променя та бази даних спектру. Останнім часом міркування щодо спільного використання спектру еволюціонували від підходу, що не вимагає ліцензування, з неконтрольованим перешкодовим середовищем до більш контрольованих архітектур з кращими умовами експлуатації. Методи баз даних надали перевагу як у наземній, так і в супутниковій сферах в порівнянні з зондуванням спектру при отриманні інформації про поточне використання спектру, оскільки вони забезпечують кращий захист. Це справедливо і для інтегрованої супутниково-наземної системи 5G та вище.

Основний принцип використання бази даних спектру в будь-якому діапазоні частот полягає в тому, що вторинному користувачу не дозволяється доступ до спектру доти, доки він не отримає з бази даних інформацію про те, що канал, на якому він має намір працювати, вільний у місці знаходження користувача. Прикладом останніх підходів до спільного використання даних за допомогою бази даних є спільний ліцензований доступ (LSA – Licensed Shared Access) [14]. Відповідно до підходу LSA діючі оператори зобов'язані надавати в базу даних апріорну інформацію про використання ними спектра в необхідній області. Вони чітко повідомляють, де, коли та які частини смуг частот доступні для вторинного використання. Для управління системою LSA, швидше за все, буде потрібна третя сторона, оскільки оператори часто не бажають ділитися інформацією про використання свого спектра з іншими користувачами.

Підвищення безпеки дорожнього руху за допомогою 5G. Транспортні послуги, спрямовані на підвищення безпеки дорожнього руху, зазвичай пов'язані з наданням автоматичних повідомлень про аварії, повідомлень про поломки транспортних засобів, інформацію про дорожній рух та інформаційно-розважальні послуги. Досі продуктивність технології IEEE 802.11p (званої ITS-G5 в Європі та Dedicated Short Range Communications, DSRC в США) і пов'язані з нею правила значною мірою обмежували типи послуг, що підтримуються між транспортними засобами та придорожньою інфраструктурою. Крім того, потреба у виділеній інфраструктурі обмежує широкомасштабне використання послуг. 5G та MEC розширяють можливості впровадження послуг із забезпечення безпеки дорожнього руху завдяки широкій пропускну здатності, можливостям розподіленої обробки та зберігання, а також дотримання суворих вимог до затримки. Більше того, поділ мережі дозволить підтримувати навіть найсуворіші вимоги в одній і тій же фізичній мережній інфраструктурі, яка спільно використовується з іншими типами послуг (наприклад, медіа та розваг).

Мережі 5G забезпечать більш широкий збір даних з датчиків транспортних засобів у хмару, ніж це можна ефективно зробити сьогодні. Наприклад, ресурсомісткі відео- або радіолокаційні дані можна збирати та аналізувати своєчасно та масштабовано завдяки 5G та MEC. Отриману інформацію можна використовувати для автоматизації та оптимізації операцій з утримання доріг (наприклад, прибирання снігу чи ремонт), щоб виправляти та попереджати користувачів про небезпечні дорожні умови. Її також можна використовувати для реалізації більш точних та локалізованих метеорологічних послуг, щоб інформувати учасників дорожнього руху про майбутні складні погодні умови. Крім того, у майбутньому послуги з підтримки автономного водіння матимуть важливе значення для безпеки.

Проте до послуг пред'являються дуже різноманітні вимоги, коли це стосується можливості підключення. Критично важливі служби, такі як екстрені служби або служби, що підтримують автономне водіння, вимагають меншої затримки та вищої надійності порівняно, наприклад, із загальною інформацією про погоду або оновлення програмного забезпечення. Аналогічно, пропускна спроможність, необхідна для транспортних служб, залежить від того, які дані збираються з транспортних засобів, як часто і в якому масштабі. Тут передача відео високої чіткості або несжатих зображень у реальному часі або синхронізація картографічних даних високої чіткості між транспортним засобом та хмарою споживають набагато більше трафіку, ніж передача інших даних датчиків чи попереджень. Роль супутників в таких сценаріях полягає у забезпеченні магістрального зв'язку на додаток до служби позиціонування. Частина V2X-зв'язку також може бути реалізована за допомогою 802.11p, якщо існує необхідна інфраструктура.

Висновки

У цій роботі обговорюється інтегрована супутниково-наземна система для 5G і вище, її архітектура, методи та проблеми її імплементації і сценарії застосування описаної системи. Описані сфери застосування, в яких необхідна зображена інтегрована архітектура, та визначили способи використання цієї гнучкої мультитехнологічної системи, серед яких: глобальне покриття мережі та надійний доступ, транспортний зв'язок через супутникову лінію зв'язку, яка також може використовуватися як резервний для наземного транзитного зв'язку, обробка даних та кешування контенту на мобільній периферії. Серед можливих способів застосування системи зазначена безпека дорожнього руху, окреслені основні вимоги, які висуватимуться до системи в разі її експлуатації для цієї мети. Хоча очікується, що 5G вирішить багато технічних проблем, існує також низка проблем, що виникають з економічних аспектів та питань, таких як безпека та конфіденційність, які необхідно вирішити, перш ніж послуги із гарантування безпеки дорожнього руху дійсно зможуть стати реальністю. Наприклад, ключовим моментом буде розробка життєздатних бізнес-моделей та доступного обладнання для спільного використання наземних та супутникових мереж для надання послуг транспортним засобам та користувачам. Вирішення цих проблем є важливою частиною для майбутніх досліджень.

Список використаної літератури

1. 5G and Beyond Networks for 3D MIMO Using Artificial Intelligence in 5G Network / R. Yadav et al. Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2273, no. 1. P. 012007. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2273/1/012007>.
2. Peters S., Chun J.-H., Lanza G. Digitalization of automotive industry – scenarios for future manufacturing. Manufacturing Review. 2016. Vol. 3. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1051/mfreview/2015030>.
3. Beri R., Behal V. Cloud Computing: A Survey on Cloud Computing. International Journal of Computer Applications. 2015. Vol. 111, no. 16. P. 19–22. URL: <https://doi.org/10.5120/19622-1385>.
4. Vasudevan D., Nayak S. Software-Defined Networks. IEEE Potentials. 2018. Vol. 37, no. 5. P. 21–24. URL: <https://doi.org/10.1109/mpot.2015.2448733>.
5. Кременецька Я. А. Багаторівнева модель наземних і неназемних телекомунікацій із застосуванням технологій оптичного безпроводового зв'язку / Я. А. Кременецька, А. О. Макаренко, Н. В. Руденко, А. В. Березнюк, С. Г. Лазебний, В. П. Яковець // Зв'язок. - 2021. - №3 (151). - С. 3-11. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2021.030311>

6. URLLC and eMBB in 5G Industrial IoT: A Survey / B. S. Khan et al. IEEE Open Journal of the Communications Society. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/ojcoms.2022.3189013>.
7. Brandl O. V2X traffic management. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik. 2016. Vol. 133, no. 7. P. 353–355. URL: <https://doi.org/10.1007/s00502-016-0434-6>.
8. Introduction to the 3GPP-defined NTN standard: A comprehensive view on the 3GPP work on NTN / M. El Jaafari et al. International Journal of Satellite Communications and Networking. 2023. URL: <https://doi.org/10.1002/sat.1471>.
9. Delay Minimization for Massive MIMO Assisted Mobile Edge Computing / M. Zeng et al. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69, no. 6. P. 6788–6792. URL: <https://doi.org/10.1109/tvt.2020.2979434>.
10. Network Slicing in 5G: Survey and Challenges / X. Foukas et al. IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, no. 5. P. 94–100. URL: <https://doi.org/10.1109/mcom.2017.1600951>.

Автори статті

Яковець Всеволод – аспірант, старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Горохов Олександр – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Колесніков Олексій – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Руденко Сергій – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Гарячий Антон – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Швець Дмитро – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Authors of the article

Yakovets Vsevolod – postgraduate, senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

Oleksandr Gorokhov – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

Oleksiy Kolesnikov – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

Serhiy Rudenko – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

Garyachy Anton – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

Dmytro Shvets – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.