

<https://doi.org/10.15407/knit2020.04.057>

УДК 621.396.946.2, 004.75

**М. Ю. ІЛЬЧЕНКО**<sup>1</sup>, Голова Вченої ради, д-р техн. наук, проф., акад. НАН України, заслужений діяч науки і техніки, тричі лауреат Державних премій в галузі науки і техніки, член Міжнародної академії наук вищої школи, Міжнародної академії інженерних наук, Почесний член Інституту інженерів електротехніки і електроніки (США)  
E-mail: ilch@kpi.ua

**Т. М. НАРИТНИК**<sup>1</sup>, проф. кафедри телекомунікацій, канд. техн. наук, проф., акад. НАН України, лауреат Державних премій УРСР, СРСР, України, Винахідник СРСР, Заслужений робітник промисловості України  
E-mail: director@mitris.com

**В. І. ПРИСЯЖНИЙ**<sup>2</sup>, нач. Нац. центру, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., лауреат Державної премії в галузі науки і техніки, член ради з космічних досліджень Президії НАН України  
E-mail: ncuvkz@spacecenter.gov.ua

**С. В. КАПШТИК**<sup>2</sup>, пом. нач. Нац. центру, канд. техн. наук  
E-mail: Sergii.kapshtyk@gmail.com

**С. А. МАТВІЄНКО**<sup>3</sup>, голов. конструктор, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.  
E-mail: matvienko\_2005@ukr.net

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
Проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 03056

<sup>2</sup> Національний центр керування і випробувань космічних засобів  
вул. Московська 8, Київ, Україна, 01010

<sup>3</sup> Науково-виробничий комплекс «Курс», Київ, Україна  
вул. Бориспільська 9, Київ, Україна, 02099

## НИЗЬКООРБІТАЛЬНА СУПУТНИКОВА СИСТЕМА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА БАЗІ РОЗПОДІЛЕНОГО СУПУТНИКА

*Розглянуто питання побудови супутникової низькоорбітальної системи інтернету речей, яка використовує архітектуру «розподіленого супутника». Запропонована супутникова система об'єднує в собі низькоорбітальну супутникову телекомунікаційну систему, що надає послуги широкосмугового доступу до інтернету широкому колу споживачів, та системи інтернету речей, яка призначена для надання послуг користувачам, чуттєвим та нечуттєвим до затримки обробки інформації інтернету речей. Показано принципи побудови орбітального сегменту низькоорбітальної супутникової системи інтернету речей, розкрито особливості застосування в низькоорбітальній супутниковій системі централізованої архітектури «розподіленого супутника» з використанням космічних апаратів класу мікросупутник та кубсат. Запропоновано метод формування зони обслуговування супутникової низькоорбітальної системи із врахуванням захисту гео-стаціонарних систем та багаторазового використання виділеного частотного ресурсу. Визначено шляхи запровадження багатьох протоколів для передачі інформації інтернету речей і формування комбінованих зон обслуговування. Запропоновано рішення щодо реалізації концепції «туманних обчислень» шляхом включення до складу орбітального сегменту низькоорбітальної супутникової системи окремих супутників-обчислювачів, головним завданням яких є формування у складі орбітального сегменту системи власних обчислювальних потужностей. Вивчено можливість об'єднання супутників-об-*

Цитування: Ільченко М. Ю., Наритник Т. М., Присяжний В. І., Капштик С. В., Матвієнко С. А. Низькоорбітальна супутникова система інтернету речей на базі розподіленого супутника. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 4 (125). С. 57—85. <https://doi.org/10.15407/knit2020.04.057>

числювачів в єдину обчислювальну мережу і створення таким чином безпосередньо на орбіті розподіленої обчислювальної мережі. Визначено склад бази даних, яка зберігається в орбітальній розподіленій мережі, вивчено напрямки інформаційних потоків, пов'язані із підтримкою та актуалізацією бази даних, запропоновано алгоритм перерозподілу надлишкового обчислювального навантаження.

**Ключові слова:** супутникова інформаційна система, низькоорбітальна супутникова система, інтернет речей, туманні обчислення, орбітальна обчислювальна мережа, розподілений супутник, мікросупутник, кубсат.

## ВСТУП

Останнє десятиріччя у сфері інфокомунікацій ознаменувалося появою нових інформаційних технологій, які базуються на використанні інтернету як транспортної інфраструктури. Одним із стимулів для впровадження нового покоління адресації в системі інтернет, IPv6, стала потреба в додатковому адресному просторі для пристроїв інтернету речей, кількість яких постійно збільшується.

Електронна енциклопедія Вікіпедія дає таке визначення: Інтернет Речей (Internet of Things, IoT) — це концепція обчислювальної мережі фізичних предметів («речей»), оснащених вбудованими технологіями для взаємодії один з одним або із зовнішнім середовищем, яка розглядає організацію таких мереж як явище, здатне перебудувати економічні та суспільні процеси, що виключає з частини дій і операцій необхідність участі людини [2].

IoT стає важливим фактором розвитку ІТ-індустрії і буде серйозно впливати на практично всі сфери діяльності: промисловість і видобуток корисних копалин, транспорт і логістику, охорону здоров'я і медицину, моніторинг навколишнього середовища, включаючи метеорологію, інтелектуальні міста і розумний будинок, навчання, розваги, роздрібну торгівлю тощо. За прогнозами аналітичних компаній до 2025 року загальна кількість пристроїв IoT становитиме понад 64 млрд одиниць (у 2018 р. кількість пристроїв IoT становила за різними оцінками від 7 до 10 млрд і зрівнялась або перевищила кількість мобільних пристроїв: телефонів, смартфонів, планшетів, ноутбуків) [11]. За песимістичними оцінками до 2025 року кількість підключених, або активних, пристроїв IoT становитиме 22 млрд [21]. У 2019 р. світовий обсяг ринку інтернету речей склав близько \$ 1.7 трлн, і до 2025 р. за різними оцінками він зросте до \$ 4...11 трлн [21].

Важливим показником при визначенні вимог до послуг IoT є вплив на якість послуги показника затримки передачі та обробки інформації інтернету речей. За цим показником послуги IoT умовно можна розділити на два класи [24]:

- послуги, що допускають тривалу затримку у передачі та обробці інформації IoT, тобто послуги, якість надання яких не залежить від затримки — DTAs (Delay-Tolerant Applications);
- послуги, якість надання яких критична до величини затримки передачі та обробки інформації IoT — DSAa (Delay-Sensitive Applications).

Показник допустимої, або прийнятної, тривалості затримки передачі та обробки інформації IoT є важливим параметром, який визначає вибір архітектури послуги IoT і технічних засобів для реалізації цієї послуги.

Розвиток IoT є стимулом до зростання попиту на пропускну здатність каналів зв'язку і передачі даних. Пріоритетним засобом підключення пристроїв IoT є радіотехнології наземних мереж передачі даних. Очікуване бурхливе зростання попиту на пропускну здатність стає стимулом до розробки технологій мобільного широкосмугового доступу та зв'язку 5G. Однак застосування наявних і перспективних радіотехнологій для підключення пристроїв IoT обмежене зонами обслуговування мереж наземного мобільного радіозв'язку всіх поколінь (включаючи 2G, 3G, 4G/LTE, 5G) і мереж радіодоступу з обмеженою зоною обслуговування (LPWAN, Wi-Fi, Zigbee, WPAN, Bluetooth) [24]. Зони обслуговування таких радіомереж, як правило, збігаються із районами з достатньою високою щільністю населення.

Ефективним методом побудови телекомунікаційної системи, яка здатна забезпечити глобальне покриття для надання послуг IoT, є створення системи супутникового зв'язку [12]. Для систем супутникового зв'язку, орієнтованих на надання

DSA послуг IoT, особливий інтерес становить використання низької навколосемної орбіти (LEO, Low Earth Orbit) [9, 12, 24]. Серед переваг LEO-орбіти — близькість до поверхні Землі, що забезпечує мінімальну тривалість затримки при передачі сигналу та мінімальну необхідну потужність передавального пристрою супутникової радіолинії [24]. Час двостороннього обміну інформацією (RTT, Round Trip Time) в LEO-системі становить не більше 100 мс, що істотно менше за аналогічний показник для геостационарних систем зв'язку (GEO), для яких значення показника RTT дорівнює 600 мс. Недоліком LEO-систем є мала зона обслуговування кожного супутника і його постійний рух відносно поверхні Землі. Як наслідок, в LEO-системах виникає необхідність відстеження терміналом земної станції зміни положення супутника у ході сеансу зв'язку при використанні спрямованих антен і компенсація впливу ефекту Допплера.

Глобальною тенденцією в розвитку супутникових LEO-систем різного призначення є використання малих і надмалих космічних апаратів: міні-, мікро-, наносупутників і кубсатів як окремого сегменту наносупутників. Класифікація малих і надмалих космічних апаратів проводиться за показником стартової маси космічного апарата (маса космічного апарата на початку строку експлуатації з урахуванням запасу палива). За цим показником малі і надмалі космічні апарати діляться на [6]: мінісупутники, маса яких становить 50...500 кг; мікросупутники (10...50 кг), наносупутники і кубсати (1...10 кг). За оцінками компанії SpaceWorks [6] у 2018 році очікувалося, що кількість запущених супутників цього сегмента складе 262, реально у 2018 р. було запущено 253 супутники класу мікро/наносупутників масою 1...50 кг. У 2020 р. прогнозується запуск 298 супутників. Як очікується, кількість запущених супутників зросте на 15 %. В цілому компанія SpaceWorks прогнозує [6] у найближчі п'ять років запуск 1800...2400 нано- та мікросупутників.

Очікуване зростання попиту на вільну пропускну здатність телекомунікаційних систем, пов'язане із перспективами впровадження систем мобільного зв'язку 5G, і результати двадця-

тирічної орбітальної експлуатації LEO-систем персонального мобільного супутникового зв'язку першого покоління Iridium, Global Star, Orbcomm стимулювали появу супутникових LEO-систем зв'язку нового покоління, призначених для надання послуг широкосмугового доступу (ШСД) до інтернет, IoT, і послуг хмарного зберігання даних.

**Низькоорбітальна супутникова система ШСД OneWeb** [17]. Систему призначено для надання кінцевим користувачам послуг ШСД до інтернету зі швидкістю передачі інформації до 50 Мбіт/с і малою затримкою — менше 50 мс. Космічний сегмент системи OneWeb буде складатись із 720 супутників, розміщених у 18 орбітальних площинах, по 32 робочих супутники в кожній. Висота орбіти 1200 км, нахилення 87.9°. Пропускна здатність кожного супутника становить до 7.5 Гбіт/с. Для надання послуги передбачається розгорнути на поверхні Землі до 50 станцій спряження (GW, Gate Way), кожна з яких буде забезпечувати підключення до магістральної наземної мережі інтернету всіх супутників, що перебувають у її зоні видимості. У зв'язку із кризою, спричиненою пандемією COVID-19, компанія OneWeb не змогла своєчасно залучити кошти для продовження розгортання орбітального угруповання. На сьогодні орбітальне угруповання системи OneWeb складається з 68 діючих супутників, які сформували дві орбітальні площини. Для продовження розгортання системи та впровадження глобального сервісу широкосмугового супутникового доступу утворено міжнародний консорціум, одним із лідерів якого планує стати Уряд Великобританії, внесок якого становитиме 500 млн дол. Формування міжнародного консорціуму вселяє надію на подальше розгортання та експлуатацію системи OneWeb. На рис. 1 показано схему надання послуги ШПД у системі OneWeb.

**Супутникова система ШСД StarLink** (SpaceX Non-Geo Satellite System). Проект StarLink є найбільш масштабним і складним супутниковим телекомунікаційним проектом [8, 20]. До теперішнього часу у відкритих джерелах не представлено інформацію, яка б дозволила визначити протоколи і особливості передачі даних в системі StarLink. Однак ряд дослідників, спира-

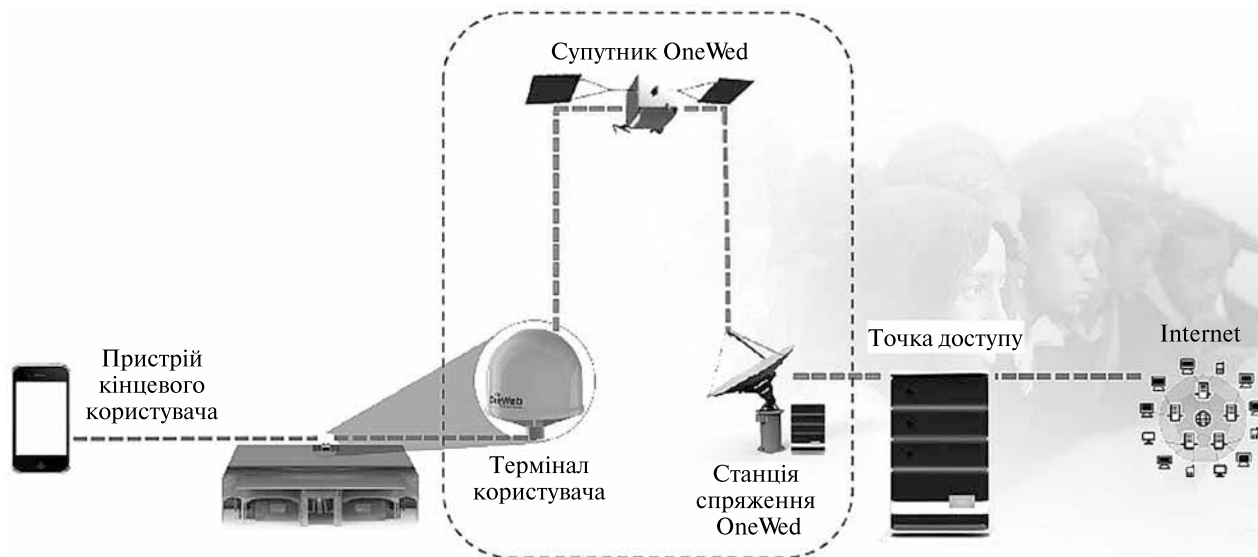


Рис. 1. Структура надання послуг широкопasmового доступу (ШСД) кінцевим користувачам в системі OneWeb

ючись на дані з доступних джерел і презентації компанії SpaceX щодо цього проекту визначили архітектуру побудови та інформаційного обміну системи StarLink.

Система StarLink буде складатися з двох систем: низькоорбітальна система — орбітальне LEO-угруповання StarLink у складі 4425 супутників; і орбітальне угруповання на екстремально низькій орбіті — орбітальне VLEO-угруповання StarLink (7518 супутників). У табл. 1—3 наведено дані по структурі орбітального угруповання LEO, VLEO і про частотному плані системи. Станом на час написання статті загальна чисель-

ність супутників StarLink, виведених на робочі орбіти, перевищує 460 одиниць. Таким чином, система StarLink стала наймасштабнішою системою за показником загальної чисельності діючих супутників.

Кожен супутник системи StarLink оснащено чотирма фазованими антенними решітками, які забезпечують формування променів до терміналів користувачів і до станції спряження GW, і п'ятьма оптичними головками, призначеними для організації оптичних/лазерних ліній зв'язку у відкритому космосі з двома сусідніми супутниками у своїй орбітальній площині, з двома супутниками по одному у двох сусідніх орбітальних площинах, і з одним із супутників (з найближчим супутником) в орбітальній площині, яка перетинається (при русі супутника по висхідній ділянці орбіти зв'язок налаштовується із супутником на низхідній ділянці, і навпаки).

Таблиця 1. Параметри орбітального LEO-угруповання системи StarLink

Кількість орбітальних площин	Кількість супутників в орбітальній площині	Висота орбіти, км	Нахилення орбіти, град
<i>Перший етап, 1600 супутників</i>			
32	50	1 150	53
<i>Другий етап, 2825 супутників</i>			
32	50	1 110	53.8
8	50	1 130	74
5	75	1 275	81
6	75	1 325	70

Таблиця 2. Параметри орбітального VLEO-угруповання системи StarLink

Кількість супутників на орбіті	Висота орбіти, км	Нахилення орбіти, град
2 547	345.6	53
2 478	340.8	48
2 493	335.9	42



На рис. 2 показано нижню поверхню супутника StarLink [7]. Видно місця установки приймальних та передавальних фазованих антенних решіток для організації радіопроменів до терміналів користувачів і до станцій спряження GW, а також стаціонарно-плазмові двигуни корекції і утримання.

Проведений у роботі [8] аналіз показав, що в системі StarLink забезпечується маршрутизація потоків між оптичними/лазерними лініями зв'язку між супутниками і радіопроміннями до терміналів користувачів і до станцій спряження GW. Використовувані алгоритми маршрутизації (пошуку маршруту) орієнтовані на мінімізацію показника RTT.

**LEO-систему супутникового зв'язку LeoSat** призначено для надання послуг високошвидкісної передачі даних [13]. Орбітальне угруповання системи буде складатися з 108 супутників (на першому етапі орбітальне угруповання складатиметься з 84 супутників: 78 робочих і 6 резервних), розміщених на полярній орбіті висотою приблизно 1400 км у шести орбітальних площинах (на першому етапі по 13 робочих супутників в кожній орбітальній площині) [14]. Кожен супутник буде оснащено 10 керованими антенами для формування керованих променів у частотному діапазоні Ка до терміналів користувачів і

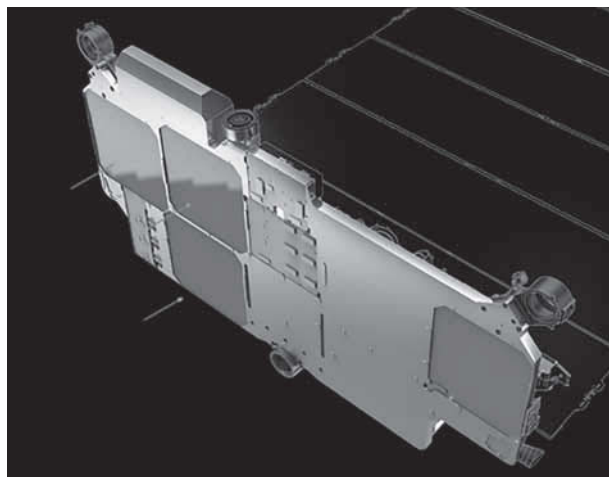


Рис. 2. Нижня поверхня супутника StarLink [7]. Стрілками вказані місця установки фазованих антенних решіток

передачі інформації зі швидкістю до 50 Мбіт/с і 1.6 Гбіт/с. Особливістю системи LeoSat є космічна магістральна мережа оптичного зв'язку між супутниками. Кожен супутник підтримує зв'язок по оптичній лінії з чотирма сусідніми супутниками. Корисне навантаження супутників LeoSat забезпечує маршрутизацію трафіка між променями одного супутника і між лініями оптичного зв'язку з іншими супутниками. На рис. 3 показано схему надання послуги кінцевим користувачам в системі LeoSat [14].

**LEO-система ПСД Telesat** (Канада) [23] буде складатися з 117 супутників, розташованих на низькій навколоземній орбіті LEO висотою приблизно 1000 км. Супутники будуть взаємодіяти з наземною інфраструктурою. Система буде використовувати смугу частот шириною близько 4 ГГц в частотному діапазоні Ка. Орбітальне угруповання системи Telesat буде складатися з 11 орбітальних площин з двома нахиленнями: шість полярних орбітальних площин з висотою орбіти 1000 км і нахиленням 99.9°, в кожній з яких буде розташовано по 12 супутників, і п'ять орбітальних площин з висотою орбіти 1200 км і нахиленням 37.4°, в кожній з яких буде розташовано по дев'ять супутників. Кожен супутник буде формувати зону обслуговування за допомогою 16 променів. Передбачається використання

Таблиця 3. Частотний план системи StarLink

Призначення і напрямок радіолінії	Частоти системи LEO, ГГц	Частоти системи VLEO, ГГц
Лінія вниз Супутник — термінал користувача	10.7...12.7	37.5...42.5
Лінія вниз Супутник — станція спряження	17.8...18.6 18.8...19.3	37.5...42.5
Лінія вгору Термінал користувача — супутник	14.0...14.5	47.2...50.2 50.4...52.4
Лінія вгору Станція спряження — супутник	27.5...29.1 29.5...30.0	47.2...50.2 50.4...52.4
Лінія вниз TT&C	12.15...12.25 18.55...18.60	37.5...37.75
Лінія вгору TT&C	13.85...14.00	47.2...47.45

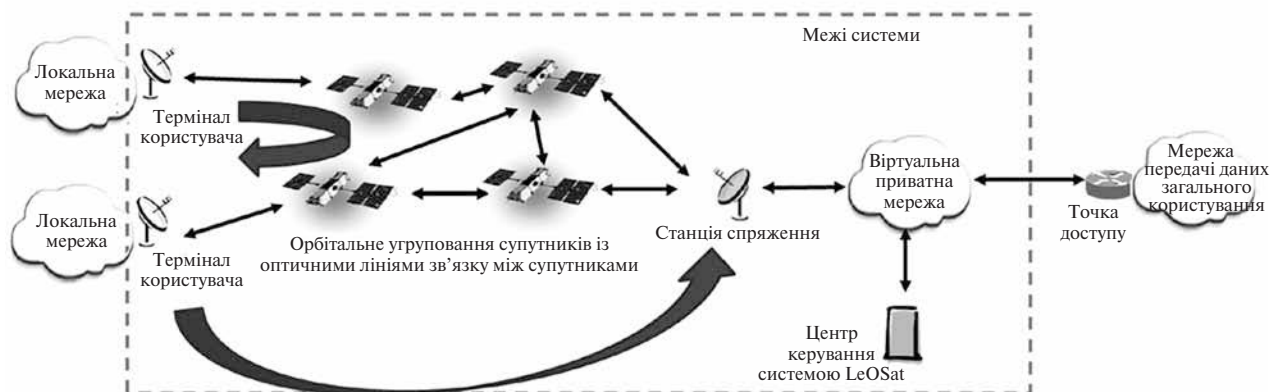


Рис. 3. Схема надання послуги в системі LeoSat [14]

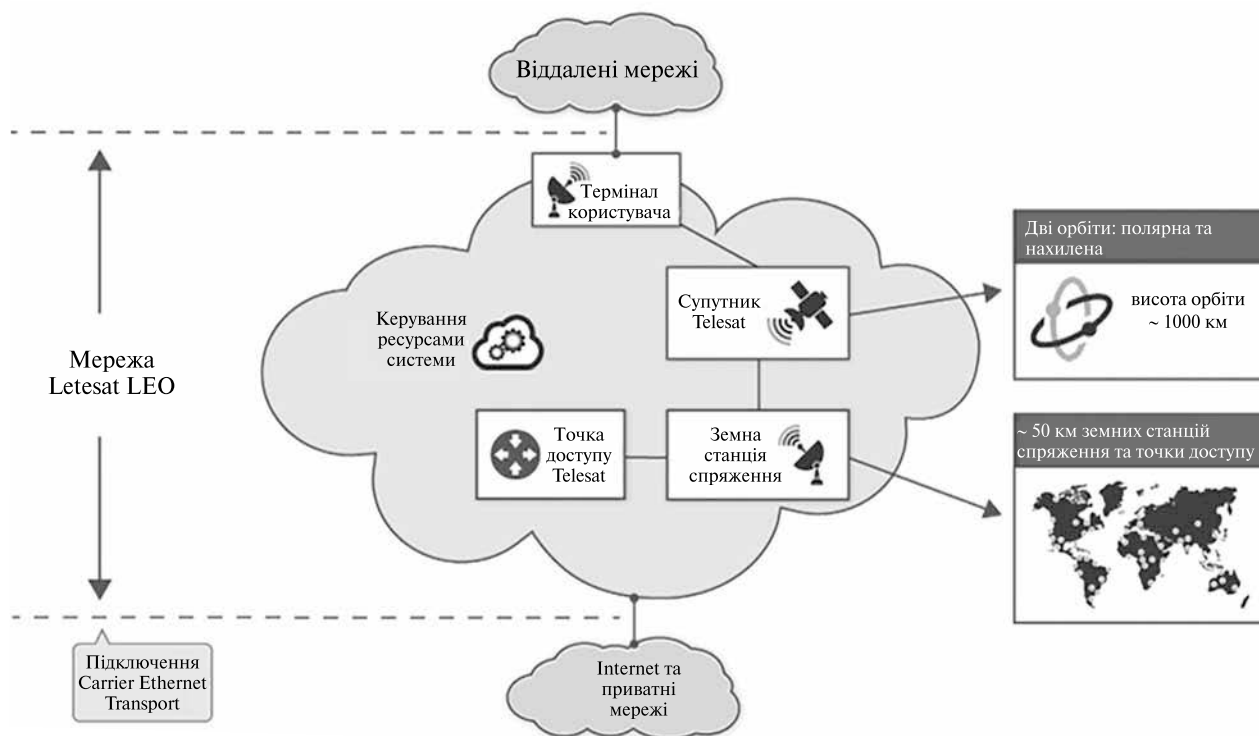


Рис. 4. Схема надання послуг кінцевим користувачам в системі Telesat [23]

оптичного зв'язку між супутниками і реалізація IP-маршрутизації трафіка на борту кожного супутника. На рис. 4 показано схему надання послуг кінцевим споживачам у системі Telesat.

**Супутникова LEO-система хмарного зберігання даних SpaceBelt** [19]. Орбітальний сегмент системи SpaceBelt буде складатися з восьми кос-

мічних апаратів, розташованих в одній орбітальній площині на низькій навколосезній орбіті висотою приблизно 650...700 км з малим нахиланням, близьким до площини екватора [18]. До складу орбітального угруповання будуть входити три супутники хмарного сховища даних, кожен з яких розрахований на зберігання до 5 Пбайт

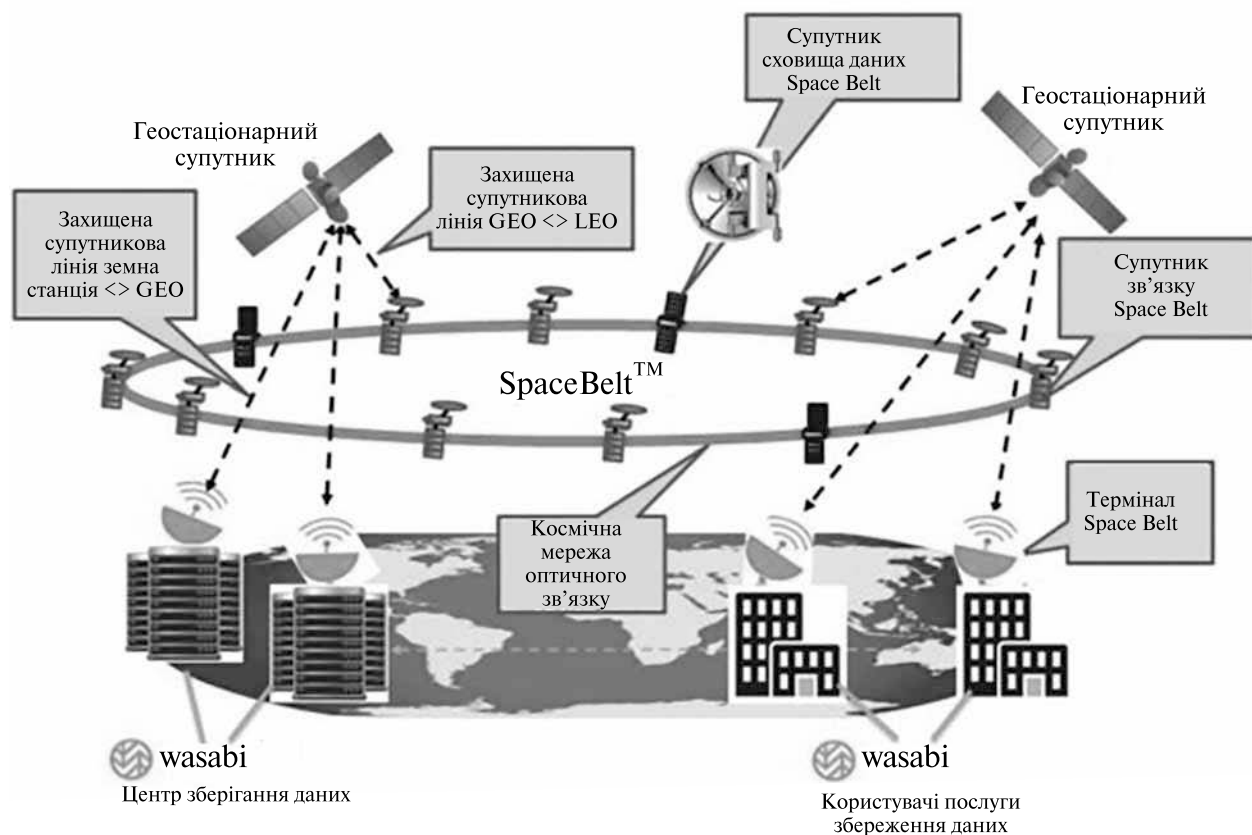


Рис. 5. Схема надання послуг хмарного збереження даних в системі SpaceBalt [19]

даних, і п'ять супутників зв'язку. Для функціонування системи передбачається сформувати космічну кільцеву мережу оптичного зв'язку між супутниками. Супутники зв'язку будуть забезпечувати двосторонній зв'язок мережі оптичного зв'язку із геостационарними супутниками із використанням методів криптографічного захисту. Кінцеві користувачі будуть отримувати доступ до хмарного сховища даних через геостационарний супутник. На рис. 5 показано схему надання послуги хмарного збереження даних в системі SpaceBalt.

Останнім часом з'явилися повідомлення про розробку LEO-систем IoT на базі супутників класу кубсат. Прикладом є проект GIoT (Global Internet of Things). У 2019 р. Європейське космічне агентство, компанія ARTES і група приватних інвесторів виділили грант у розмірі 10 млн євро консорціуму в складі NanoAvionics, KSAT і

Antwerp Space за програмою Європейської комісії Horizon 2020 на здійснення демонстраційного польоту супутникової системи для надання послуги машина-машина (M2M).

11 листопада 2018 р. було запущено два перших кубсати: Proxima I і Proxima II, призначені для надання послуг супутникового IoT з LEO [8]. Супутники належать компанії Fleet Space Technologies Pty Ltd. Компанія Fleet почала надавати послуги IoT на базі технології радіодоступу LoRaWAN з використанням супутникового сегмента для підключення пристроїв користувачів послуги IoT до хмари — центрів обробки і зберігання великих даних. На рис. 6 показано схему надання послуги IoT з використанням супутникового сегмента компанії Fleet Space Technologies [8].

Представлений стислий аналіз супутникових проектів, пов'язаних з наданням послуг IoT, по-

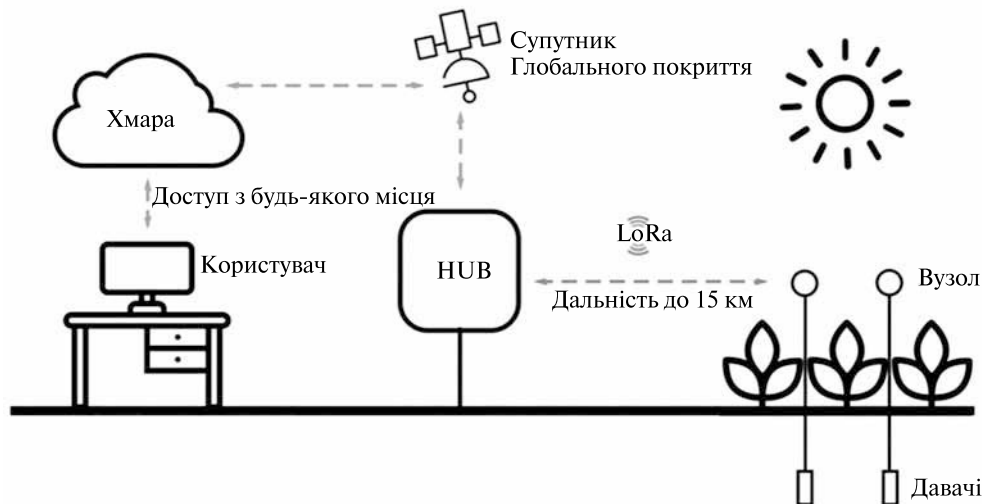


Рис. 6. Схема надання послуги IoT компанії Fleet Space Technologies із використанням супутникового сегменту [18]

казує, що всі ці проекти орієнтовані на передачу трафіка IoT у напрямку від датчиків до хмарних центрів обробки/зберігання даних та у зворотному напрямку, до пристроїв IoT, які реалізують команди керування. Дані системи не враховують особливостей трафіка IoT і не припускають оптимізації використання пропускну здатності супутникового сегменту системи.

## 1. ТУМАННІ ОБЧИСЛЕННЯ

Методом підвищення ефективності систем IoT є перенесення обчислювальних потужностей ближче до границь мережі і реалізація концепції «туманних обчислень» (Fog Computing, FC) [3–5]. У цьому випадку, на відміну від хмарної архітектури, обробка інформації IoT-пристроїв здійснюється на нижніх і проміжних рівнях ієрархічної структури інформаційної системи (рис. 7). Це дозволяє звільнити систему зв'язку від передачі всього обсягу трафіка від IoT-пристроїв, що перебувають на нижньому ієрархічному рівні системи, до центра хмарних обчислень, який перебуває на верхньому ієрархічному рівні, і у зворотному напрямку. При реалізації концепції FC на вищі ієрархічні рівні передаються лише результати обробки інформації, що скорочує обсяг переданої інформації і підвищує «коштовність» цієї інформації.

Супутникова інформаційна система, яка призначена для надання послуг IoT і підтримує концепцію FC, повинна мати власні обчислювальні потужності, розташовані якомога ближче до границі мережі, і забезпечувати доступ до цих потужностей системам і споживачам послуг IoT [5].

Таким чином, завдання розробки архітектури системи можна визначити так: розробити архітектуру низькоорбітальної супутникової системи зв'язку та широкосмугового доступу, адаптованої до вимог послуг IoT, та розмістити у складі орбітального сегменту системи власні обчислювальні потужності із врахуванням особливостей їхнього функціонування, використання найбільш простих архітектурних рішень і врахування конструктивних особливостей і обмежень платформ космічних апаратів форм-фактора кубсат чи наносупутник.

## 2. СТРУКТУРА СУПУТНИКОВОЇ LEO-СИСТЕМИ IOT

Низькоорбітальна телекомунікаційна супутникова система (далі LEO-система) має ряд переваг порівняно з геостационарними (далі GEO) системами і системами на середній навколосезній орбіті (далі MEO) [9, 15, 24]. Основна перевага — мінімальна величина показника RTT — тривалість двостороннього обміну інформацією





Рис. 7. Порівняння моделі хмарних та туманних обчислень для систем IoT [4]

(Round Trip Time, RTT) [24]. Сумарний час доведення інформації від IoT-пристрою до центру обробки даних (Data Processing Center, DPC) і у зворотному напрямку в LEO-системі не перевищує 100 мс. Даний показник істотно менший за аналогічний показник для GEO-системи, який становить 600 мс.

Вибір класу IoT-послуг, нечутливих до затримки DTA, або чутливих до затримки DSA, впливає на архітектуру орбітального угруповання [9]. Для систем, орієнтованих на надання DSA-послуг IoT, кращою є архітектура з маршрутизацією інформації IoT безпосередньо в орбітальному угрупованні системи — Space Based Routing. Характерною особливістю такої архітектури є використання ліній зв'язку між супутниками — Inter-Satellite Links (ISL).

Для супутникової LEO System IoT було обрано низьку навколосезну орбіту, LEO. Структура низькоорбітальної супутникової системи IoT (LEO System IoT) враховує особливості надання послуг IoT для всіх груп користувачів і класів послуг: послуги DTA та послуги DSA; а також для стаціонарних (нерухомих) і мобільних пристроїв IoT.

LEO System IoT складається з орбітального і наземного сегментів. На рис. 8 представлено структуру LEO System IoT.

Орбітальний сегмент (ОС) забезпечує вирішення телекомунікаційних задач передачі інформаційних потоків IoT і містить обчислювальні потужності для реалізації концепції FC.

ОС побудований з урахуванням забезпечення зони суцільного покриття/безперервного обслуговування в районах пріоритетного обслуговування, межі яких визначаються мінімальним і максимальним значенням широти, і складається з декількох орбітальних площин. ОС побудований на основі архітектури «розподіленого супутника» (далі РС) і містить мікрогрупування супутників, розташовані в заданих фазових позиціях орбітальних площин.

Наземний сегмент (НС) включає складові частини, призначені для надання послуг IoT, і складові частини, призначені для забезпечення керування функціонуванням системи. LEO System IoT призначено для надання послуг широкому спектру користувачів IoT практично у всіх сегментах послуг: охорона здоров'я та екстрена медична допомога, промисловість і промисловий інтернет речей, транспорт і логістика, видобуток корисних копалин, нафто/газовидобуток і транспортування, інфраструктура міст і комунальне господарство, розумний будинок, агропромисловий комплекс, моніторинг навколишнього середовища, оптова і роздрібна торгівля тощо.

Для забезпечення доступу пристроїв IoT до обчислювальних потужностей використовується абонентський термінал. Абонентський термінал виконує кілька функцій:

- земної станції супутникового зв'язку для організації двосторонньої супутникової радіолінії (uplink / downlink) до супутника зі складу ОС;

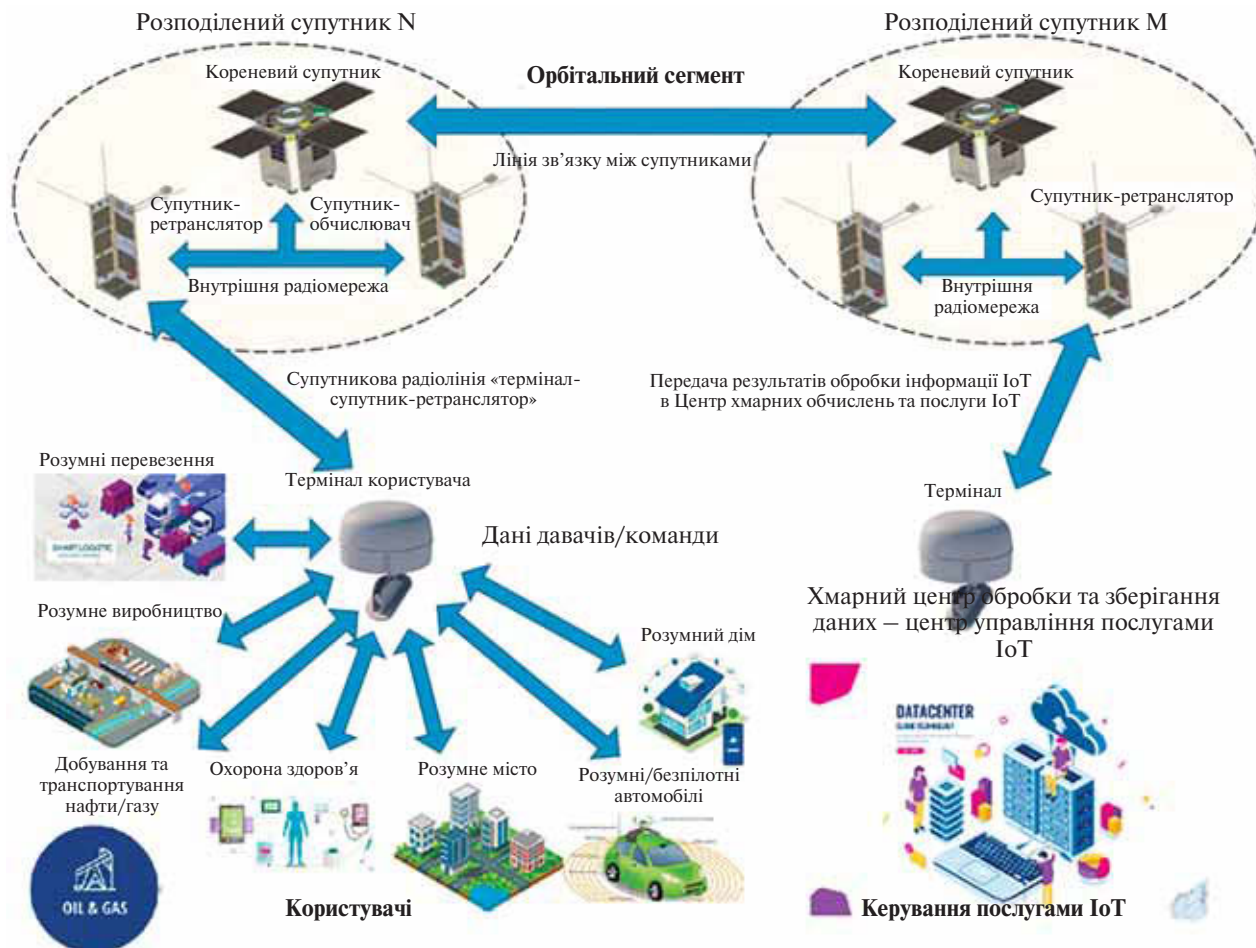


Рис. 8. Структура низькоорбітальної супутникової системи інтернету речей (LEO System IoT)

- базової станції (Base Station) і станції спряження (GW, Gate Way) для наземної мережі радіодоступу для пристроїв IoT;
- маршрутизатора інформаційних потоків від/до пристроїв IoT.

Керування наданням послуг IoT здійснює Центр керування IoT-послугами (див. рис. 8). Центр керування IoT-послугами, як правило, використовує апаратні потужності хмарних центрів обробки даних.

### 3. АРХІТЕКТУРА ОРБІТАЛЬНОГО УГРУПОВАННЯ LEO SYSTEM IOT

Основними параметрами орбітального угруповання LEO System IoT на круговій орбіті є:

- висота орбіти  $h$ ;

- нахилення орбіти  $i$ ;
- мінімальна і максимальна широта ( $l_{\min}$ ,  $l_{\max}$ ) зони пріоритетного обслуговування / суцільного покриття;
- мінімальний кут  $\beta_{\min}$  місця антен терміналів земних станцій та абонентських терміналів;
- ширина  $L$  смуги обслуговування для однієї орбітальної площини.

На основі зазначених параметрів визначаються:

- кількість  $M$  космічних апаратів у орбітальній площині і кутове, або фазове, рознесення між ними;
- кількість  $N$  орбітальних площин і кутове рознесення між ними по довготі висхідного вузла.

На рис. 9 наведено варіант архітектури орбітального угруповання LEO System IoT, яке скла-

дається з  $N$  орбітальних площин, і в кожній орбітальній площині розташовано  $M$  РС. При визначенні архітектури орбітального угруповання LEO System IoT кожен РС позначається як один супутник.

Нахилення прогресивної орбіти не може бути меншим за максимальну широту зони пріоритетного обслуговування  $l_{\max}$ , і вибирається з врахуванням умови (1)

$$i \geq l_{\max} \quad (1)$$

Кількість  $M$  супутників, розташованих в одній орбітальній площині, залежить від висоти  $h$  орбіти, мінімального кута місця  $\beta_{\min}$  і ширини  $L$  смуги обслуговування однієї орбітальної площини, і за умови рівномірного розміщення супутників в орбітальній площині становить

$$M = \left\lceil \frac{360^\circ}{\Delta\varphi} \right\rceil, \quad (2)$$

де  $\Delta\varphi$  — центральний кут між сусідніми супутниками в орбітальній площині;  $\lceil \cdot \rceil$  — оператор округлення зверху до найближчого цілого числа.

З огляду на особливість запропонованої в роботі [16] конфігурації LEO System IoT для забезпечення сумісності з GEO-системами центральний кут між супутниками в орбітальній площині (див. рис. 10) визначається з виразу

$$\psi = \arccos\left(\frac{\cos\theta_{\max}}{\cos(L \cdot 180^\circ / (\pi R_e))}\right), \quad (3)$$

$$\theta_{\max} = \arccos\left(\frac{R_e}{R_e + h} \cos\beta_{\min}\right), \quad (4)$$

де  $R_e = 6378$  км — радіус Землі,  $\theta_{\max}$  — центральний кут, який визначається зоною обслуговування супутника (тут РС) для мінімального кута місця антени терміналу користувача  $\beta_{\min}$ .

Кількість орбітальних площин пов'язана з мінімальною різницею довготи висхідного вузла  $\Delta\lambda$ , обчисленого з урахуванням мінімальної широти зони суцільного покриття  $l_{\min}$ :

$$N = \left\lceil \frac{360^\circ}{\Delta\lambda} \right\rceil. \quad (5)$$

У спрощеному вигляді різницю довгот висхідного вузла  $\Delta\lambda$  для сусідніх орбітальних площин можна визначити з виразу

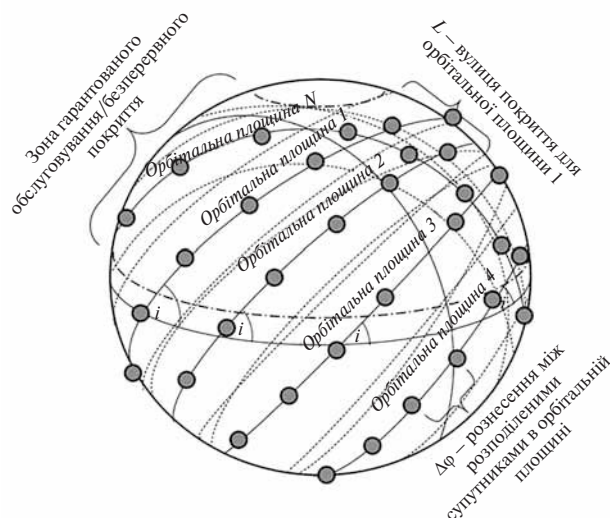


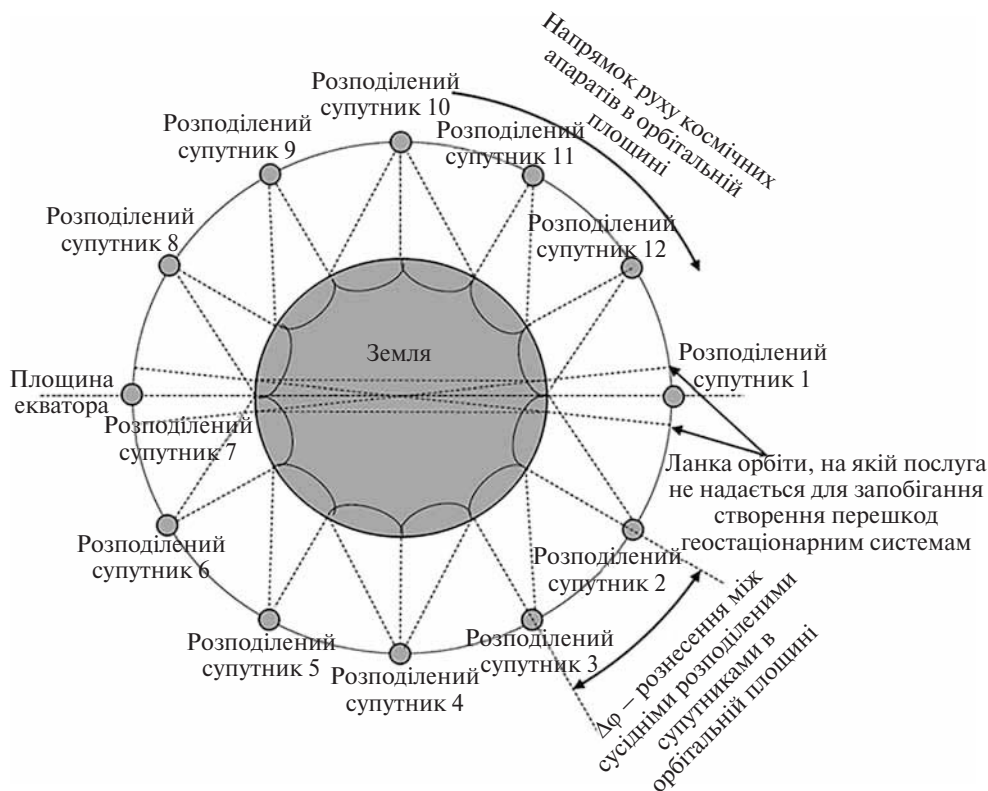
Рис. 9. Структура орбітального угруповання LEO телекомунікаційної супутникової системи

$$\Delta\lambda = \frac{L \cdot 180^\circ}{\pi R_e \cos l_{\min} \sin\left(\arccos\frac{\cos i}{\cos l_{\min}}\right)}. \quad (6)$$

Наведені спрощені аналітичні вирази (1)–(6) дозволяють оцінити конфігурацію архітектури орбітального угруповання LEO System IoT з урахуванням заданої зони суцільного покриття і обмеження мінімального кута місця терміналу споживача IoT.

#### 4. АРХІТЕКТУРА «РОЗПОДІЛЕНОГО СУПУТНИКА»

В основі концепції архітектури «розподіленого супутника» (РС-архітектура) покладено розподіл корисного навантаження одного супутника між декількома супутниками меншого класу (за показником маси космічного апарата) і формування на орбіті польотної структури, яка визначає взаємне розташування супутників для спільного виконання функціонального завдання. Супутники в складі РС здійснюють груповий політ у безпосередній близькості один від одного і створюють мікроугруповання. Функції та функціональні завдання корисного навантаження розподілені між корисними навантаженнями супутників зі складу РС. РС-архітектура дозволяє використовувати для створення LEO-систем



**Рис. 10.** Розподілення супутників в орбітальній площині із врахуванням забезпечення електромагнітної сумісності із геостационарними системами

зв'язку супутники класу мікросупутник (масою від 10 до 100 кг) і наносупутник або кубсат (масою від 1 до 10 кг).

Можливі два варіанти РС-архітектури: централізована або ієрархічна архітектура, і децентралізована архітектура. У централізованій РС-архітектурі один супутник є кореневим. Як правило, це супутник більшого класу (за показником маси). Він виконує функції керування польотом мікрогрупування і функціонуванням всіх прикінцевих супутників, як правило меншого класу. У децентралізованій РС-архітектурі функції керування польотом і функціонуванням мікрогрупування розподілені між супутниками, як правило, одного класу, і реалізуються на основі алгоритмів керування розподіленими структурами, що самоорганізуються. На рис. 11 показано централізовану РС-архітектуру [16].

Особливістю РС-архітектури є можливість використання наносупутників або кубсатів для

вирішення складних багатофункціональних завдань. Обмежені масово-габаритні і енергетичні можливості кубсатів протирічають вимогам до інформаційної продуктивності і довготривалої орбітальної експлуатації супутникових систем. Підвищити ефективність кубсатів можна відмовившись в режимі штатної експлуатації від використання частини обладнання, необхідного для вимірювання параметрів орбіти та керування орбітальним польотом. Відмова від використання означає відключення частини обладнання при штатній експлуатації в складі РС.

**Розподіл корисного навантаження в «розподіленому супутнику».** РС-архітектура дозволяє розподілити функціональні завдання корисного навантаження телекомунікаційного супутника більшого класу між декількома супутниками меншого розміру. На рис. 12 показано розподіл корисного навантаження в РС.



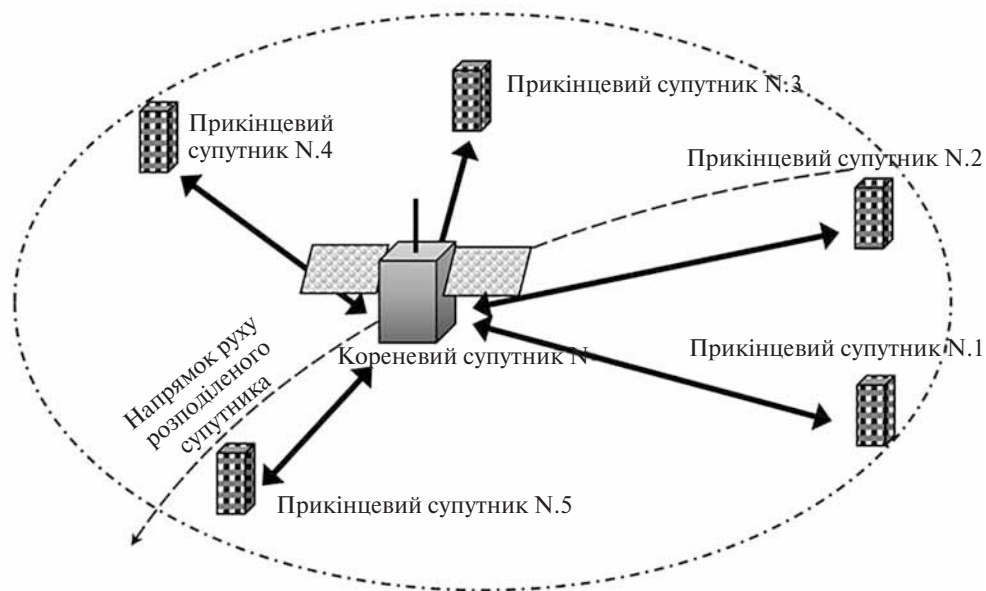


Рис. 11. Централізована РС-архітектура [16]

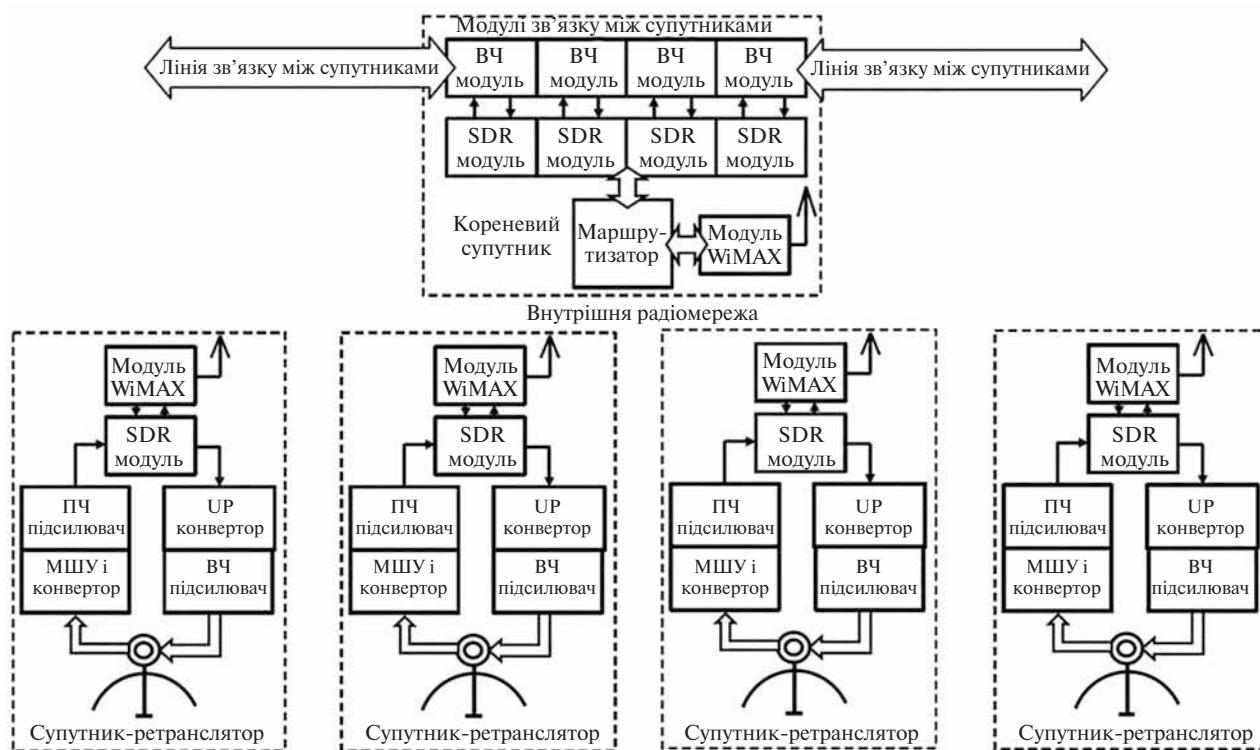


Рис. 12. Розподіл корисного навантаження між космічними апаратами в складі РС



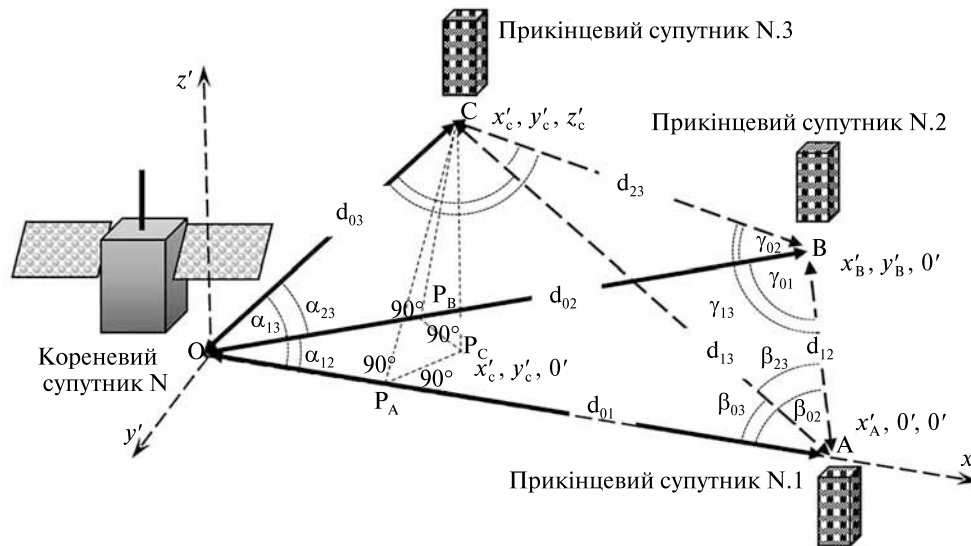


Рис. 13. Визначення координат прикінцевих супутників в супутниковій системі координат кореневого супутника

Кореневий супутник виконує функції керування функціонуванням і груповим польотом РС як власне кореневого супутника, так і усіх прикінцевих супутників, а також формування і маршрутизацію інформаційних потоків у межах РС і з його зовнішніми абонентами: земними станціями спряження GW і терміналами користувачів, і з іншими РС супутникової системи.

**Внутрішня радіомережа. Вимірювання взаємного положення і руху прикінцевих супутників відносно кореневого супутника.** Взаємодія між кореневим і прикінцевими супутниками у складі РС забезпечується за допомогою внутрішньої радіомережі. Внутрішня радіомережа функціонує на основі одного з стандартів наземної радіомережі ШСД з урахуванням її адаптації до особливостей функціонування в космічній системі. За базовий можна обрати стандарт 3GPP, який використовується в різних варіантах для мереж 4G, 5G.

Вибір стандарту обґрунтований наявністю у складі стеку протоколів власних засобів підтримки синхронізації і вимірювань дальності між базовою станцією, функції якої в супутниковій системі виконує кореневий супутник, і терміналом користувача, функції якого виконує прикінцевий супутник. Таким чином, на додаток до інформаційного обміну між кореневим і при-

кінцевими супутниками внутрішня радіомережа РС забезпечує проведення вимірювань взаємного положення супутників. На основі результатів вимірювань похиленої дальності визначаються: координати прикінцевих супутників у супутниковій системі координат кореневого супутника, розраховується взаємне положення і вектор відносної швидкості прикінцевого і кореневого супутників (див. рис. 13).

**Формування зони обслуговування «розподіленого супутника».** Прикінцеві супутники забезпечують формування вузьких радіопромінів для обслуговування земних станцій: терміналів користувачів і станцій спряження GW (див. рис. 14). Зона обслуговування кожного РС формується як сукупність зон обслуговування супутників-ретрансляторів (СР).

На рис. 14 показано два сусідніх РС (РС $N$  і РС $N+1$ ), які рухаються послідовно один за іншим в одній орбітальній площині. Кілька космічних апаратів, які розташовані послідовно один за іншим в одній орбітальній площині на низькій навколосеземній орбіті, формують смугу обслуговування орбітальної площини (Street). Ширина смуги обслуговування однієї орбітальної площини визначається центральним кутом з вершиною  $O$  в центрі Землі, який відповідає

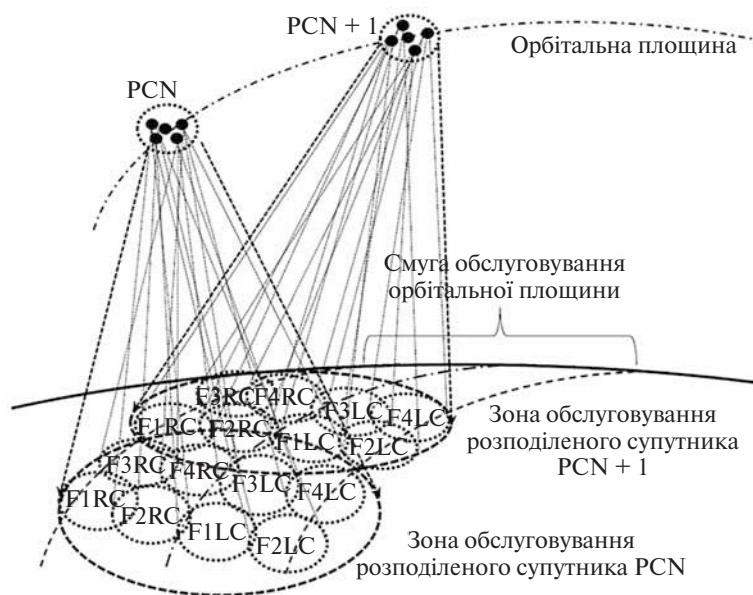


Рис. 14. Формування смуги обслуговування (вулиці) однієї орбітальної площини в LEO System IoT з PC-архітектурою

Таблиця 4. Розмір зони обслуговування одного РС с чотирма СР

Кут місця антени	Розмір зони обслуговування $l_1 \times l_2$ , км		
	$h = 850$ км	$h = 900$ км	$h = 950$ км
40°	1179 × 1669.7	1232.1 × 1745.5	1286.9 × 1823.4
50°	855.2 × 1211.1	899.4 × 1273.5	941.4 × 1331.4
60°	600 × 850.5	631.5 × 892.8	660.3 × 935.1

ширині перетину зон обслуговування двох космічних апаратів, що рухаються послідовно один за іншим в одній орбітальній площині. Ширина перетину зон обслуговування визначається перпендикулярно до орбітальної площини, або перпендикулярно до напрямку руху космічних апаратів. Зону обслуговування кожного РС обрану як половину кола, яке визначається висотою орбіти і мінімальним значенням кута місця антени земної станції — терміналу користувача. У півколо вписано прямокутник, який і визначає зону обслуговування РС. Прямокутну зону обслуговування сформовано за допомогою восьми променів круглої і еліптичної форми. У табл. 4 наведено результати розрахунку розмірів зони обслуговування одного РС з чотирма СР для різних значень висоти кругової орбіти і мінімаль-

ного кута місця антени земної станції — терміналу користувача.

Зони обслуговування одного РС формується за допомогою восьми променів від чотирьох СР. Кожен СР формує два промені. Використовується схема дворазового використання чотирьох частот у поєднанні з двома ортогональними поляризаціями. Кожен СР формує два промені, які не перетинаються, шириною приблизно 16.5° кожен (по рівню половинної потужності). Як показано на рис. 15, а, СР N1 у складі РС-N формує промінь F1RC на частоті F1 з правосторонньою круговою поляризацією, і промінь F1LC на частоті F1 з лівосторонньою круговою поляризацією. СР N2 аналогічно формує два промені на частоті F2: промінь F2RC з правосторонньою круговою поляризацією, і промінь F2LC з лівосторонньою

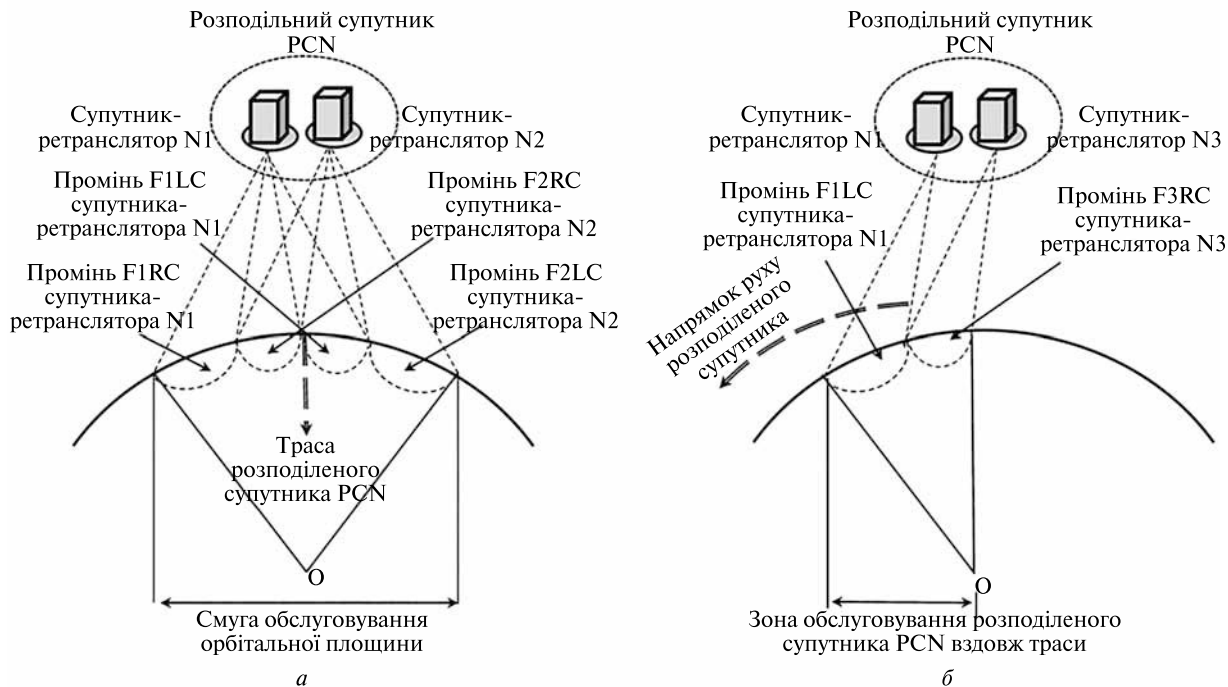


Рис. 15. Формування зони обслуговування РС за допомогою променів СР: а — переріз упоперек напрямку руху, б — переріз вздовж напрямку руху

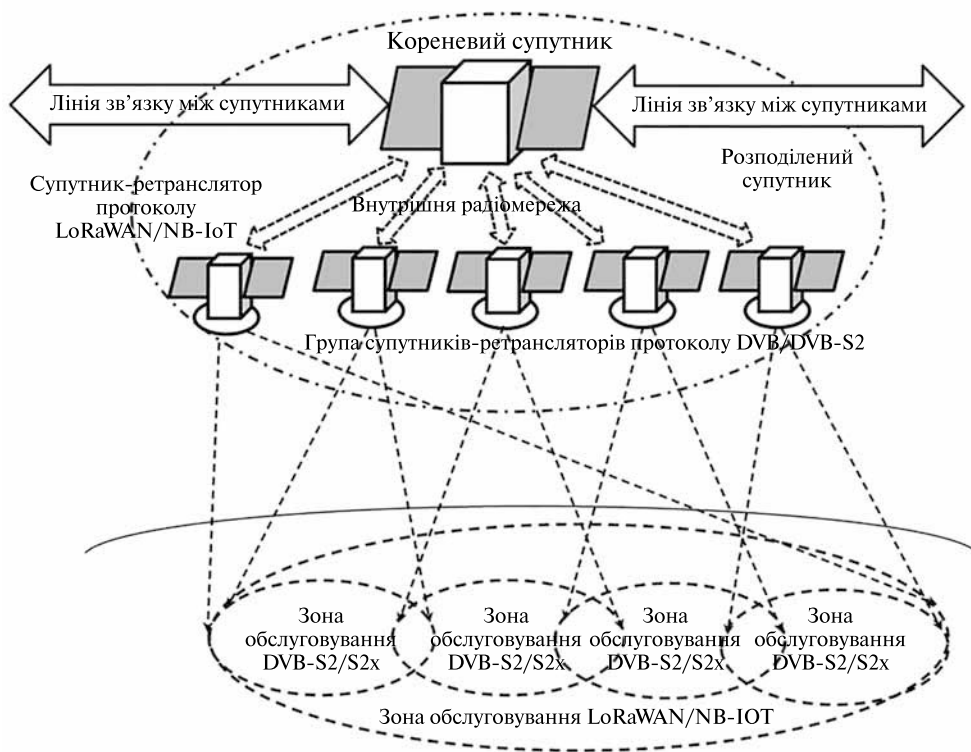


Рис. 16. Формування комбінованої зони обслуговування РС

поляризацією. Промені CP N1 і N2 орієнтовані таким чином, що зони обслуговування їхніх променів на поверхні Землі розташовано в шаховому порядку. Між двома променями, що використовують одну частоту, наприклад F1, розташовано промінь з частотою F2. Аналогічна побудова застосовується для CP N3 і N4, які відповідно використовують частоти F3 і F4 (див. рис. 14). На рис. 15, б показано розташування променів CP N1 і N3 в напрямку руху РС. Зона обслуговування променя F1RC CP N1 на частоті F1 розміщується поруч із зоною обслуговування променя F3RC CP N3 на частоті F3. Використання чотирьох частот у поєднанні з двома ортогональними поляризаціями дозволяє мінімізувати рівень взаємних перешкод між променями.

Останнім часом активно обговорюється питання використання в системах IoT протоколів передачі інформації, розрахованих на передачу на великі відстані інформації безпосередньо від IoT-пристроїв. До цих протоколів належать, наприклад, LoRaWAN, NB-IoT. PC-архітектура є гнучкою і дозволяє впроваджувати нові або додаткові стандарти і протоколи передачі інформації шляхом доповнення складу PC додатковим CP, які реалізують додатковий протокол/стандарт передачі інформації. На рис. 16 показано приклад доповнення PC, що використовує

протокол DVB-S2, додатковим CP, який реалізує протокол LoRaWAN або NB-IoT. Для цього до складу PC додатково додано окремий CP, який реалізує протокол LoRaWAN або NB-IoT в окремому діапазоні частот.

В результаті доповнення PC окремим CP формується комбінована зона обслуговування (див. рис. 16). Комбінована зона обслуговування об'єднує відносно вузькі зони обслуговування CP, які не перетинаються і використовують протокол DVB-S2, і широку зону обслуговування CP, що реалізує протокол LoRaWAN або NB-IoT. З огляду на використання іншого частотного діапазону для надання послуг IoT з використанням протоколу LoRaWAN або NB-IoT ця широка зона обслуговування покриває більш вузькі зони обслуговування з протоколом DVB-S2.

## 5. ОРБІТАЛЬНА РОЗПОДІЛЕНА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА МЕРЕЖА

Для реалізації концепції FC LEO System IoT повинна мати в складі свого орбітального угруповання власні обчислювальні потужності і надавати ці потужності споживачам послуг IoT [3, 5].

Застосована PC-архітектура дозволяє розмістити на безпосередньо на LEO-орбіті власні обчислювальні потужності LEO System IoT. До складу кожного PC включається окремий при-

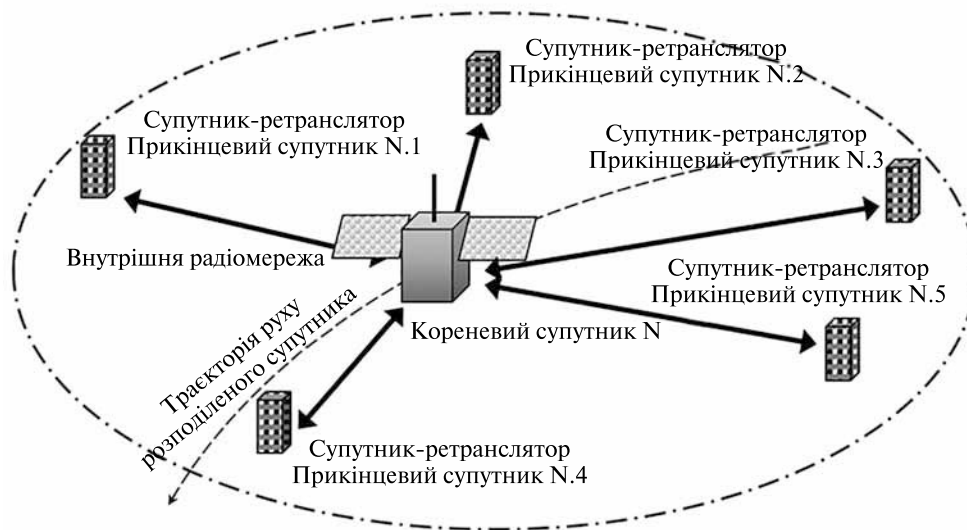


Рис. 17. Розташування обчислювальної потужності супутника-обчислювача в розподіленому супутнику

кінцевий супутник — супутник-обчислювач (СВ) (див. прикінцевий супутник N.5 на рис. 17). Аналогічно прикінцевим СР, СВ побудовано на платформі кубсат. Корисним навантаженням такого супутника є обчислювальний модуль (ВМ). ВМ оснащено власним процесором і пам'яттю (пристрій довготермінового збереження інформації — ДЗУ, та пристрій оперативного збереження інформації — ОЗУ).

Продуктивність ядра ВМ (обчислювальна потужність) визначається на основі компромісу між такими показниками:

- масово-габаритні, енергетичні і теплові характеристики платформи кубсата щодо розміщення та забезпечення функціонування корисного навантаження;
- кількість пристроїв IoT і характеристики IoT-трафіка в зоні обслуговування РС;
- складність алгоритмів обробки інформації IoT, обсяг програмного забезпечення, обмеження щодо припустимого часу обробки інформації IoT.

ВМ реалізується на основі COTS-технологій і відповідного програмного забезпечення.

Залежно від прогнозованого обчислювального навантаження до складу РС можуть бути включені більше одного СВ, наприклад: два, три. У складі кожної орбітальної площини можуть бути передбачені один або кілька РС з декількома СВ. Наявність ISL між РС у своїй орбітальній площині і до РС у сусідніх орбітальних площинах дозволяє використовувати обчислювальні потужності РС з декількома СВ для забезпечення DTA та DSA послуг IoT.

СВ формують однорангову орбітальну розподілену обчислювальну мережу (ОРВС), структуру якої приведено на рис. 18. IoT-пристрої, що перебувають у зоні обслуговування РС, використовують обчислювальну потужність СВ зі складу РС. Зв'язок з IoT-пристроями забезпечують СР. Маршрутизатор кореневого супутника (КС) забезпечує маршрутизацію інформації у внутрішній радіомережі РС, і між абонентами внутрішньої радіомережі РС та іншими РС із використанням ISL. СВ є абонентом внутрішньої радіомережі і через маршрутизатор КС підключений до однорангової ОРВС.

Магістральна мережа зв'язку і передачі даних використовується для забезпечення виконання наступних функцій:

- розподіл надлишкового обчислювального навантаження між СВ у випадку виникнення пікових навантажень в окремих районах зони надання послуг LEO System IoT;
- актуалізація і підтримка бази даних IoT з урахуванням руху РС відносно поверхні Землі;
- забезпечення інформаційного обміну між пристроями IoT, які перебувають в зоні обслуговування різних РС та у смугах обслуговування різних орбітальних площин;
- забезпечення працездатності ОРВС у випадку відмови або несправності одного або декількох СВ.

Відповідно до обраної архітектури орбітального угруповання LEO System IoT [1] кожен РС забезпечує зв'язок з чотирма сусідніми РС: двома у своїй орбітальній площині і по одному найближчому — у двох сусідніх орбітальних площинах. На рис. 19 представлено граф зв'язності ОРВС LEO System IoT. Граф зв'язності має прямокутну ґратчасту форму: кількість стовпців відповідає кількості орбітальних площин  $N$ , кількість рядків — кількості РС в кожній орбітальній площині  $M$ .

Зв'язність однорангової ОРВС має важливе значення для вибору маршруту передачі інформації IoT та при необхідності перерозподілу обчислювального навантаження. Зв'язність ОРВС описується модифікованою матрицею зв'язності. Модифікована матриця зв'язності — прямокутна матриця розмірності  $M \times N$ . Кожен елемент матриці визначає кількість ретрансляцій для доставки інформації від даного РС. Для самого РС значення відповідного елемента матриці дорівнює 0. Наприклад, для РС3.3 (рис. 19) модифікована матриця зв'язності  $H$  має вигляд:

$$H_{3,3} = \begin{bmatrix} 4 & 3 & 2 & 3 & 4 & 5 & \dots & 5 \\ 3 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & \dots & 4 \\ 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 & \dots & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots & 4 \\ 4 & 3 & 2 & 3 & 4 & 5 & \dots & 5 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 5 & 4 & 3 & 4 & 5 & 6 & \dots & 6 \end{bmatrix}. \quad (7)$$



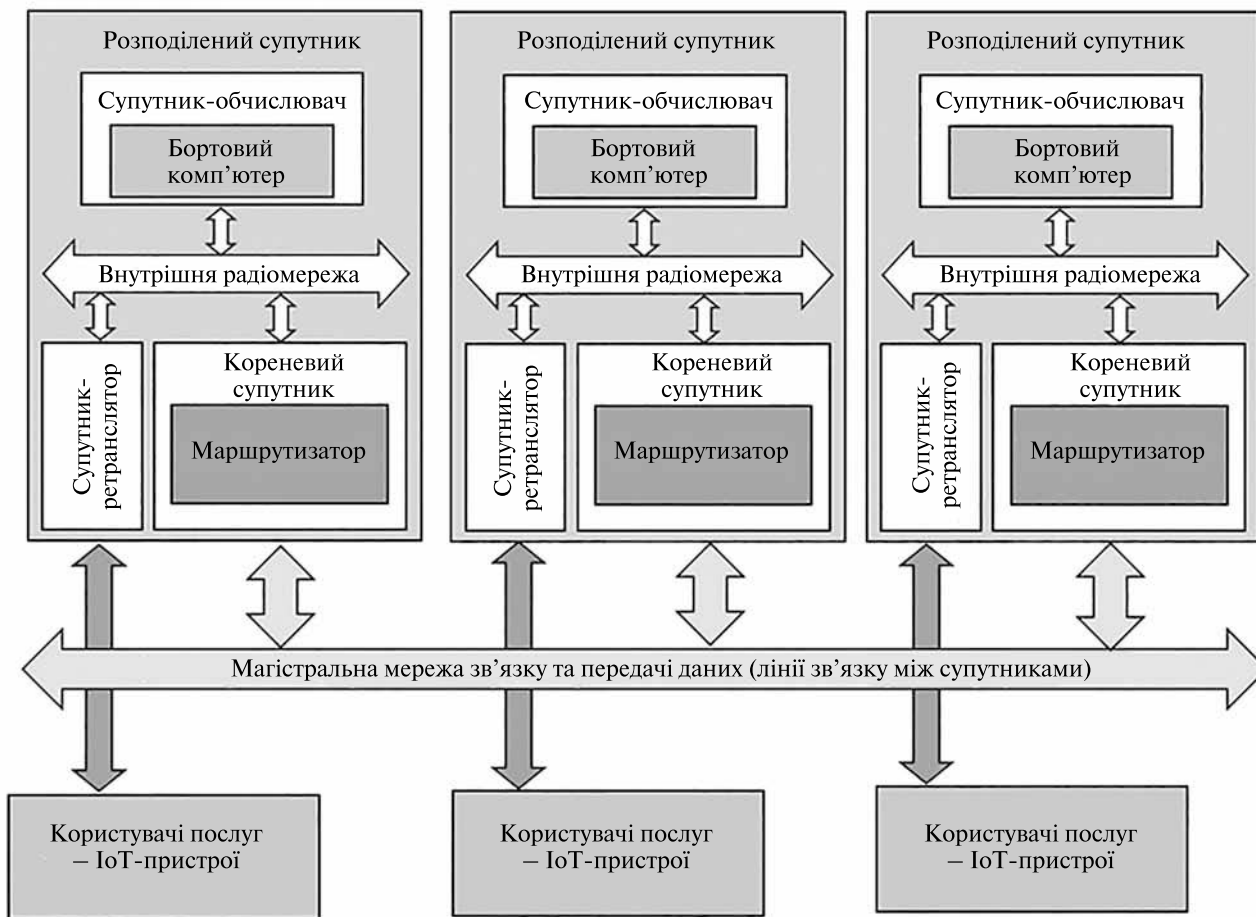


Рис. 18. Однорангова орбітальна розподілена обчислювальна мережа

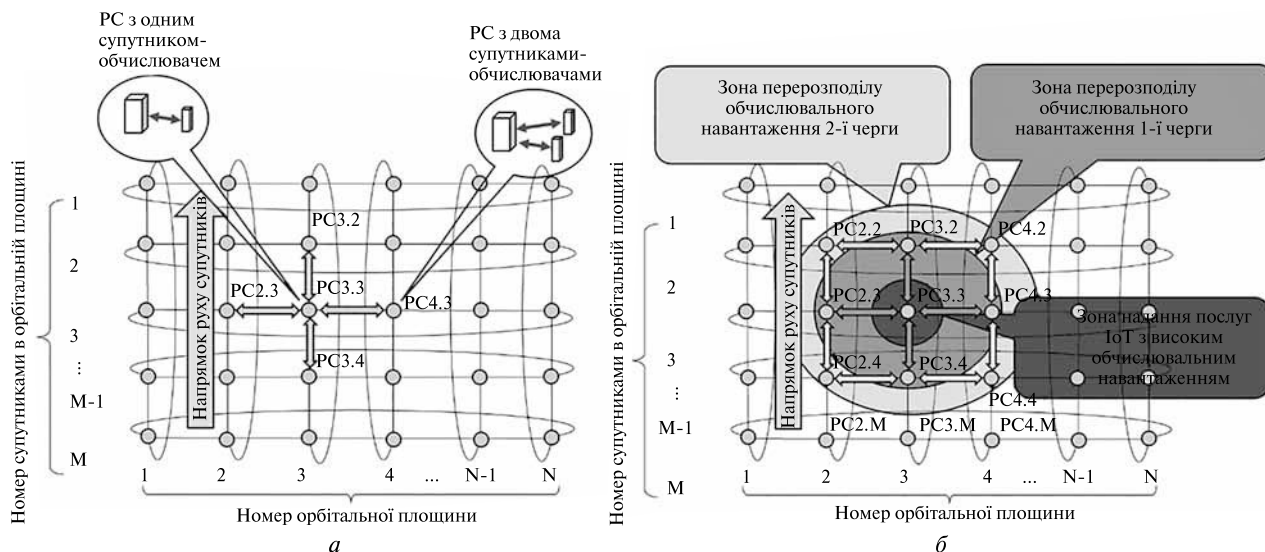


Рис. 19. Граф зв'язності однорангової орбітальної обчислювальної мережі (а) та перерозподіл надлишкового обчислювального навантаження (б)

Значення кожного елемента  $h_{m,n}$  можна обчислити як суму:

$$h_{m,n} = \Delta_m + \Delta_n, \quad (8)$$

де  $\Delta_m$  і  $\Delta_n$  — відповідно різниця номерів РС в орбітальній площині і різниця номерів орбітальних площин. З урахуванням графа зв'язності, наведеного на рис. 19, значення  $\Delta_m$  дорівнюють:

$$\Delta_m = |m_i - m_0| \text{ для } \Delta_m \leq N/2,$$

$$\Delta_m = |M + m_i - m_0| \text{ для } \Delta_m > N/2, m_0 > m_i, \quad (9)$$

$$\Delta_m = |M + m_0 - m_i| \text{ для } \Delta_m > N/2, m_i > m_0.$$

Значення  $\Delta_n$  обчислюється аналогічно.

**Орбітальна локалізована база даних.** Інформація, що зберігається в ДЗУ ВМ СВ, формує базу даних (БД). В БД міститься така інформація:

- дані про IoT-пристрої (MAC- і IP-адреси, тип і метод адресації, тип пристрою, координати, константи, коефіцієнти);
- програмне забезпечення для обробки інформації IoT (універсальне і спеціалізоване для кожного типу IoT-пристроїв і виду послуги IoT);
- результати обробки інформації IoT-пристроїв в реальному масштабі часу.

Сукупність БД окремих СВ формує розподілену базу даних (РБД) LEO System IoT. БД розділена на дві частини: консервативну і оперативну. Консервативна частина містить інформацію з тривалим терміном зберігання, актуальність якої зберігається протягом інтервалу часу, що перевищує один орбітальний період. Оперативна частина містить поточні результати обробки інформації IoT в режимі реального часу. Оперативна частина БД локалізована для кожного району і є локалізованою БД (ЛБД). Сукупність ЛБД всіх СВ зі складу LEO System IoT формують розподілену локалізовану базу даних (РЛБД).

З огляду на постійний рух супутників відносно поверхні Землі для забезпечення неперервності надання послуги LEO System IoT повинна забезпечити передачу результатів попередніх операцій обробки інформації пристроїв IoT від СВ зі складу РС, що «виходить» із зони радіовидимості, до СВ зі складу РС, що «приходить», тобто підтримувати ЛБД для кожного району в актуальному стані. Алгоритм маршрутизації трафіка РЛБД забезпечує передачу та обмін ре-

зультатами поточної обробки інформації IoT-пристроїв по лініях зв'язку між РС у прив'язці до району розміщення IoT-пристроїв. На рис. 20 показано схему передачі інформації в одній орбітальній площині. Як видно, напрямок циркуляції інформації РЛБД протилежний напрямку руху супутників у орбітальній площині.

Алгоритм маршрутизації трафіка РЛБД повинен враховувати вплив обертання Землі, яке проявляється в тому, що пристрої IoT, які перебувають на межі смуг обслуговування двох сусідніх орбітальних площин, поступово переходять зі смуги обслуговування однієї орбітальної площини у смугу обслуговування іншої орбітальної площини [16]. Це може призвести до втрати неперервності обслуговування IoT-пристроїв.

Для виключення переривання обслуговування IoT-пристроїв ОРВС повинна забезпечувати маршрутизацію частини трафіка оперативної частини РЛБД у сусідні орбітальні площини в напрямку обертання Землі. Граф маршрутизації трафіка РЛБД в орбітальних площинах і між ними показано на рис. 19, б.

**Розподіл надлишкової обчислювального навантаження.** Однорангова ОРВС дозволяє на основі ознаки пріоритетності інформації IoT перерозподіляти надлишкове обчислювальне навантаження у випадку виникнення пікових навантажень на окремі СВ, і здійснювати реконфігурацію ОРВС при відмові окремих СВ. Прийнятний час обробки інформації IoT для кожного виду послуги IoT є однією з ознак, що визначають пріоритетність інформації IoT. Маршрут передачі інформації IoT обирається з урахуванням мінімізації затримки, яка залежить від конфігурації орбітального угруповання LEO System IoT.

Пікова продуктивність ВМ  $\pi_{m,n}$ , який входить до складу СВ РС( $m,n$ ), є чинником, що обмежує обчислювальні можливості одного СВ і ОРВС в цілому. Пікова продуктивність  $\pi_{m,n}$  — це максимальна кількість елементарних обчислювальних операцій, які можуть бути виконані ВМ без помилок в реальному масштабі часу за умови, що час очікування обробки запиту IoT-пристрою не перевищує встановлене обмеження  $t_{IoT-Lim}$ . Пікова, або максимальна продуктивність ВМ

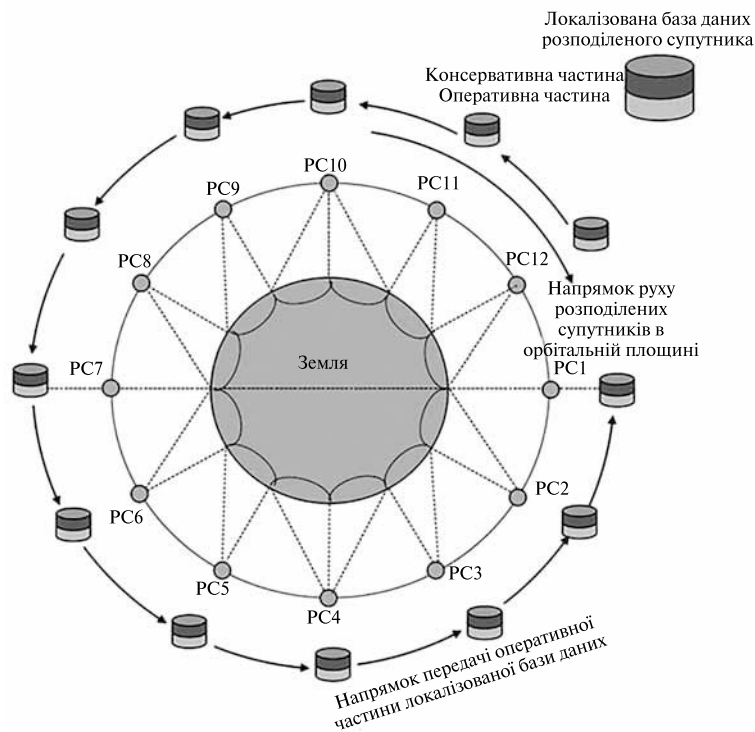


Рис. 20. Розподілена база даних однієї орбітальної площини низькоорбітальної системи IoT

СВ  $\pi_{m,n}$  визначається з урахуванням параметрів його процесора, включаючи розмір КЕШ пам'яті 1-го, 2-го і 3-го рівня, ОЗУ і ДЗУ. У випадку, коли обчислювальне навантаження  $L_{m,n}$  для РС( $m,n$ ) наближається або перевищує його пікову продуктивність  $\pi_{m,n}$ , ОРВС приймає рішення про перерозподіл надмірного обчислювального навантаження і про передачу частини обчислювального навантаження до СВ зі складу сусідніх РС.

Перерозподіл надлишкового обчислювального навантаження здійснюється із використанням критерію пріоритетності обслуговування інформації IoT-пристроїв. Пріоритетність обслуговування визначається допустимим часом обробки запиту IoT-пристрою  $t_{IoT-Lim}$  і отримання інформації, що керує виконавчими IoT-пристроями з урахуванням затримки на передачу в каналі супутникової лінії «Земля — космос» і «космос — Земля», а також інших затримок на двосторонню передачу між РС.

На рис. 21 представлено алгоритм перерозподілу надлишкового обчислювального навантаження в ОРВС. У випадку, коли обчислювальне навантаження  $L_{m,n}$  перевищує пікову продуктивність  $\pi_{m,n}$  СВ, аналізується пріоритет інформації, що надійшла. Якщо інформація IoT-пристрою має пріоритет 0 — інформація передається на обробку до ВМ РС( $m, n$ ) (свого СВ). Якщо інформація має пріоритет 1 — інформація спрямовується для передачі і подальшої обробки до СВ зі складу РС, для якого значення елемента  $h_{m,n}$  модифікованої матриці зв'язності  $H$  для РС( $m, n$ ) становить  $h_{m,n} = 1$ . Якщо інформація має пріоритет 2 — інформація спрямовується для передачі і подальшої обробки до СВ зі складу РС, для якого значення елемента  $h_{m,n}$  модифікованої матриці зв'язності  $H$  для РС( $m,n$ ) становить  $h_{m,n} = 2$ .

З урахуванням модифікованої матриці зв'язності  $H$ , форма якої визначається виразом (7), для кожного РС визначаються зони розподілу обчислювального навантаження (див. рис.19, б):

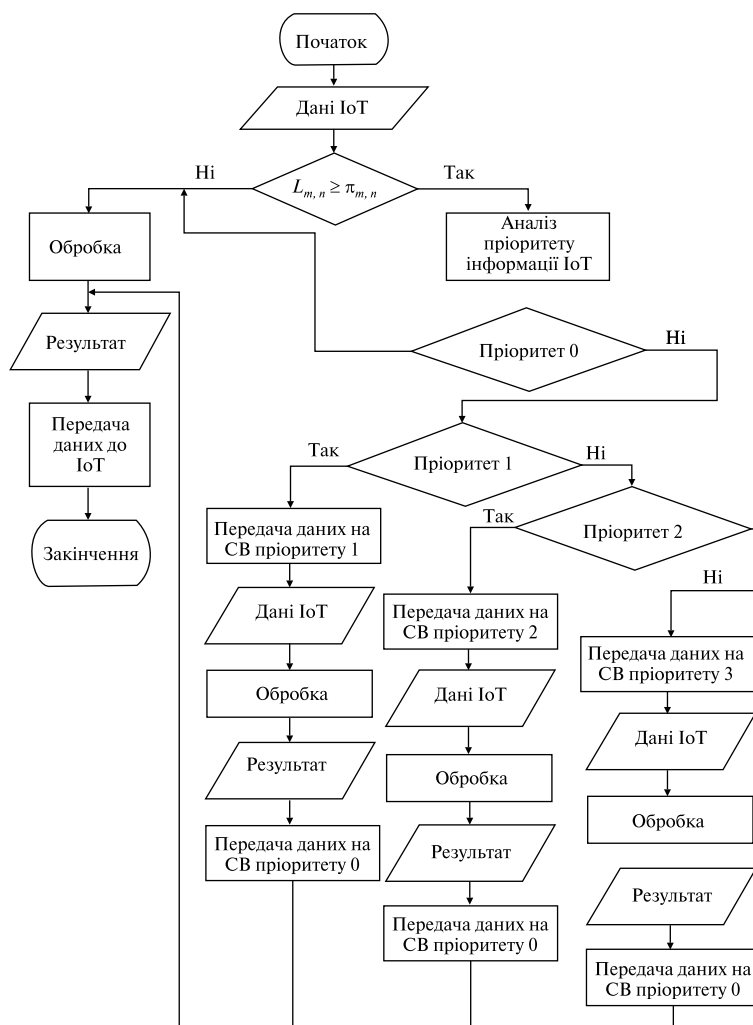


Рис. 21. Алгоритм перерозподілу надлишкового обчислювального навантаження в орбітальній розподіленій обчислювальній мережі

зона розподілу обчислювального навантаження IoT 1-ї черги, зона розподілу обчислювального навантаження IoT 2-ї черги і т. ін.

Величина затримки передачі і обробки інформації IoT-пристрою залежить від структури тракту передачі інформації. В LEO System IoT інформація IoT, що передається по лінії «Земля — космос» (від IoT-пристрою до СВ) і у зворотному напрямку передаються по складеному тракту (див. рис. 22). До складу тракту входять: мережа радіодоступу між IoT-пристроєм і VSAT-терміналом, супутникова радіолінія (радіолінія «Земля — космос» або «космос — Зем-

ля») між VSAT-терміналом і СВ, внутрішня радіомережа РС.

Програмне забезпечення послуги IoT знаходиться на прикладному рівні TCP/IP у складі IoT-пристрою: джерела інформації — давачка, або приводу — виконавчого органу; і у складі СВ. Інформація IoT-пристрою передається по внутрішніх інтерфейсах через нижчі рівні стеку протоколів TCP/IP: транспортний, мережевий, каналний, — до фізичного рівня для передачі через радіоінтерфейс. Процедура інкапсуляції IoT-посилки визначається стандартом наземної мережі радіодоступу.

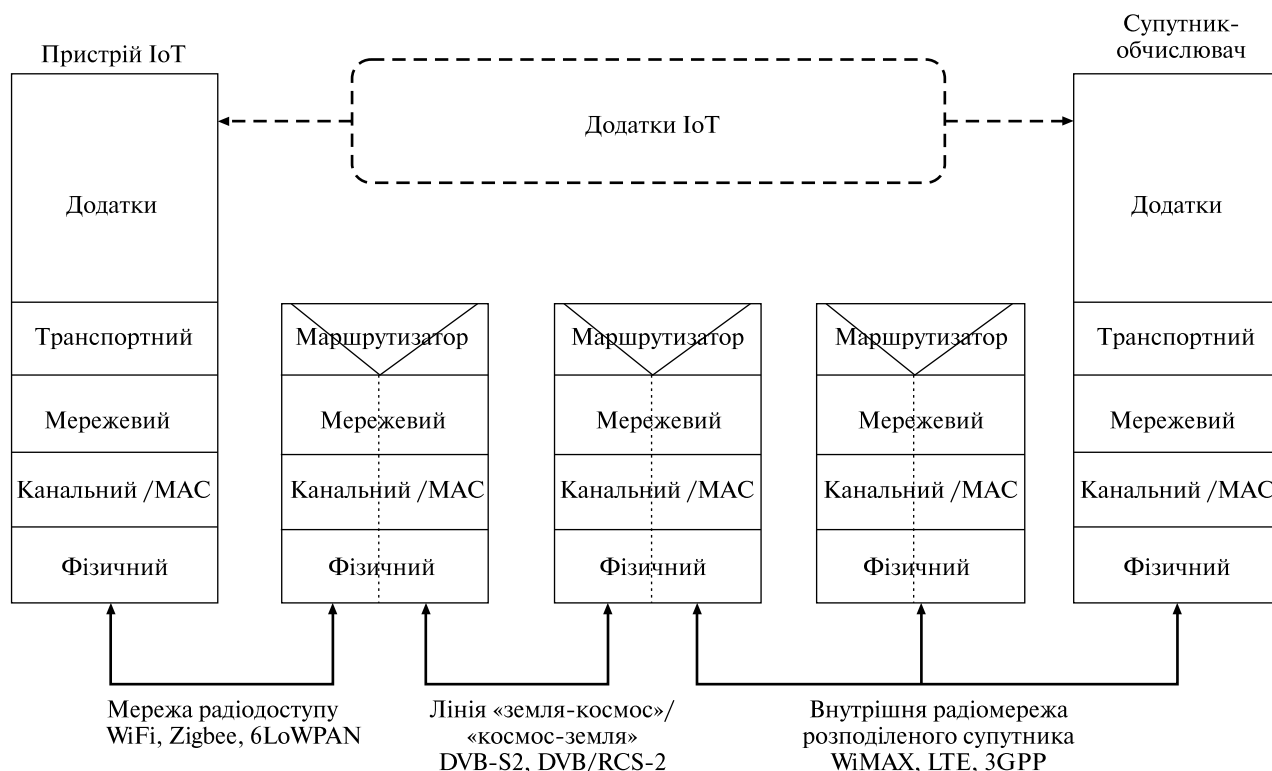


Рис. 22. Тракт передачі інформації IoT на ланці IoT-пристрій — СВ

Наземну мережу можна побудувати на основі одного із стандартів, орієнтованих на низьке енергоспоживання термінальними пристроями: WiFi, Zigbee, 6LoWPAN, LoRaWAN тощо. Центральну станцію наземної мережі радіодоступу об'єднано з VSAT-терміналом, де здійснюється маршрутизація інформації IoT і формування/обробка транспортного потоку супутникової лінії «Земля — космос» і «космос — Земля». У випадку використання високошвидкісних супутникових радіоліній передбачається використання стандарту DVB/RCS-2.

СР приймає транспортний потік від супутникової лінії «Земля — космос» і спрямовує інформацію IoT до внутрішньої радіомережі РС. По внутрішній радіомережі інформація IoT надходить на маршрутизатор КС і далі до СВ, де провадиться обробка інформації і виконуються необхідні обчислення згідно з алгоритмом функціонування системи IoT. Результат обробки передається до IoT-пристрою у зворотному напрямку.

**Очікувана затримка.** Час формування відгуку в LEO System IoT з урахуванням часу обробки інформації в СВ становить

$$T_{IoT} = t_{S-C} + t_{comp} + t_{C-R}, \quad (10)$$

де  $t_{S-C}$  — затримка передачі інформації IoT до СВ,  $t_{comp}$  — час обробки інформації IoT в СВ,  $t_{C-R}$  — затримка передачі команди (результату обробки посилання) до виконавчого IoT-пристрою.

Затримка передачі інформації IoT до СВ становить

$$t_{S-C} = t_{IoT1} + t_{WiFi} + t_{VSATup} + t_{up} + t_{ST1} + t_{SN1} + t_{CS} + t_{SN2}, \quad (11)$$

де  $t_{IoT1}$  — час формування інформації в IoT-пристрої,  $t_{WiFi}$  — затримка на передачу у наземній мережі радіодоступу,  $t_{VSATup}$  — затримка на маршрутизацію інформації і перетворення форматів у VSAT-терміналі,  $t_{up}$  — затримка на передачу по супутниковій радіолінії «Земля — космос»,  $t_{ST1}$  — затримка на обробку висхідного потоку і перетворення формату інформації в СР,  $t_{SN1}$  — затримка на передачу інформації по вну-



Таблиця 5. Межі змін затримки на поширення у супутниковій радіолінії у тракці передачі посилення/команди IoT-пристроїв

Висота орбіти, км	Мінімальна затримка, мс	Максимальна затримка, мс		
		$\beta_{\min} = 40^\circ$	$\beta_{\min} = 50^\circ$	$\beta_{\min} = 60^\circ$
500	1.67	2.47	2.13	1.9
800	2.67	3.86	3.35	3.03
1100	3.67	5.2	4.56	4.13

трішній радіомережі,  $t_{CS}$  — затримка на маршрутизацію інформації в КС,  $t_{SN2}$  — затримка на передачу інформації по внутрішній радіомережі до СВ. Затримка передачі відгуку на опрацьовану інформацію, або команди від СВ до виконавчого IoT-пристрою  $t_{C-R}$  має аналогічні складові. Відмінність полягає в заміні параметра  $t_{up}$  параметром  $t_{down}$  — затримка на передачу в супутниковій радіолінії «космос — Земля». У табл. 5 наведено межі зміни затримки на поширення в супутниковій радіолінії в тракці передачі посилки / команди IoT-пристрою. З огляду на обмежені розміри наземної мережі радіодоступу, внутрішньої радіомережі розподіленого супутника, а також нормування затримки в обладнанні формування / обробки, перетворення форматів і маршрутизації інформації при його розробці та виготовленні, ряд складових сумарної затримки при передачі посилки / команди IoT-пристрою можна вважати мінімальними, що не мають істотного впливу на величину затримки. До них належать складові  $t_{IoT1}$ ;  $t_{WiFi}$ ;  $t_{VSATup}$ ;  $t_{ST1}$ ;  $t_{SM1}$ ;  $t_{CS}$ ;  $t_{SN2}$ . Складовими, які вносять найбільшу невизначеність, є  $t_{up}$  /  $t_{down}$ .

## 6. КЕРУВАННЯ ОРБІТАЛЬНИМ СЕГМЕНТОМ. НАЗЕМНИЙ КОМПЛЕКС КЕРУВАННЯ

Керування функціонуванням орбітального сегмента LEO System IoT здійснюється наземним комплексом керування (НKK). На рис. 23 приведено структуру НKK-системи. НKK має елементи, традиційні для керування космічними системами:

- центр керування польотом (ЦКП),
- командно-вимірювальні і телеметричні станції (Станція А, Станція В),

- мережа передачі даних.

Обрана архітектура ОС системи вносить ряд особливостей в завдання і порядок функціонування НKK. Керування ОС системи в цілому і кожним космічним апаратом зі складу ОС окремо умовно поділене на три етапи:

- етап первинного розгортання орбітального угруповання, або виведення окремого космічного апарата для відновлення чи нарощування можливостей орбітального угруповання;
- етап штатної експлуатації орбітального угруповання і космічних апаратів, що входять до його складу;
- виведення космічного апарата з експлуатації наприкінці строку його експлуатації, або у випадку критичної невідновлювальної відмови, і його вхід в щільні шари атмосфери для припинення існування.

На етапі виведення космічного апарата при первинному розгортанні ОС або при його нарощуванні, модернізації шляхом заміни окремих космічних апаратів або відновлення функціонування після відмови одного з космічних апаратів, ЦКП за допомогою наземної командно-вимірювальної і телеметричної станції — Станції В (рис. 23) забезпечує керування польотом космічного апарата до його включення до складу РС. Взаємодія ЦКП і Станції В здійснюється по наземній мережі передачі даних. Станція В взаємодіє з окремим космічним апаратом (КА на етапі виведення, на рис. 23) по радіоканалу передачі командної інформації (КІ) і прийому телеметричної інформації (ТМІ) / вимірювання похиленої дальності. Керування здійснюється до формування польотної конфігурації РС і передачі керування космічним апаратом до РС.

На етапі штатної експлуатації керування всіма космічними апаратами зі складу орбітального угруповання провадиться за допомогою єдиного потоку командної інформації орбітальним угрупованням КІ ОС. Телеметрична інформація від усіх функціонуючих космічних апаратів зі складу орбітального угруповання передається в НKK в єдиному потоці передачі телеметричної інформації ТМІ ОС. Передачу потоку КІ ОС і прийом потоку ТМІ ОС забезпечує Станція А. Передача / прийом потоків КІ ОС і ТМІ ОС здійснюється

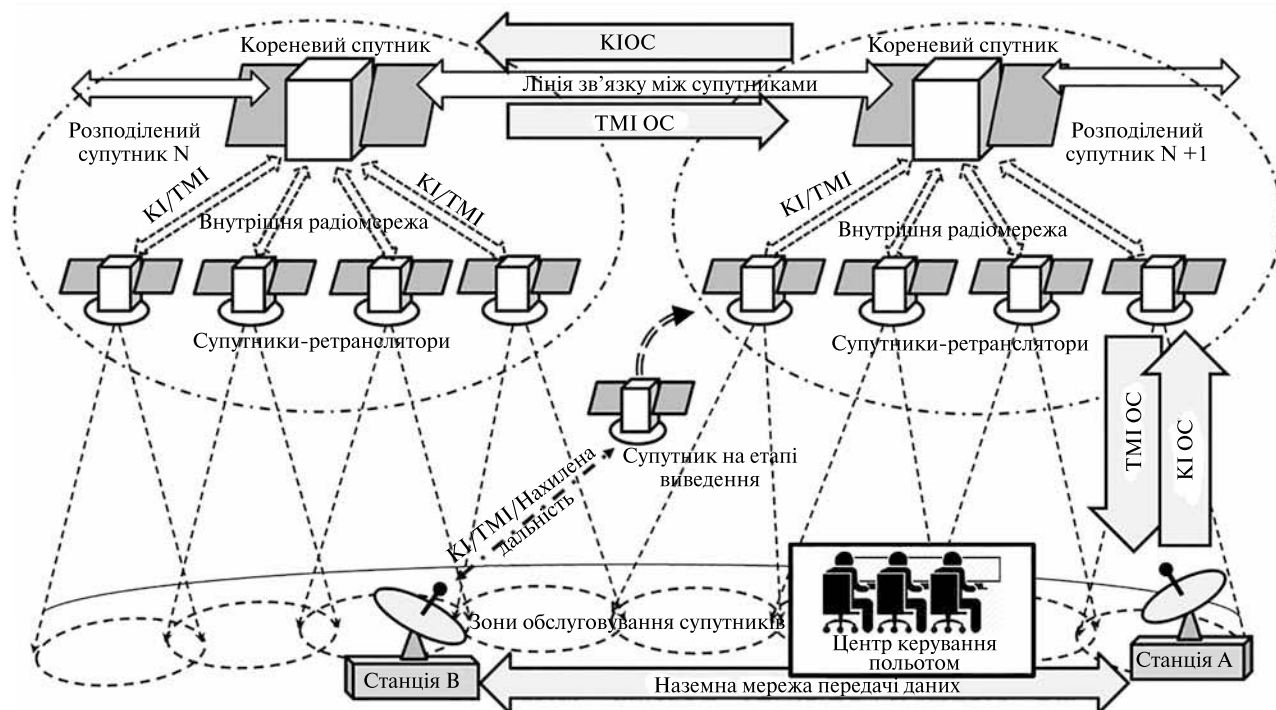


Рис. 23. Структура НКК супутникової системи інтернету речей

в діапазоні робочих частот LEO System IoT для передачі інформації IoT-пристроїв. Передачу / прийом потоків забезпечує РС, в зоні обслуговування якого перебуває станція А, через відповідний СР. Потік КІ ОС, який СР приймає від Станції А, передається до маршрутизатора КС РС<sub>N+1</sub> і розподіляється для передачі: сусіднім РС через ISL (на рис. 23 — до РС<sub>N</sub>) і до прикінцевих супутників РС<sub>N+1</sub>. У зворотному напрямку передається ТМІ. Потік ТМІ надходить до маршрутизатора КС від сусідніх РС через ISL. По внутрішній радіомережі РС надходить ТМІ-інформація від прикінцевих супутників. КС формує груповий потік ТМІ і передає його до СР, в зоні обслуговування якого перебуває станція А зі складу НКК.

Для проведення вимірювань параметрів орбіти РС НКК на сеансовій основі використовує Станцію В. Станція В проводить сеанси вимірювань похиленої дальності для визначення параметрів руху КС зі складу РС. Параметри руху прикінцевих супутників зі складу РС визначаються за допомогою вимірювань відносного по-

ложення та руху прикінцевих супутників відносно КС, які здійснює внутрішня радіомережа РС.

На етапі виведення космічного апарата з експлуатації та його керованого входу у щільні шари атмосфери для припинення існування застосовується Станція В. Рішення про виведення з експлуатації космічного апарата приймає ЦКП на основі аналізу ТМІ інформації у випадку виникнення критичної відмови або, наприклад, при зниженні запасу палива бортової рушійної установки (робочого тіла) до критичного значення. При отриманні команди на припинення експлуатації космічний апарат переходить на керування по командно-телеметричній ВЧ-радіолінії зі Станції В, виконує маневр виходу зі складу польотної структури РС і переходить на траєкторію зниження і входження в атмосферу для подальшого припинення існування.

## ВИСНОВКИ

1. Запропоновано концепцію архітектури низькоорбітальної супутникової системи інтернету речей, орієнтованої на широке коло споживачів

послуг інтернету речей, як толерантних до величини затримки обробки інформації інтернету речей, так і чутливих до величини затримки.

2. Низькоорбітальну супутникову систему інтернету речей побудовано з використанням стандартизованих інформаційних технологій супутникового зв'язку та інтернету речей. Вона реалізує механізми, спрямовані на виконання вимог міжнародних регуляторних документів у галузі регулювання використання радіочастот, доступу до орбіт, космічного сміття тощо.

3. Низькоорбітальну супутникову систему інтернету речей побудовано на основі централізованої архітектури «розподіленого супутника» з використанням мікросупутників і кубсатів. Застосування у проекті системи мікросупутників і кубсатів зумовлене досвідом національних підприємств: конструкторських бюро, промислових підприємств і вищих навчальних закладів у виготовленні і орбітальній експлуатації космічних апаратів такого класу.

4. Для реалізації концепції «туманних обчислень» до складу орбітального сегмента системи включено орбітальну розподілену обчислюваль-

ну мережу, яка дозволяє істотно скоротити час обробки інформації інтернету речей і підвищити оперативність, надійність і гнучкість послуг, що надаються.

5. Застосування архітектури «розподіленого супутника» дозволяє реалізувати мультипротокольну та мультисервісну систему інтернету речей і гнучко впроваджувати нові протоколи і послуги по мірі їхньої появи і стандартизації.

6. У проекті низькоорбітальної супутникової системи інтернету речей передбачається широке застосування комерційних інформаційних технологій і обладнання, що серійно випускається комерційними постачальниками, для зниження вартості розробки і розгортання як космічного сегмента, так і наземного сегмента системи, включно із термінальним обладнанням користувачів і обладнанням наземних радіомереж доступу.

7. Запропоновані технічні рішення дозволяють надавати кінцевим споживачам не тільки послуги інтернету речей, але і послуги ширококосмугового супутникового доступу до мережі інтернет.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ильченко М. Е., Наритник Т. Н., Рассомакин Б. М., Присяжний В. И., Капштык С. В. Создание архитектуры «распределенного спутника» для низкоорбитальных информационно-телекоммуникационных систем на основе группировки микро- и наноспутников. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 2 (146). С. 33—43.
2. Интернет вещей. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Интернет\\_вещей](https://ru.wikipedia.org/wiki/Интернет_вещей) (дата звернення 10.10.2019).
3. Проферансов Д. Ю., Сафонова И. Е. К вопросу о туманных вычислениях и интернете вещей. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2017. № 4 (21). С. 30—39.
4. Туманные вычисления. *Fog Computing*. 2018. URL: [www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные\\_вычисления\\_%28Fog\\_computing%29](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные_вычисления_%28Fog_computing%29) (дата звернення 10.10.2019).
5. Туманные вычисления (Fog Computing), как составная часть 5G. URL: <https://shalaginov.com/2018/07/24/4510/> (дата звернення: 10.10.2019).
6. 2800 microsattellites to launch over next five years: SpaceWorks. URL: <http://satelliteprome.com/news/2800-microsatellites-to-launch-over-next-five-years-spaceworks/> (дата звернення: 10.10.2019).
7. Coldewey D. SpaceX reveals more Starlink info after launch of first 60 satellites. URL: <https://techcrunch.com/2019/05/24/spacex-reveals-more-starlink-info-after-launch-of-first-60-satellites/> (дата звернення: 10.10.2019).
8. Fleet. URL: <https://www.fleet.space/portal> (дата звернення 10.10.2019).
9. Gavish B., Kalvenes J. The impact of satellite altitude on the performance of LEOS based communication systems. *Wireless Networks*. 1998. 4. P. 199—213. URL: <https://www.researchgate.net/publication/220292693> (дата звернення: 10.10.2019).
10. Handley M. Delay is Not an Option: Low Latency Routing in Space/Mark Handley, University College London/Proceeding HotNets '18 Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. P. 85—91. URL: <https://doi.org/10.1145/3286062.3286075> (дата звернення: 10.10.2019).
11. Internet of Things Statistics 2019 [The Rise of IoT]. URL: <https://techjury.net/stats-about/internet-of-things-statistics/> (дата звернення: 10.10.2019).
12. Kota S., Giambene G. Satellite 5G: IoT Use Case for Rural Areas Applications. Conference: The Eleventh International Conference on Advances in Satellite and Space Communications — SPACOMM 2019, At Valencia, Spain, March 24 —

- 28, 2019. URL: [https://www.researchgate.net/publication/332029135\\_Satellite\\_5G\\_IoT\\_Use\\_Case\\_for\\_Rural\\_Areas\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/332029135_Satellite_5G_IoT_Use_Case_for_Rural_Areas_Applications) (дата звернення: 10.10.2019).
13. LeoSat/Gunter's space page. URL: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/leosat.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/leosat.htm) (дата звернення: 10.10.2019).
14. LEOSAT non-geostationary satellite system. Attachment A. Technical Annex to Supplement Schedule S. URL: <file:///C:/Users/admin/Downloads/Technical%20Annex.pdf> (дата звернення: 10.10.2019).
15. Narayanasamy A., Ahmad Y. A., Othman M. Nanosatellite constellation as an IoT communication platform for near equatorial countries/6th International Conference on Mechatronics — ICOM'17.
16. Narytnik T., Rassamakin B., Prisyazhny V., Kapshtyk S. Coverage Area Formation for a Low-Orbit Broadband Access System with Distributed Satellites UkrMiCo-2018.
17. OneWeb Minisatellite Constellation for Global Internet Service. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/oneweb> (дата звернення: 10.10.2019).
18. SpaceBelt 1, ..., 10/Gunter's space page. URL: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/spacebelt.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/spacebelt.htm) (дата звернення: 10.10.2019).
19. SpaceBelt: Our First Outer Space Partner. URL: <https://wasabi.com/blog/spacebelt/> (дата звернення 10.10.2019).
20. SpaceX V-band non-geostationary satellite system. Attachment a technical information to supplement schedules. URL: [file:///C:/Users/admin/Downloads/Technical%20Attachment%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/Technical%20Attachment%20(1).pdf) (дата звернення: 10.10.2019).
21. State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B — Market accelerating. URL: <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/> (дата звернення: 10.10.2019).
22. Ten Million Euros to Fund the First Demonstration of GLoT by NanoAvionics, KSAT and Antwerp Space. URL: <http://www.satnews.com/story.php?number=1179815788> (дата звернення: 10.10.2019).
23. Wang B. FCC will approve Kepler, LeoSat, Telesat and SpaceX satellites. 2018. URL: <https://www.nextbigfuture.com/2018/11/fcc-will-approve-kepler-leosat-telesat-and-spacex-satellites.html> (дата звернення: 10.10.2019).
24. Zhicheng Qu, Gengxin Zhang, Naotong Cao, Jidong Xie. LEO Satellite Constellation for Internet of Things. *IEEE Access*. 2017. 5. P. 18391—8401. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2735988/. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8002583/authors#authors> (дата звернення: 10.10.2019).

Стаття надійшла до редакції 10.10.2019

## REFERENCES

1. Il'chenko M. E., Narytnik T. N., Rassamakin B. M., Prisyazhnyj V. I., Kapshtyk S. V. (2018). Creation of the architecture of "Distributed Satellite" for low-orbital information-telecommunication systems based on the grouping of micro and nanosatellites. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, № 2 (146), 33—43 [In Russian].
2. Internet veshhej. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Интернет\\_вещей](https://ru.wikipedia.org/wiki/Интернет_вещей) (Last accessed: 10.10.2019).
3. Proferansov D. Ju., Safonova I. E. (2017). To a question of fog computing and the Internet of things. *Obrazovatel'nye resursy i tehnologii*, № 4 (21), 30—39 [In Russian].
4. Fog Computing. 2018. URL: [www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные\\_вычисления\\_%28Fog\\_computing%29](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Туманные_вычисления_%28Fog_computing%29) (Last accessed: 10.10.2019).
5. Fog computing (Fog Computing) as component 5G. 2018. URL: <https://shalaginov.com/2018/07/24/4510/> (Last accessed: 10.10.2019).
6. 2800 microsattellites to launch over next five years: SpaceWorks. URL: <http://satelliteprome.com/news/2800-microsatellites-to-launch-over-next-five-years-spaceworks/> (Last accessed: 00.08.2019).
7. Coldewey D. (2019). SpaceX reveals more Starlink info after launch of first 60 satellites. URL: <https://techcrunch.com/2019/05/24/spacex-reveals-more-starlink-info-after-launch-of-first-60-satellites/> (Last accessed: 00.08.2019).
8. Fleet. URL: <https://www.fleet.space/portal> (Last accessed: 10.10.2019).
9. Gavish B., Kalvenes J. (1998). The impact of satellite altitude on the performance of LEOS based communication systems. *Wireless Networks*, 4, 199—213. URL: <https://www.researchgate.net/publication/220292693> (Last accessed: 10.10.2019).
10. Handley M. Delay is Not an Option: Low Latency Routing in Space. University College London/Proceeding HotNets '18 Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, 85—91. URL: <https://doi.org/10.1145/3286062.3286075> (Last accessed: 10.10.2019).
11. Internet of Things Statistics 2019 [The Rise of IoT]. URL: <https://techjury.net/stats-about/internet-of-things-statistics/> (Last accessed: 10.10.2019).
12. Kota S., Giambene G. (2019). Satellite 5G: IoT Use Case for Rural Areas Applications. Conference: The Eleventh International Conference on Advances in Satellite and Space Communications — SPACOMM 2019, At Valencia, Spain, March 24—28, 2019. URL: [https://www.researchgate.net/publication/332029135\\_Satellite\\_5G\\_IoT\\_Use\\_Case\\_for\\_Rural\\_Areas\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/332029135_Satellite_5G_IoT_Use_Case_for_Rural_Areas_Applications) (Last accessed: 10.10.2019).



13. LeoSat/GUNTER'S SPACE PAGE. URL: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/leosat.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/leosat.htm) (Last accessed: 00.08.2019).
14. LEOSAT NON-GEOSTATIONARY SATELLITE SYSTEM. ATTACHMENT A. Technical Annex to Supplement Schedule S. URL: <file:///C:/Users/admin/Downloads/Technical%20Annex.pdf> (Last accessed: 10.10.2019).
15. Narayanasamy A., Ahmad Y. A., Othman M. Nanosatellite constellation as an IoT communication platform for near equatorial countries/6th International Conference on Mechatronics — ICOM'17.
16. Narytnik T., Rassamak B., Prisyazhny V., Kapshtyk S. (2018). Coverage Area Formation for a Low-Orbit Broadband Access System with Distributed Satellites UkrMiCo-2018.
17. OneWeb Minisatellite Constellation for Global Internet Service. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/oneweb> (Last accessed: 00.08.2019).
18. SpaceBelt 1, ..., 10/GUNTER'S SPACE PAGE. URL: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/spacebelt.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/spacebelt.htm) (Last accessed: 10.10.2019).
19. SpaceBelt: Our First Outer Space Partner. URL: <https://wasabi.com/blog/spacebelt/> (Last accessed: 10.10.2019).
20. SPACEX V-band non-geostationary satellite system. Attachment A. Technical information to supplement schedules. URL: [file:///C:/Users/admin/Downloads/Technical%20Attachment%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/Technical%20Attachment%20(1).pdf) (Last accessed: 10.10.2019).
21. State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B — Market accelerating. URL: <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/> (Last accessed: 10.10.2019).
22. Ten Million Euros to Fund the First Demonstration of GLoT by NanoAvionics, KSAT and Antwerp Space. URL: <http://www.satnews.com/story.php?number=1179815788> (Last accessed: 10.10.2019).
23. Wang B. (2018). FCC will approve Kepler, LeoSat, Telesat and SpaceX satellites. URL: <https://www.nextbigfuture.com/2018/11/fcc-will-approve-kepler-leosat-telesat-and-spacex-satellites.html> (Last accessed: 10.10.2019).
24. Zhicheng Qu, Gengxin Zhang, Haotong Cao, Jidong Xie. (2017). LEO Satellite Constellation for Internet of Things. IEEE Access (Vol. 5), 18391—18401. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2735988/. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8002583/authors#authors> (Last accessed: 10.10.2019).

*Received 10.10.2019*

*M. Yu. Ilchenko*<sup>1</sup>, Deputy Rector for Scientific Research, Dr. Sci. in Tech., Professor, Academician of National Academy of Sciences of Ukraine, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, three times Winner of State Awards in Science and Technology, Member of the International Higher Education Academy Of Sciences (IHEAS), Member of the International Academy of Engineering, Honorary Member of IEEE (USA)  
E-mail: [ilch@kpi.ua](mailto:ilch@kpi.ua)

E-mail: [director@mitris.com](mailto:director@mitris.com)

*T. M. Narytnyk*<sup>1</sup>, Professor at the Department of Telecommunications, Ph.D. in Tech., Full Professor, Academician of National Academy of Sciences of Ukraine, the Winner of State Awards in Science and Technology of UkSSR, USSR, Ukraine, Inventor of USSR, Honored Worker of industry of Ukraine

*V. I. Prisyazhnyi*<sup>2</sup>, NSFCTC Director, Ph.D. in Tech., Senior Researcher, the Winner of State Awards in Science and Technology of Ukraine, The Member of Space Research Council of NAS of Ukraine

E-mail: [ncuvkz@spacecenter.gov.ua](mailto:ncuvkz@spacecenter.gov.ua)

*S. V. Kapshtyk*<sup>2</sup>, NSFCTC Assistant Director, Ph.D. in Tech.

E-mail: [Sergii.kapshtyk@gmail.com](mailto:Sergii.kapshtyk@gmail.com)

*S. A. Matvienko*<sup>3</sup>, Chief Designer, Ph.D. in Tech., Senior Researcher.

E-mail: [matvienko\\_2005@ukr.net](mailto:matvienko_2005@ukr.net)

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

e-mail: [ilch@kpi.ua](mailto:ilch@kpi.ua); e-mail: [director@mitris.com](mailto:director@mitris.com)

Peremohy Ave, 37, Kyiv, Ukraine 03056

<sup>2</sup> National Space Facility Control and Test Center, Kyiv, Ukraine.

[ncuvkz@spacecenter.gov.ua](mailto:ncuvkz@spacecenter.gov.ua); [sergii.kapshtyk@gmail.com](mailto:sergii.kapshtyk@gmail.com)

8 Moskovska Str., Kyiv, 01010 Ukraine

<sup>3</sup> Scientific and Production Complex “Kurs”, Kyiv, Ukraine. [matvienko\\_2005@ukr.net](mailto:matvienko_2005@ukr.net)

9 Boryspilska Str, Kyiv, 02099 Ukraine

#### LOW-EARTH ORBITAL INTERNET OF THINGS SATELLITE SYSTEM ON THE BASIS OF DISTRIBUTED SATELLITE ARCHITECTURE

We discuss issues of the development of the low-Earth-orbit satellite system of the Internet of Things (IoT) that uses the “Distributed Satellite” architecture. The proposed satellite system combines a low-Earth-orbit satellite telecommunications system



and the Internet of Things system. The first of them provides broadband Internet access for a wide range of consumers. The second one is designed to provide IoT services to delay-tolerant applications and delay-sensitive applications services' users of the Internet of Things. In the paper, principles of the design of the Internet of Things low-Earth-orbit satellite system orbital segment are considered, and the features of applying the "Distributed Satellite" architecture in the low-Earth-orbit satellite system using micro-satellite and cube-satellite spacecraft are revealed. The service area formation method of the low-Earth-orbit satellite system is offered. This method takes into account the protection of geostationary systems and the repeated use of the allocated frequency resource. The ways of introduction of multiprotocol mode to transmit IoT information and to create the combined service areas have been identified. A solution is proposed for the implementation of the concept of "Fog Computing" by including specialized satellite computers to the orbital segment of the low-Earth-orbit satellite system. The main task of their including is to form the own computing capacity within the satellite system orbital segment. The possibility of combining the satellite computers into a single peer-to-peer computing network and thus creating a distributed computing network directly in the orbit has been studied. The composition of the database stored in the orbital distributed computing network is determined. The directions of information flows associated with the maintenance and updating of the database are studied. The algorithm of computational load balancing of excess computing load is proposed.

**Keywords:** Satellite information system, low-Earth-orbit satellite system, Internet of Things, Fog Computing, Orbital Computing Network, distributed satellite, micro-satellite, CubeSat.