

ОГЛЯД ПЕРСПЕКТИВНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ НА ПОТРЕБУ УКРАЇНИ

¹Капштик С.В., ²Наритник Т.М., ¹Присяжний В.І.

¹ Національний центр управління та випробувань космічних засобів

² Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського

E-mail: s.kapshtyk@spacecenter.gov.ua, t.narytnyk@ukr.net,
ncuvkz@spacecenter.gov.ua

REVIEW OF PROSPECTIVE SATELLITE SYSTEMS FOR UKRAINE'S NEEDS

There is presented an overview of promising satellite systems, the services of which are used and can be implemented in Ukraine in the near future. There are shown the possibilities of implementing the 5G architecture in satellite information systems and trends in the development of NTN (Non terrestrial networks) technology. Modern geostationary (GEO) High-Throughput Satellite systems (HTS), Very High-Throughput and Ultra High-throughput Satellite systems (VHTS and UHTS) are considered in terms of their ability to theirs interact with 5G networks on the example of the Viasat-3 (USA) and Ovszon-3 (Sweden, USA) satellites. The opportunity to establish the Regional System for Ukraine based on the technologies of HTS systems and a small GEO satellite of Astranis (USA) is noted. The tendency to combine the GEO component resource with the LEO and MEO components is identified on the example of the O3b/mPOWER systems of SES (Luxembourg) and the Eutelsat OneWeb system (France). It is shown that the manufacturers of user terminals All.Space and Kymeta offer appropriate solutions based on flat panels with phased array antennas for such services. The EU's project of secure satellite communication system IRIS² is developed as multi-orbit system based on such trends. The article shows innovations in the Starlink system regarding the using of laser communication for establish the Inter-Satellite-Links, the introduction of satellite access services as a cellular network base station in space, and intentions to apply the higher frequency bands and lower orbits. The tendency of satellite interaction with 4G, 5G networks to provide services by the AST Space Mobile system outside the service areas of terrestrial networks for traditional terminals such as smartphones and tablets is noted. The influence of the Cluster Launch Method of spacecraft on the Satellite Telecommunication Systems development is considered on the examples of satellite buses such as Starlink V0.9, Meridian Space (SpinLaunch), Flatellite (Rocket Lab), Enterprise, and SmallSat GEO™ (Terran Orbital). In conclusion, aspects of the development of satellite systems for Internet-of-Things services are considered.

1. Вступ

Події останніх років, що відбуваються на території України і пов'язані із відбиттям агресії РФ, та розвиток технологій супутникових інформаційних систем призвели до формування нових поглядів та вимог до цих систем. Відомо, що на початковому етапі повномасштабної війни впровадження послуг низькоорбітальної супутникової системи ширококутового доступу (ССШД) Starlink дозволило в стислі строки забезпечити скоординоване та контрольоване управління функціонуванням Сил оборони України. Разом із тим використання послуг тільки однієї супутникової системи призвело до критичної залежності систем зв'язку, управління та інформаційного забезпечення Сил оборони України від цієї системи, і створило передумови для загрози порушення функціонування цих інформаційних систем. Тому актуальним завданням став пошук альтернативних рішень, що можуть бути реалізовані шляхом залучення вже існуючих ССШД та систем, що знаходяться в стадії створення і формування орбітального угруповання та підготовки наземної інфраструктури.

Актуальність дослідження зумовлена зростаючим попитом на послуги супутникових

телекомунікаційних систем, особливо на послуги широкосмугового доступу, який сформований на підставі більш ніж трирічного досвіду використання терміналів і послуг системи Starlink в Україні.

Метою доповіді є провести аналіз існуючих та перспективних супутникових телекомунікаційних систем, послуги яких можуть бути впроваджені в Україні, визначити тенденції в розвитку таких систем.

2. Основна частина

2.1. Впровадження архітектури 5G до супутникових інформаційних систем. Розвиток технології наземних мереж NTN.

Архітектура мультиорбітальних супутникових систем, що передбачає безпосередню взаємодію між супутниками, що розташовані на різних орбітах

Розвиток технологій наземного мобільного широкосмугового доступу (НМШД) охоплює все більше технологій та сфер застосування технологій телекомунікацій. Це стосується і сегменту супутникових телекомунікаційних систем (СТС). Використання СТС рухається в напрямку від забезпечення підключення віддалених базових станцій (БС) мобільних операторів до магістральних каналів мережі радіодоступу і центрів мобільної комутації G2, або базової мережі EPC LTE. Важливий крок в подальшій інтеграції СТС до НМШД 5G зробила дослідницька група 3GPP в Релізі 17 [1]. В цьому документі введено поняття Неназемної мережі NTN (Non terrestrial networks), який визначає безліч сценаріїв зв'язку, починаючи від супутникового зв'язку і до зв'язку через повітряні станції, та враховує такі застосування, як керування польотом повітря-земля, або застосування в якості ретрансляторів безпілотних літальних апаратів. Особливе місце в технології NTN займає взаємодія із СТС, для яких передбачені різні сценарії зв'язку та використання супутників СТС на геостаціонарній орбіті (GEO), та на середній (MEO) і низькій навколоземній орбіті (LEO). Розглядаються різні зони покриття СТС та передбачено зв'язок між супутниками. Окремо потрібно виділити режим безпосереднього доступу чарунок стільникової мережі, де знаходяться термінали користувача (UE), до супутника D2C (Direct-to-Cell) [2].

Впровадження програмно-визначених мереж до мультиорбітальних систем

До особливостей систем 5G відноситься впровадження програмно-визначених мереж передачі даних SDN та віртуалізації мережевих функцій NFV. В ряді публікацій [3] розглядається це питання відносно архітектури NTN з D2S та з доступом через спеціалізовані термінали.

2.2. Створення геостаціонарних систем високої і надвисокої пропускної здатності, що забезпечують взаємодію з мережами та системами 5G.

Супутники Viasat-3

Архітектура сучасних СТС передбачає їх інтеграцію з архітектурою мереж 5G. Прикладом впровадження архітектури 5G в GEO системи є супутники серії Viasat-3 (США) [4]. Мережа супутників Viasat-3 має включати 3 супутники, що розташовані на GEO під взаємним кутом приблизно 120° для обслуговування практично всієї поверхні Землі. Корисне навантаження супутників побудовано за регенеративною схемою. Кожен супутник формує зону обслуговування із використанням майже тисячі надвузьких променів Ка-діапазону в таких регіонах: Америка; Європа, Близький Схід та Африка; Азіатсько-Тихоокеанський регіон [5]. Для формування надвузьких променів супутник обладнаний антеною діаметром 18 м. Загальна пропускна здатність кожного супутника становить понад 1 Тбіт/с та забезпечує динамічний перерозподіл пропускної здатності між променями. Швидкість передачі інформації до терміналу користувача становитиме до 100 Мбіт/с. Поява супутників серії Viasat-3 ознаменувала появу нового терміну: супутники з дуже великою пропускною здатністю VHTS (Very High-Throughput Satellite) та з ультра великою пропускною здатністю UHTS (Ultra-High Throughput Satellite). Україна, як й усі Європа, входять до зони обслуговування другого супутника серії Viasat-3.

Шведсько-американська система Ovation

В якості регіональної GEO системи супутникового зв'язку можна представити систему Ovzon (Швеція, США). Компанія Ovzon AB має власний GEO супутник і пропонує інтегровані послуги стаціонарного та рухомого супутникового зв'язку та передачі даних із використанням терміналів користувачів власної розробки [6]. Супутник Ovzon-3 обладнаний регенеративним корисним навантаженням на базі бортового процесора Ovzon (OBR) для створення mesh мережі в Ku-діапазоні з суверенним контролем. До відмінностей супутника також відноситься наявність керованих вузьких променів, орієнтація яких може змінюватись по командах з Землі. Для використання послуг супутника Ovzon-3 спеціально розроблена лінійка терміналів користувачів, що включає малогабаритні термінали із параболічними антенами типу Ovzon Medium W/H, що забезпечують прийом інформації на швидкості 20-100 Мбіт/с та передачу на швидкості 1-70 Мбіт/с. Також лінійка терміналів включає плоскі термінали Ovzon T6 OTR (прийом на швидкості до 120 Мбіт/с та передача – до 70 Мбіт/с) та Ovzon T7 OTR (прийом на швидкості до 60 Мбіт/с, передача – до 10 Мбіт/с). Компанія Ovzon AB підтвердила ефективність використання запропонованих рішень в ході натурного експерименту по віддаленому керуванню безпілотним ровером UGV, що був обладнаний терміналом Ovzon F50 на дослідницькому центрі Кіруна з пункту управління в Стокгольмі. Відстань становила 950 км.

Повернення до ідеології використання малих геостаціонарних супутників на сучасній технологічній базі із використанням підходів до архітектури HTS

В якості цікавої тенденції щодо створення GEO систем із регіональним покриттям є проект компанії Astranis (США) із використанням малих GEO супутників. На відміну від традиційних підходів, супутники Astranis мають стартову масу порядку 600 кг [7], що більш ніж в десять разів менша за стартову масу порядку 6500 кг сучасних GEO супутників. Особливу увагу викликає платформа Omega, що побудована із використанням технології супутників VHTS щодо формування зони обслуговування надвузькими променями в Ka-діапазоні, та обладнана цифровим корисним навантаженням прозорого типу із загальною пропускною здатністю понад 50 Гбіт/с. В конструкції супутника та його корисного навантаження використовуються сучасні технології програмно-визначеного радіо SDR, ефективної Холлівської русійної системи та радіаційно стійкої електроніки. Мала стартова вага супутників дозволяє забезпечувати кластерний запуск одночасно 4 супутників на GEO. Привабливість такого рішення для України полягає в можливості створити отримати власну СТС із супутником на GEO, що покриває виключно територію України і надає пропускну здатність, що порівняна із пропускною здатністю LEO систем як то Starlink.

2.3. Формування мереж надвисокої пропускної здатності на середній навколоземній орбіті. Комплексне поєднання ресурсу систем на середній навколоземній та геостаціонарній орбітах.

Система O3b/mPOWER компанії SES – система надвисокої пропускної здатності на середній навколоземній орбіті

Компанія SES (Люксембург), яка є провідним оператором супутникових систем на GEO та MEO завершує оновлення власного угруповання O3b за рахунок запуску супутників O3b/mPOWER [8]. Супутники знаходяться на орбіті висотою 8200 км в площині екватора. Орбітальне угруповання системи складається з 11 супутників. Така конфігурація дозволить забезпечити надання послуг на всій території України в режимі 24/7. Супутники побудовані на базі платформи Boeing-702 і обладнані цифровим корисним навантаженням та фазованими антенними решітками. Кожен супутник здатен формувати до 5000 незалежних керованих променів в Ka діапазоні із пропускною здатністю від 40 Мбіт/с до 10 Гбіт/с (для окремого променя). Компанія декларує можливість встановлення станції спряження безпосередньо на території замовника, тобто в Україні, що забезпечить підключення супутникового сегменту до національної магістральної мережі зв'язку та передачі даних. Система O3b/mPOWER призначена для

надання послуг для урядових структур, включаючи Сили Оборони, та для цивільних корпоративних і приватних користувачів. Для користувачів розроблена та сертифікована лінійка різних терміналів. Особливу увагу с точки зору мобільних користувачів привертають термінали Hydra-2, Hydra-4, розроблені компанією AllSpace [9]. Термінали забезпечують одночасну роботу із супутниками на GEO та МЕО в частотних діапазонах Ku та Ka, і використовують технологію формування керованих променів методом дійсної затримки випромінювання випромінювачів (TTD, True Time Delay).

2.4. Тенденції розвитку низькоорбітальних систем ширококосмгового доступу: цифрове регенеративне корисне навантаження, лазерні лінії зв'язку між супутниками, безпосередній доступ терміналів користувачів 4G, 5G до супутника.

Система Starlink впровадила оптичні ланки зв'язку між супутниками та розпочала формувати угруповання для послуг D2C

Компанія SpaceX та Starlink залишаються лідерами з впровадження перспективних рішень в ССШД Starlink. По-перше, SpaceX продовжує нарощування складу орбітального угруповання Starlink, збільшивши кількість функціонуючих супутників до 7105 одиниць (на орбіті знаходяться 7135 супутників). Зараз для продовження формування орбітального угруповання запускаються супутники типу Starlink V2-mini, маса яких становить ~560-700кг. Супутники використовують Ku та Ka діапазони. Кожен супутник формує 16 керованих променів Ku-діапазону до користувачів (на відміну від 8 променів в супутниках першого покоління Starlink V0.9). Корисне навантаження супутників Starlink забезпечують маршрутизацію потоків на борту.

Компанія Starlink впровадила лазерні лінії зв'язку між супутниками. Кожен супутник Starlink обладнаний трьома оптичними трансіверами. Оптичні лазерні лінії забезпечують передачі інформації зі швидкістю до 200 Гбіт/с і утворюють глобальну mesh-мережу для забезпечення послуг споживачам в будь якій точці на поверхні Землі [12]. Проведені експерименти показали, що лазерна система Starlink змогла з'єднати два супутники, що знаходяться на відстані понад 5400 кілометрів один від одного. Зв'язок був настільки довгим, що він прорізав атмосферу аж до висоти 30 кілометрів над поверхнею Землі, перш ніж з'єднання розірвалося. Лазерні лінії використовуються для зв'язку супутника Starlink з двома сусідніми супутниками в своїй орбітальній площині і з одним супутником в орбітальній площині, що перетинається для вирішення проблеми «зшивання» орбітального угруповання.

Введення до складу системи лазерних ліній зв'язку між супутниками дозволили змінити структуру тракту надання послуг. Точка присутності PoP (Point-of-Present) забезпечує підключення до провайдерів послуг та є вхідним інтерфейсом для системи Sytarlink. Точка присутності підключена лінією оптико-волоконного зв'язку до станції спряження (GateWay), яка забезпечує підключення супутників Starlink до наземної мережі зв'язку через окремий промінь Ka-діапазону до станції спряження. В залежності від розташування кореспондента, супутник здійснює маршрутизацію інформаційного потоку в промінь до користувача, або в оптичну лінію зв'язку між супутниками. Ділянка між точкою присутності PoP та терміналом користувача має наскрізне AES-шифрування.

Ще одним напрямком розвитку послуг системи Starlink є впровадження послуг безпосереднього доступу пристроїв користувачів як то смартфон та планшет, до супутника, тобто послуга типу D2C (Direct-to-Cell) [10,11]. Мережа Direct-to-Cell забезпечує підключення та безперешкодний доступ до текстових повідомлень, голосу та даних для телефонів та пристроїв LTE по всьому світу в смузі частот 1800 МГц. Послуги текстових повідомлень розпочалися в 2024 році, а у 2025 році — голосові, дані та послуги Інтернету речей (IoT). Для реалізації цього завдання супутники Starlink V.2mini-D2C обладнані фазованою антенною решіткою розміром 2,7 м × 2,3 м. Для надання послуг D2D компанія Starlink звернулася до Федеральної комісії зі зв'язку США (FCC) щодо отримання ліцензій на використання орбіт висотою 340 км та нахиленим 53° та 360 км 96,9°, які отримали назву дуже низькі орбіти Very Low Earth Orbit (VLEO). Також до FCC

подані заявки на отримання смуг частот в частотних діапазонах Q/V.

Нажаль до сьогодні якості послуг системи Starlink в Україні залишається такою, що не відповідає встановленим вимогам та корпоративним стандартам [15]. Основна причина полягає у відсутності на території України станції спряження. Користувачі в Україні обслуговуються станціями спряження Воля Крбовська (Польща) та Каунас (Литва).

Система Eutelsat OneWeb – інтеграція послуг низькоорбітальної та геостационарної складових.

Для диверсифікації послуг ССШД в Україні можливе використання послуг системи Eutelsat OneWeb [13]. За підсумками першого півріччя 2023 року Система OneWeb завершила формування повного орбітального угруповання у складі 648 супутників. Супутники розміщені у 18 орбітальних площинах на низькій навколоземній орбіті висотою 1200 км з нахиланням 87,9°. Система має спрощену архітектуру в порівнянні з Starlink. Кожен супутник OneWeb формує 16 некерованих променів Ku-діапазону до користувачів, які разом покривають територію 1100×1100 км. Формування трафіку для кожного променя здійснює станція спряження на підставі координат терміналів користувачів. Кожен супутник підтримує зв'язок із станцією спряження із використанням променя Ka-діапазону, в якому у окремих 8 смугах в двох поляризаціях передається трафік для 16 променів користувачів. На борту супутника здійснюється перенос смуги частот з KA-діапазону в Ku-діапазон та в зворотному напрямку. Термінал користувача змінює промінь кожні 18 сек., та змінює супутник кожні 2хв. 40сек. Регіональний трафік формується в точці присутності. Система Eutelsat OneWeb забезпечує 100% покриття території України із використанням станції спряження, що розташована в Болгарії.

Придбання компанією Eutelsat, яка є провідним оператором GEO супутників, компанії і LEO системи OneWeb створило умови для надання комплексних послуг LEO-GEO системи. Для реалізації цієї послуги можуть бути використані термінали Kymeta Hawk u8 [14]. Програмно-визначена та електронно керована антена u8 працює у всьому Ku-діапазоні. Плоскі панелі – термінали Kymeta Hawk u8 мають низькопрофільний аеродинамічний дизайн. На відміну від терміналів Starlink, в антенах типу Kymeta U8 застосована голографічна технологія формування променя із використанням жидкокристалічної технології LED та метаматеріалів. Антена Kymeta U8 оснащена модемною платою iQ 200 від ST Engineering iDirect, яка забезпечує ключові функції антени, зокрема: високу продуктивність та ефективність з прийнятим сигналом DVB-S2/DVBS2X та адаптивним зворотнім сигналом TDMA, безпечне 256-бітове AES-шифрування.

Система Amazon Kuiper розпочинає формування орбітального угруповання

В 2025 році розпочинається формування орбітального угруповання ССШД Amazon Kuiper [16]. Угруповання супутників складатиметься з 3 232 супутників, що розташовані в 98 орбітальних площинах на низькій навколоземній орбіті на висотах 590 км, 610 км та 630 км. Супутники будуть запуснені в кілька етапів, причому на першому етапі буде розгорнуто 578 супутників на висоті 630 км з нахиланням орбіти 51,9°. Така конфігурація орбітального угруповання здатне забезпечити повне покриття території України та надання послуг в режимі 24/7. Система Amazon Kuiper використовує частоти, виділені фіксованій супутниковій службі FSS та рухомій супутниковій службі MSS в Ka-діапазоні в смугах частот: 27,5–27,8185 ГГц, 28,4545–28,8265 ГГц, 29,5–30 ГГц. В цих смугах частот здійснюється формування керованих променів до користувачів та до станцій спряження. В архітектурі орбітального угруповання використовуються лінії зв'язку між супутниками.

Структура тракту надання послуги включає: точку присутності PoP, до якої підключаються зовнішні інформаційні мережі; PoP через орендовані лінії волоконно-оптичного зв'язку підключені до станцій спряження GateWay, які підключені до супутників Kuiper через промені до станцій спряження. Користувачі отримують доступ до супутника Kuiper через керовані промені до користувачів.

На супутниках Amazon Kuiper встановлене програмно конфігуроване корисне

навантаження регенеративного типу, яке перепрограмовується для забезпечення пропускну здатності на основі потреб клієнтів у обслуговуваних районах. Підсистема мережевого та маршрутизаційного навантаження налаштовується наземними мережевими операціями системи Kuiper для попереднього програмування променів у відповідні віртуальні точки на землі. Весь висхідний та низхідний трафік повністю регенерується на супутнику, а між променями здійснюється маршрутизація/комутація/перепакуння. Модеми підтримують широкий спектр варіантів модуляції та кодування, включаючи завадостійке кодування із пониженою щільністю перевірок на парність LDPC. Кожен модем підтримує адаптивне кодування та модуляцію для кожного каналу зв'язку та підтримує черги якості обслуговування для належної буферизації даних. Підсистема мережевого та маршрутизаційного навантаження підтримує кілька рівнів якості обслуговування, що дозволяє забезпечити виконання угод про рівень обслуговування.

Для надання послуг кінцевим споживачам система Amazon Kuiper пропонує кілька типів терміналів: надкомпактна модель, що забезпечує швидкість до 100 Мбіт/с; стандартна модель, що забезпечує швидкість до 400 Мбіт/с; найбільша модель, призначена для корпоративних, урядових та телекомунікаційних застосувань, забезпечує швидкість до 1 Гбіт/с. Усі моделі побудовані у вигляді плоских панелей та використовують технологію фазованих антенних решіток.

Заявлені характеристики системи Amazon Kuiper показують наміри компанії Amazon створити ССШД, що стане конкурентом системи Starlink.

Система AST-Space Mobile – впроваджує послуги 4G/5G в режимі D2S, що не передбачає модернізації терміналів користувачів

На сегмент ринку послуг у форматі D2S згідно архітектури 5G є проект створення системи AST Space Mobile [17]. Компанія AST SpaceMobile та її партнери по сьому світу будують першу і поки що єдину стільникову широкосмугову мережу космічного базування, яка забезпечуватиме доступ для стандартних смартфонів та планшетів (без будь-яких модернізацій). Ця стільникова мережа призначена для забезпечення підключень за стандартами та на швидкостях 4G/5G повсюди в межах зони обслуговування. 10 вересня 2022 року компанія AST SpaceMobile здійснила запуск супутника BlueWalker 3, який є попередником комерційних супутників під назвою BlueBirds. Супутник був побудований з апертурою ~64,5 м² для безпосереднього зв'язку з мобільними телефонами в смугах частот стандартів 3GPP. За допомогою цього супутника компанія AST SpaceMobile у партнерстві з Vodafone, AT&T та Nokia продемонструвала можливість надання послуг широкосмугового зв'язку 5G із використанням стільникової технології космічного базування, досягнувши швидкості передачі даних 14 Мбіт/с після успішних випробувань 4G. 12 вересня 2024 року були запуснені п'ять комерційних супутників Блок 1 BlueBird на LEO.

Згідно із заявкою, до була подана в квітні 2020 року компанією AST & Science LLC до FCC (США), система передбачає використання орбітального угруповання у складі 243 супутників в 16 орбітальних площинах на орбітах між 725 та 740 км із нахиленням від 40° до 55°. Кожен супутник формуватиме 2800 променів до користувачів та 3 промені до станцій спряження.

Структура надання послуг включає станцію спряження, що забезпечує підключення до наземної магістральної мережі супутників із використанням фідерних ліній Q/V діапазонів. Термінали користувачів типу смартфон/планшет отримують безпосередній доступ до супутника в режимі D2S.

Європейська система захищеного зв'язку.

Зважаючи на результати використання в Україні системи Starlink в умовах повномасштабної війни, Європейський Союз прийняв рішення про створення власної багатоорбітальної системи захищеного зв'язку IRIS² (Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite) [18]. Система, що буде надавати послуги на основі протоколів інтернет. Початок розгортання системи заплановано до 2027 року.

Очікується, що початкові послуги державним користувачам будуть надаватись починаючи з 2030 року.

Система IRIS² складатиметься з 264 супутників на LEO на висоті 1200 км та 18 супутників на MEO на висоті 8000 км. Система призначена для забезпечення безпечного зв'язку, відстеження місцезнаходження та послуг спостереження за безпекою для урядових установ, що безпосередньо порівнюється з проектом Starshield американської компанії SpaceX.

Система також має на меті забезпечити широкосмуговий доступ для приватних компаній та громадян. На момент підписання контракту в грудні 2024 року оціночна вартість становила 10,5 мільярда євро, з яких 6,5 мільярда євро – державні кошти. IRIS² є частиною загальної космічної стратегії ЄС, включаючи Космічну стратегію ЄС щодо безпеки та оборони. Європейське космічне агентство (ЄКА) відповідає за розробку та розгортання системи, а Агентство Європейського Союзу з космічної програми (EUSPA) відповідає за надання державних послуг.

2.5. Вплив методу групового кластерного запуску на конструкцію космічних апаратів супутникових телекомунікаційних систем.

Платформи космічних апаратів для низькоорбітальних мультисупутникових систем.

Створення мультисупутникових систем, формування яких здійснюється із використанням запусків пакетів супутників в кілька десятків в одному запуску призвело до активізації розробки платформ LEO супутників, конструкція яких спеціально адаптована до умов групового запуску. Першими в цьому стали супутники Starlink V0.9. Подальші модернізації платформ супутників Starlink V2, V2mini також рухаються в цьому напрямку. Так супутники Starlink V2mini відрізняються від супутників Starlink V0.9 більшим розміром, кількістю фазованих антенних решіток, лазерними трансіверами і використанням двох панелей сонячних батарей замість однієї. Але плоска форма корпусу супутника збережена, що дозволяє формувати пакет з десятків супутників для групового запуску.

За прикладом Starlink американська компанія Rocket Lab оголосила про створення платформи Flatellite, що спеціально призначена для серійного виробництва супутників і адаптована для великий орбітальних угруповань [19]. При створенні платформи Flatellite компанія Rocket Lab інтегрувала традиційні компоненти та підсистеми, що мають досвід орбітального використання, включаючи рушійну установку, програмне забезпечення для польоту, авіоніку, двигуни-маховики, зоряні датчики, систему розділення, сонячні батареї, радіостанції, композитні конструкції, паливні баки тощо.

На замовлення НАСА Аерокосмічна корпорація (Ел Сегундо, Каліфорнія) розробила демонстраційний макет супутника DiskSat товщиною 2,5 см та діаметром 1 м [20]. Аерокосмічна корпорація за підтримки Управління космічних технологій NASA (STMD) готує політ чотирьох DiskSat для запуску в 2026 році, щоб продемонструвати доцільність як диспенсера, так і платформи DiskSat.

Американська компанія SpinLaunch уклала контракт на суму 122,5 мільйона євро з компанією Kongsberg NanoAvionics на будівництво перших 282 супутників для комунікаційного угруповання Meridian Space компанії [21]. Meridian Space – це LEO угруповання телекомунікаційних супутників, розроблене SpinLaunch для надання глобальних високошвидкісних широкосмугових послуг корпоративним клієнтам. За даними SpinLaunch, супутники Meridian Space матимуть плоский форм-фактор, що дозволить розгорнути до 250 одиниць за один «традиційний ракетний запуск». 2 квітня NanoAvionics оголосила про укладення контракту на будівництво 282 супутників для угруповання SpinLaunch Meridian Space. Угода включає два орбітальні демонстратори та серійне виробництво перших 280 супутників у угрупованні, яке, як очікується, зросте щонайменше до 1190 космічних апаратів. Запуск першого демонстратора заплановано на 2026 рік, і він використовуватиме стандартну мікросупутникову шину MP42 NanoAvionics для перевірки корисного навантаження зв'язку SpinLaunch Meridian.

Компанія Terran Orbital оголосила про створення лінійки платформи Enterprise [22], що базується на довгій лінійці SmallSat, використовуючи ту саму авіоніку та алгоритми GNC, що й менші класи платформ супутників. Значні вдосконалення конструкції підтримують найбільші корисні навантаження та включають функцію оптичного міжсупутникового зв'язку (OISL). Для зменшення ваги та збільшення потужності, доступної для корисного навантаження, була розроблена нова система енергоживлення. Платформа Enterprise є однією з найбільших платформ, що пропонуються в стандартній лінійці продуктів, і є відправною точкою для вимог до плоского пакування, що дозволяє доставляти до 24 супутників за один запуск. Вона оптимальна для великих систем та доступна в трьох конфігураціях.

Платформа для малих геостаціонарних супутників.

Зважаючи на відновлення ринку малих GEO супутників компанія Terran Orbital розробила власне рішення – платформу SmallSat GEO™. Платформа дозволяє створити GEO супутник масою до 1250 кг, розмістити корисне навантаження до 300 кг, забезпечити постачання енергоживлення до 3 кВт та строк орбітальної експлуатації не менше 7 років.

2.6. Розвиток супутникових систем та послуг інтернету речей.

Дрейф операторів існуючих низькоорбітальних систем персонального зв'язку в напрямку послуг Інтернету речей.

Зважаючи на активне впровадження в СТС архітектури 5G, протягом останніх років на ринок почали активно виходити супутникові LEO системи інтернету речей IoT (Internet-of-Things). Першими в цьому сегменті ринку з'явилися оператори LEO систем персонального супутникового зв'язку Iridium та Global Star [23,24]. Вихід на ринок США призвів до дрейфу попиту в напрямку широкосмугових послуг і втрати цими компаніями їх звичайного ринку. Тому ці компанії звернули увагу на новий сегмент – IoT. Незважаючи на повний склад орбітального угруповання та багаторічний досвід експлуатації, до недоліків цих систем можна віднести використання пропрієтарних протоколів доступу.

Низькоорбітальні супутникові системи Інтернету речей на базі мікросупутників та кубсатів.

З іншого боку, розвиток технології мікро- та наносупутників – CubSat в поєднанні із виходом на ринок вузькосмугових протоколів IoT великого радіусу дії, як то NB-IoT та LoRaWAN, стали технологічною основою для появи спеціалізованих супутникових LEO систем IoT, що побудовані із використанням CubSat. Зважаючи на гетерогенний характер мереж радіодоступу в стандарті 5G, ці системи органічно вписуються в створювану екосистему NTN 5G.

Astrocast – це система швейцарської стартап-компанії супутникового зв'язку з власною глобальною мережею наносупутників IoT для відстеження, моніторингу, управління та зв'язку з активами у віддалених регіонах світу [25]. Компанія базується поблизу Лозанни у Швейцарії. Маючи систему з 100 наносупутників, Astrocast надає повний комплексний сервіс прямого виведення на орбіту, що включає найсучасніші комунікаційні модулі та послуги корпоративного класу. Система побудована із використанням протоколу LoRaWAN. Для надання послуг компанія Astrocast розробила спеціальні чіпсети, що встановлюються в модуль Astronode S.

У 2018 році за ініціативою CNES (Франція) була створена компанія Kinéis [26]. Мета створення компанії - експлуатації системи Argos, що є результатом міжнародного наукового співробітництва між CNES (Франція), Національним управлінням океанічних і атмосферних досліджень (NOAA), Європейською організацією з експлуатації метеорологічних супутників (EUMETSAT) та Індійською організацією космічних досліджень (ISRO), для моніторингу дикої природи, рибальства та збору даних про клімат і навколишнє середовище Землі за допомогою CLS і призначена для ринку Інтернету речей (IoT). Зараз система Kinéis має 25 наносупутників, що розташовані в п'яти орбітальних площинах на сонячно-синхронній орбіті. 18 березня 2025 року компанія

Rocket Lab за допомогою ракети-носія Electron запустила фінальні 5 супутників, що завершило формування орбітального угруповання із 25 супутників. Нове орбітальне угруповання Kinéis доповнить існуючу систему потужнішими наносупутниками класу 30 кг, які інтегрують технологію IoT та систему автоматичної ідентифікації (AIS) для відстеження суден. Після розгортання ця технологія дозволить Kinéis розширюватися охоплюючи різні галузі та масштабуватися з 20 000 підключених пристроїв до мільйонів.

Висновки.

Аналіз стану та напрямків розвитку супутникових телекомунікаційних систем свідчить про певні тенденції, а саме:

1. Протягом останнього часу відстежується тенденція щодо інтеграції супутникових систем та мобільних мереж 4G, 5G. Дослідницька група 3GPP визначила технологічні умови взаємодії мережі 5G та супутникових систем у форматі неназемних мереж NTN.

2. Інтеграція супутникових систем із мережами 5G створює передумови для конвергенції архітектури 5G до супутникових систем. Важливою відмінністю мереж 5G від попередніх генерацій є впровадження технологій програмно-визначених мереж та віртуалізації мережевих функцій. При розробці архітектури мультиорбітальних супутникових систем NTN окрема увага приділяється цим технологіям.

3. Сталою тенденцією в розвитку супутникових телекомунікаційних систем є освоєння більш високих діапазонів частот. Після Ка-діапазону оператори супутникових систем звернулись до частотних діапазонів Q та V. Відносно новим напрямком є вивільнення частотного діапазону C від наземних систем для використання супутниковими системами.

4. Геоостаціонарні системи залишаються важливою складовою супутникових телекомунікаційних систем. За останнє десятиріччя в секторі геоостаціонарних супутників відстежується тенденція до еволюційного переходу від супутників великої пропускної здатності HTS до супутників надвеликої пропускної здатності VHTS і супутників ультравеликої пропускної здатності UHTS. Усі знов створені системи здатні взаємодіяти з мережами 5G. До основних особливостей технологій HTS, VHTS та UHTS відносяться: формування зони обслуговування за рахунок великої кількості (до тисячі) надвузких променів Ка-діапазону до користувачів та використання цифрового регенеративного корисного навантаження. Для України особливу зацікавленість представляють проекти Viasat-3, Ovation та Astranis. Наявність власної наземної інфраструктури значно поліпшить якість послуг та сприятиме підвищенню гнучкості, безпеки і надійності інформаційних мереж на їх основі.

5. Система O3b/mPOWER компанії SES, що використовує середню навколоземну орбіту MEO, є ефективним засобом ширококутового зв'язку на швидкостях від 50 Мбіт/с до 1 Гбіт/с. Зважаючи на власний флот геоостаціонарних GEO супутників компанія SES здатна запропонувати в Україні комплексу MEO-GEO послугу. Термінали Hydra 2, Hydra 4, що розроблені компанією all.space, призначені для одночасної роботи з супутниками на різних орбітах в широкому діапазоні частот. Компанія SES декларує можливість встановити станцію спряження на території замовника послуги, тобто в Україні, в разі бажання замовника.

6. Starlink залишається лідером у впровадженні нових рішень в низькоорбітальних системах ширококутового доступу. Нове покоління супутників Starlink забезпечує лазерний зв'язок між супутниками та надання послуг в режимі «до чарунки стільникової мережі» (D2C). Система Starlink планує розширення доступної смуги частот за рахунок частотних діапазонів V та Q, і опанування наднизьких навколоземних орбіт VLEO.

7. Компанія Eutelsat після отримання системи OneWeb здатна надавати послуги ширококутового доступу на території України, що певним чином диверсифікує постачання послуг ширококутового супутникового доступу, та має можливість надавати комплексу послугу із використанням власного супутникового ресурсу на геоостаціонарній та низькій навколоземній орбіті GEO-LEO. Термінали Kymeta U8 є ефективним засобом

для надання послуг GEO-LEO кінцевим користувачам.

8. Компанія Amazon Kuiper починає формування власного орбітального мультисупутникового угруповання. За своїми архітектурними особливостями та показниками послуг система близька до системи Starlink, але використовує більш високий Ka-діапазон в лінії до користувача. Послуги системи можуть бути доступні в Україні найближчим часом. Виходячи з досвіду використання послуг систем Starlink та Eutelsat OneWeb для поліпшення якості послуг створюваної системи Amazon Kuiper доцільно вирішити питання про будівництво в Україні станції спряження та точки присутності.

9. Система AST Space Mobile орієнтована на надання послуг користувачам мереж 4G/5G, що знаходяться поза межами зони обслуговування наземних мереж. До особливостей системи відноситься пропозиція послуги доступу терміналу користувача «безпосередньо до супутника» D2S, що не вимагає модернізації терміналів користувачів типу смартфон та планшет. Для впровадження послуг в Україні потрібна підготовка наземної інфраструктури – станції спряження.

10. Вимоги до перспективної європейської мільтиорбітальної системи захищеного зв'язку IRIS² сформовані із врахуванням досвіду використання супутникових систем широкосмугового доступу в Україні. Зважаючи на прагнення України щодо вступу до Європейського Союзу, в перспективі потрібно передбачати інтеграцію із інформаційними та телекомунікаційними мережами ЄС, до яких безперечно відноситься система IRIS².

11. Досвід формування мультисупутникових систем вплинув на конструктивні рішення щодо супутників. Сталою тенденцією в проектуванні супутників для таких систем стала плоска конфігурація, яка в найбільшій мірі адаптована до кластерного запуску пакету супутників однією ракетою-носієм.

12. Після виходу на ринок низькоорбітальних супутникових систем широкосмугового доступу та зважаючи на перспективи впровадження послуг систем, що сумісні з мережами 4G та 5G, оператори низькоорбітальних супутникових систем персонального зв'язку перенесли свою увагу на послуги Інтернету речей IoT на базі власних традиційних протоколів. Одночасно із цим почалось створення низькоорбітальних супутникових систем IoT із використанням малих супутників класу мікро- та наносупутник, або кубсат, що базуються на протоколах IoT великої дальності типу NB-IoT та LoRaWAN.

Література

1. NTN & Satellite in Rel-17 & 18. Електронний документ. Режим доступу: <https://www.3gpp.org/news-events/partner-news/ntn-rel17>
2. 5G NTN TAKES FLIGHT: TECHNICAL OVERVIEW OF 5G NON-TERRESTRIAL NETWORKS / Rohde & Schwarz White Paper | 5G NTN takes flight: Technical overview of 5G non-terrestrial networks / PD 3683.7383.52 | Version 01.00 | July 2022 (ch) | White Paper / © 2022 Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG | 81671 Munich, Germany.
3. A Service Function Chain Deployment Scheme of the Software Defined Satellite Network / Wenxin Qiao, Xianglong Ni, Yu Lu, Xiongwei Li, Donghao Zhao, and Yicen Liu / Hindawi. Mobile Information Systems. Volume 2022, Article ID 6402481, 17 pages / <https://doi.org/10.1155/2022/6402481>
4. Interference-Limited Scenarios / Електронний документ. Режим доступу: <https://www.viasat.com/about/what-we-do/satellite-fleet/viasat-3/>
5. How 3D-Printing Is Changing RF Front-End Design for Space Applications / Oscar A. Peverini (Member, IEEE), Mauro Lumia (Member, IEEE), Giuseppe Addamo (Member, IEEE), Giuseppe Virone (Senior Member, IEEE), and Nelson J. G. Fonseca (Senior Member, IEEE) / IEEE Journal of Microwaves / Digital Object Identifier 10.1109/JMW.2023.3250343
6. Celebrating One Year Since the launch of Ovzon 3 / Електронний документ. Режим доступу: <https://www.ovzon.com/en/>
7. Purpose-built for high orbits. Astranis satellites bring connectivity to remote areas, support the US military, and provide critical capabilities like GPS / Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.astranis.com/spacecraft>

8. O3b mPOWER / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.ses.com/o3b-mpower>
9. Hydra 2 (Dual-link) Ka Terminal / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.all.space/products-services/hydra-2>
10. First Starlink Satellite Direct-To-Cell Phone Constellation Is Now Complete / Электронный документ. Режим доступа: <https://insidetowers.com/first-starlink-satellite-direct-to-cell-phone-constellation-is-now-complete/>
11. STARLINK DIRECT TO CELL. Engineered to eliminate mobile dead zones around the world. Service now available / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.starlink.com/business/direct-to-cell>
12. Starlink's Laser System Is Beaming 42 Million GB of Data Per Day / Электронный документ. Режим доступа: <https://www.pcmag.com/news/starlinks-laser-system-is-beaming-42-million-gb-of-data-per-day>
13. Experience the Eutelsat OneWeb difference / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://oneweb.net/our-network/experience-oneweb>
14. Hawk u8 / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.kymetacorp.com/products/hawk-u8>
15. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.starlink.com/map?view=availability>
16. Here's what to expect from Project Kuiper's first full-scale satellite launch. United Launch Alliance will send 27 Kuiper satellites into low Earth orbit as we begin a full-scale deployment of our satellite internet network / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.aboutamazon.com/news/innovation-at-amazon/project-kuiper-satellite-internet-first-launch>
17. Space 5G Cellular Broadband / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://ast-science.com/>
18. IRIS² / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/secure-satcom/iris2>
19. Rocket Lab Announces Flatellite: A New Satellite Designed for Mass Manufacture and Tailored for Large Constellations / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.rocketlabusa.com/updates/rocket-lab-announces-flatellite-a-new-satellite-designed-for-mass-manufacture-and-tailored-for-large-constellations/>
20. What is a DiskSat? Thinking Outside the CubeSat Box: DiskSat – A New Circular Small Spacecraft Design <https://www.nasa.gov/smallspacecraft/disksat/> / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.nasa.gov/smallspacecraft/disksat/>
21. Meridian Space is a low-cost, highly differentiated LEO satellite communications constellation offering enterprises unmatched speed, reliability and flexibility / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.spinlaunch.com/meridianspace>
22. CONNECTING THE WORLD / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://terranorbital.com/spacecraft-platforms/enterprise/>
23. What is Satellite IoT and How is it Used? / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.iridium.com/blog/what-is-satellite-iot-and-how-is-it-used/>
24. Industrial IoT Asset Tracking / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.globalstar.com/en-us/products/iot>
25. A direct-to-satellite IoT connectivity service to scale-up your remote operations around the globe / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.astrocast.com/>
26. Spatial IoT connectivity for humans, their activities, and their environment / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.kineis.com/en/spatial-iot-connectivity/>