

<https://doi.org/10.15407/knit2021.06.065>  
УДК 621.396.946.2, 004.75

**М. Ю. ІЛЬЧЕНКО**<sup>1</sup>, директор Інституту телекомунікаційних систем, 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, director@mitris.com

**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

**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

## КОСМІЧНА ІНФРАСТРУКТУРА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

*Представлено огляд можливості застосування сучасних супутникових систем зв'язку для забезпечення послуг інтернету речей. Показано, що сучасні системи супутникового зв'язку забезпечують передачу трафіку для систем інтернету речей хмарної архітектури. Представлено пропозиції щодо можливості впровадження в супутникових системах зв'язку туманних та граничних обчислень. Показано напрямки модернізації низькоорбітальних геостаціонарних систем супутникового зв'язку для впровадження туманних та граничних обчислень для систем інтернету речей. Для підвищення оперативності обробки інформації інтернету речей та надійного зберігання даних інтернету речей запропоновано формування на геостаціонарній орбіті орбітального хмарного сховища даних, що складається з декількох геостаціонарних супутників — центрів хмарної обробки даних. Запропоновано методи забезпечення доступу до орбітального хмарного сховища даних із використанням геостаціонарних супутників великої пропускної здатності та супутників зі складу низькоорбітальних систем супутникового зв'язку. Коротко розглянуто питання взаємодії орбітального хмарного сховища даних та наземної хмарної інфраструктури обробки і зберігання даних. Запропоновано орбітальні позиції на геостаціонарній орбіті для розміщення супутників — центрів хмарної обробки даних.*

**Ключові слова:** система інтернету речей, супутникова система зв'язку, ГСО, ННО, Орбітальне угруповання супутників, розумні речі інтернету речей.

Цитування: Ільченко М. Ю., Наритник Т. М., Присяжний В. І., Капштик С. В., Матвієнко С. А. Космічна інфраструктура інтернету речей. Стан та перспективи розвитку. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 6 (133). С. 65—84.  
<https://doi.org/10.15407/knit2021.06.065>

## ВСТУП

Протягом останнього десятиріччя інтернет речей став важливою складовою частиною сучасних інфокомунікацій [12, 19–21]. За даними компанії Transforma Insights [12] в 2019 році загальна кількість активних пристроїв інтернету речей становила 7.6 млрд. Очікується, що до 2030 року кількість активних пристроїв інтернету речей збільшиться до 24.1 млрд при середньорічному темпі зростання 11 % (показник CAGR). Основним видом підключення пристроїв інтернету речей на прогнозований період залишатимуться технології малого радіусу дії: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee. Прогнозується збільшення кількості підключень пристроїв інтернету речей до стільникових мереж з 1.2 млрд у 2019 році до 4.7 млрд у 2030 році. Потреба в забезпеченні великої кількості підключень та передачі трафіку пристроїв інтернету речей стали головним драйвером розробки та впровадження нового стандарту мобільного широкосмугового зв'язку 5G [1, 28, 29].

Розвиток інтернету речей стримується обмеженими зонами дії наземних мобільних мереж



**Рис. 1.** Модель системи інтернету речей, побудована на архітектурі хмарних обчислень, яка використовує супутникову телекомунікаційну систему для передачі інформації інтернету речей

широкосмугового доступу, які із комерційних міркувань охоплюють території з відносно високою щільністю населення. Розширити зону надання послуг інтернету речей можна шляхом використання ресурсу супутникових телекомунікаційних систем, вузькопрофільного та широкого застосування.

Мета статті — проаналізувати здатність сучасних супутникових телекомунікаційних систем надавати послуги інтернету речей та визначити можливі напрямки розвитку цього сектору телекомунікацій у майбутньому.

## 1. СТАН КОСМІЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

До цього часу переважною архітектурою, що застосовується при побудові систем інтернету речей, залишається архітектура хмарних обчислень (Cloud Computing) [6]. За цією архітектурою пристрої інтернету речей, або розумні пристрої (IoT Smart Things), перетворюють контрольовані фізичні параметри в електричні сигнали і передають відповідну інформацію до хмарних центрів обробки даних (Cloud Computing Data Center) для обробки згідно із призначенням та цільовим завданням системи інтернету речей, зберігання та архівації. При необхідності здійснення певних дій хмарний центр обробки даних передає керівні команди на виконавчі пристрої інтернету речей — актуатори.

Наявні супутникові телекомунікаційні системи здатні забезпечувати передачу трафіка систем інтернету речей, і побудовані на базі архітектури хмарних обчислень. На рис. 1 представлено модель системи інтернету речей, побудовану на базі архітектури хмарних обчислень, яка використовує супутникову телекомунікаційну систему для передачі інформації між нижнім та верхнім ієрархічними рівнями. На нижньому рівні ієрархічної структури системи інтернету речей перебувають пристрої інтернету речей, або розумні речі. До цієї групи пристроїв належать сенсори, тобто пристрої, які перетворюють фізичні процеси в електричні сигнали та формують на базі цих сигналів пакети інформації інтернету речей, а також пристрої, що реалізують фізичний вплив на актуатори згідно з отриманими командами.

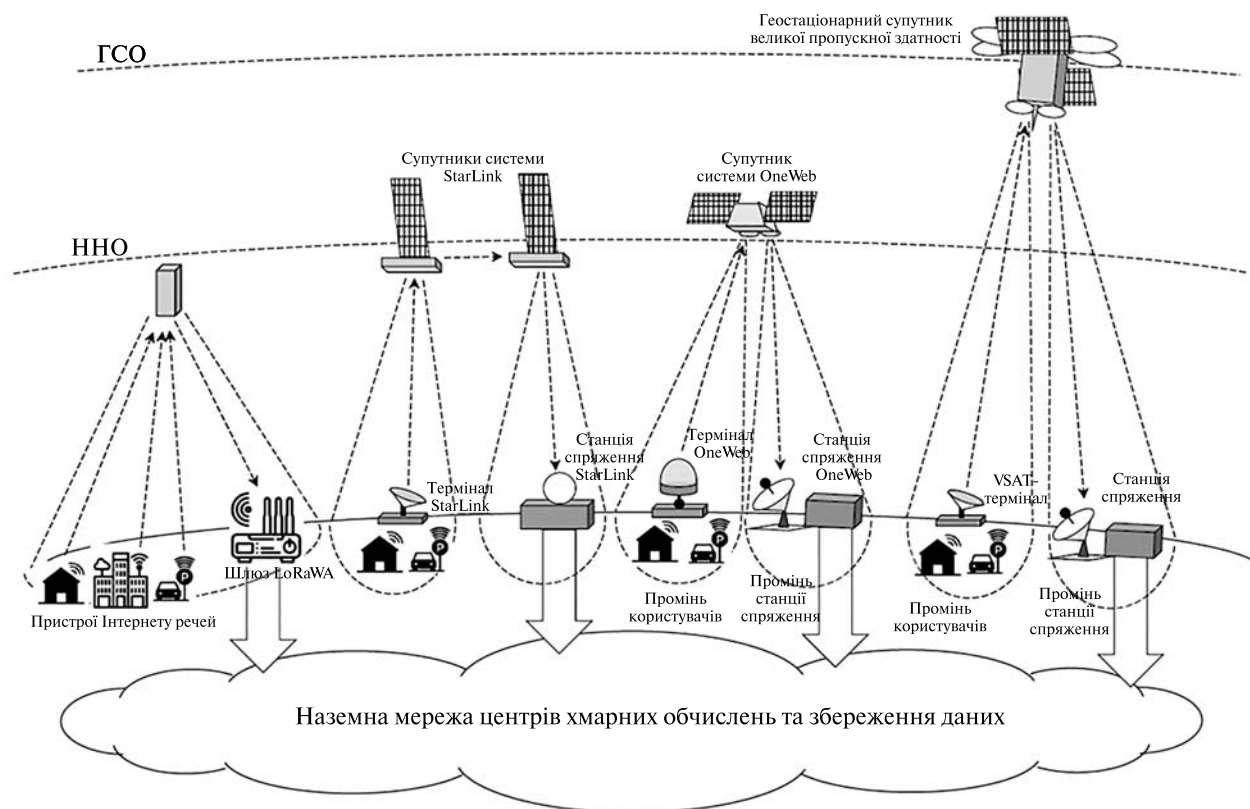


Рис. 2. Використання супутникових телекомунікаційних систем для забезпечення роботи систем інтернету речей

На верхньому ієрархічному рівні системи перебуває хмарний центр обробки та збереження даних.

Сегмент супутникового зв'язку утворює канал передачі даних від пристроїв інтернету речей, сенсорів, до хмарного центру обробки та збереження даних, і у зворотному напрямку — до пристроїв інтернету речей, до актуатора. Супутниковий канал передачі даних формується із застосуванням таких елементів:

- VSAT-термінал, що перебуває безпосередньо у місці розташування пристроїв інтернету речей — сенсорів та актуаторів, і забезпечує підключення цих пристроїв із використанням радіотехнологій малого радіусу дії, як-от: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee. Для супутникової телекомунікаційної системи інтерфейс VSAT-терміналу до місцевої локальної мережі або до наземної мережі зв'язку є межею системи;

- телекомунікаційний супутник, що забезпечує ретрансляцію пакетів інформації пристроїв інтернету речей. Для систем інтернету речей,

побудованих на базі хмарної архітектури, тип корисного навантаження телекомунікаційного супутника не має принципового значення, чи це ретранслятор «прозорого» типу, чи ретранслятор «з обробкою на борту» [25];

- центральна станція VSAT-мережі, або станція спряження. Зазвичай цей об'єкт підключений до магістральної мережі зв'язку та магістральної мережі інтернет, через яку здійснюється передача інформації до хмарного центру обробки даних.

На рис. 2 наведено приклади застосування супутникових телекомунікаційних систем різного типу для забезпечення роботи систем інтернету речей. Показано супутникові телекомунікаційні системи, що використовують два типи орбіт: низьку навколосезну орбіту (ННО) та геостационарну орбіту (ГСО). Враховуючи той факт, що супутникові системи широкосмугового доступу на низькій навколосезній орбіті та середній навколосезній орбіті не мають принципових відмінностей в архітектурі побудови, на рис. 2

не представлені супутникові телекомунікаційні системи на середній навколоземній орбіті, до яких належить, зокрема, система O3b.

Першим варіантом застосування низькоорбітальних супутникових телекомунікаційних систем є використання протоколу низькошвидкісної передачі інформації інтернету речей на великій відстані LoRaWAN із застосуванням космічних апаратів форм-фактора кубсат [35]. Пристрої інтернету речей, що перебувають в зоні радіобачення кубсата, передають пакети інформації інтернету речей за протоколом LoRaWAN. Кубсат приймає та ретранслює прийняті сигнали, що надходять на шлюз LoRaWAN, який під'єднаний до мережі інтернет і забезпечує передачу інформації по наземній мережі до хмарних центрів обробки даних. Команди управління передаються у зворотному напрямку. В цьому варіанті супутниковий сегмент використовується як радіоподовжувач, тобто засіб, що забезпечує збільшення дальності передачі сигналів протоколу LoRaWAN.

Перспективні супутникові системи широкосмугового доступу StarLink та OneWeb, що перебувають на різних стадіях формування орбітального угруповання, також здатні забезпечувати передачу інформації інтернету речей.

Архітектура системи StarLink змінювалась декілька разів у процесі проектування системи та розробки космічних апаратів. Зараз у стадії формування перебуває орбітальне угруповання космічних апаратів, розташованих на низькій навколоземній орбіті висотою 550 км [11]. Космічні апарати StarLink формують керовані промені, які обслуговують користувачів та підтримують зв'язок із станціями спряження. Інтерфейсом системи StarLink для систем інтернету речей є зовнішній інтерфейс терміналу StarLink. Пристрої інтернету речей підключаються до терміналу StarLink через мережу радіодоступу малої дальності, наприклад через мережу WiFi. Далі пакет інформації інтернету речей передається в загальному транспортному потоці інформації до супутника StarLink по висхідній супутниковій лінії, де здійснюється його маршрутизація до променя, що обслуговує станцію спряження. Із відкритих джерел інформації відомо, що супутники

StarLink здатні мають можливість підтримувати зв'язок типу «супутник-супутник» із використанням оптичних (лазерних) ліній зв'язку [13]. В цьому випадку інформаційні пакети інтернету речей передаються від супутника, у межах зони обслуговування перебуває термінал StarLink із підключеними до нього пристроями інтернету речей, до супутника, промінь до станції спряження якого наведено на станцію спряження, як це показано на рис. 2. Станція спряження системи StarLink має підключення до первинної мережі інтернет, через це з'єднання пакети інформації від пристроїв інтернету речей потрапляють до хмарного центру обробки та зберігання даних.

Система OneWeb, як і переважна більшість супутникових систем великої пропускної здатності, має окремі групи променів до користувачів — промені користувачів, та до станцій спряження — промені станцій спряження. Інтерфейсом та, відповідно, межею системи OneWeb до пристроїв інтернету речей є інтерфейс терміналу користувача OneWeb до локальної мережі або до мережі радіодоступу WiFi. Термінал користувача OneWeb передає пакети інформації підключених до нього пристроїв інтернету речей в загальному транспортному потоці висхідної супутникової лінії до супутника OneWeb. Супутник OneWeb ретранслює прийняті інформаційні потоки променів користувачів у промені до станції спряження. Станція спряження системи OneWeb має підключення до магістральної мережі системи інтернет. Станція спряження приймає пакети інформації пристроїв інтернету речей у складі загальних транспортних потоків від терміналів користувачів, виділяє цю інформацію та забезпечує її маршрутизацію через мережу інтернет до центрів хмарних обчислень та зберігання даних.

На сьогодні послуги передачі інформації інтернету речей здатні надавати геостационарні супутники традиційної конфігурації та супутники великої пропускної здатності. Обидва типи геостационарних супутників можуть бути оснащені корисним навантаженням із транспондерами прозорого типу, або транспондерами із обробкою на борту чи регенеративного типу [25]. На рис. 2 наведено приклад передачі інформації інтернету речей із використанням супутника

великої пропускної здатності. До особливостей геостационарних супутників великої пропускної здатності належить використання променів двох типів (за призначенням та за показниками): променів користувачів та променів станцій спряження [36]. Зовнішнім інтерфейсом геостационарної супутникової системи до пристроїв інтернету речей є інтерфейс VSAT-терміналу до локальної мережі, або до радіомережі WiFi. VSAT-термінал об'єднує в єдиному транспортному потоці висхідної супутникової лінії пакети інформації інтернету речей та інформацію інших служб. Супутник великої пропускної здатності спрямовує прийнятий потік від VSAT-терміналу користувача з променя користувача до променя станції спряження. Станція спряження, аналогом якої у випадку використання геостационарного супутника традиційної конфігурації є центральна станція VSAT-мережі, підключена до магістральної мережі системи інтернет, по якій пакети інформації інтернету речей поступають до центру хмарних обчислень на зберігання даних для обробки та узагальнення. Для підвищення ефективності хмарних сервісів, що надаються із застосуванням супутникових телекомунікаційних систем, компанія Microsoft спільно з компанією Azure розпочали реалізовувати проєкт розміщення центрів хмарних обчислень та збереження даних безпосередньо на території супутникових телепортів [3].

Як можна переконатись із наведеної структури, супутникові телекомунікаційні системи займають місце каналів передачі даних між пристроями інтернету речей та центрами хмарних обчислень і збереження даних. В системах інтернету речей, побудованих за хмарною архітектурою, супутникові телекомунікаційні системи повинні забезпечувати двосторонню передачу усього обсягу трафіку інформації інтернету речей, що значно збільшує завантаження супутникових каналів та супутникової системи в цілому.

## 2. ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ КОСМІЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Недоліком традиційної хмарної архітектури систем інтернету речей є не тільки високе завантаження каналів зв'язку та передачі даних двосто-

роннім трафіком, який генерується пристроями та системами інтернету речей, але й затримка, спричинена передачею пакетів інформації інтернету речей по складеному каналу передачі даних через маршрутизатори та інше мережеве обладнання. Крім того, суттєво впливає час поширення радіосигналів в радіомережах та світлової хвилі в оптико-волоконних та лазерних лініях. Особливий вплив інтегральна затримка здійснює на системи інтернету речей, які чутливі до затримки [37].

Рішенням проблеми є впровадження до архітектури систем інтернету речей концепції туманних та граничних обчислень [3]. Згідно з цією концепцією частина обчислень, пов'язаних із обробкою інформації інтернету речей, здійснюється на проміжних рівнях ієрархічної структури системи інтернету речей. Для цього на проміжних рівнях розташовуються відповідні обчислювальні потужності. Обчислювальні потужності наближаються до кінцевих пристроїв інтернету речей: сенсорів та актуаторів. В результаті цього скорочується час обробки інформації та реакція системи інтернету речей на зовнішній вплив і видачі команд управління (за потреби), знижується завантаження каналів зв'язку та передачі даних. На верхні рівні ієрархічної моделі передаються тільки оброблені дані, що містять результат опрацювання інформації від пристроїв інтернету речей та видача команд керування. З одного боку це зменшує обсяг інформації, що передається, а з іншого — підвищує вартість цієї узагальненої інформації.

**2.1. Реалізація граничних та туманних обчислень у супутникових системах.** Супутникові телекомунікаційні системи є достатньо гнучкими і можуть бути адаптовані для впровадження туманних та граничних обчислень для систем інтернету речей. На рис. 3 представлено ієрархічну модель супутникової системи інтернету речей, побудовану на базі архітектури туманних та граничних обчислень.

Граничні обчислення — це модель розподілених обчислень, згідно з якою обчислення здійснюються поруч із місцем, де збираються та аналізуються дані, на відміну від обробки інформації на централізованому сервері або у хмарі

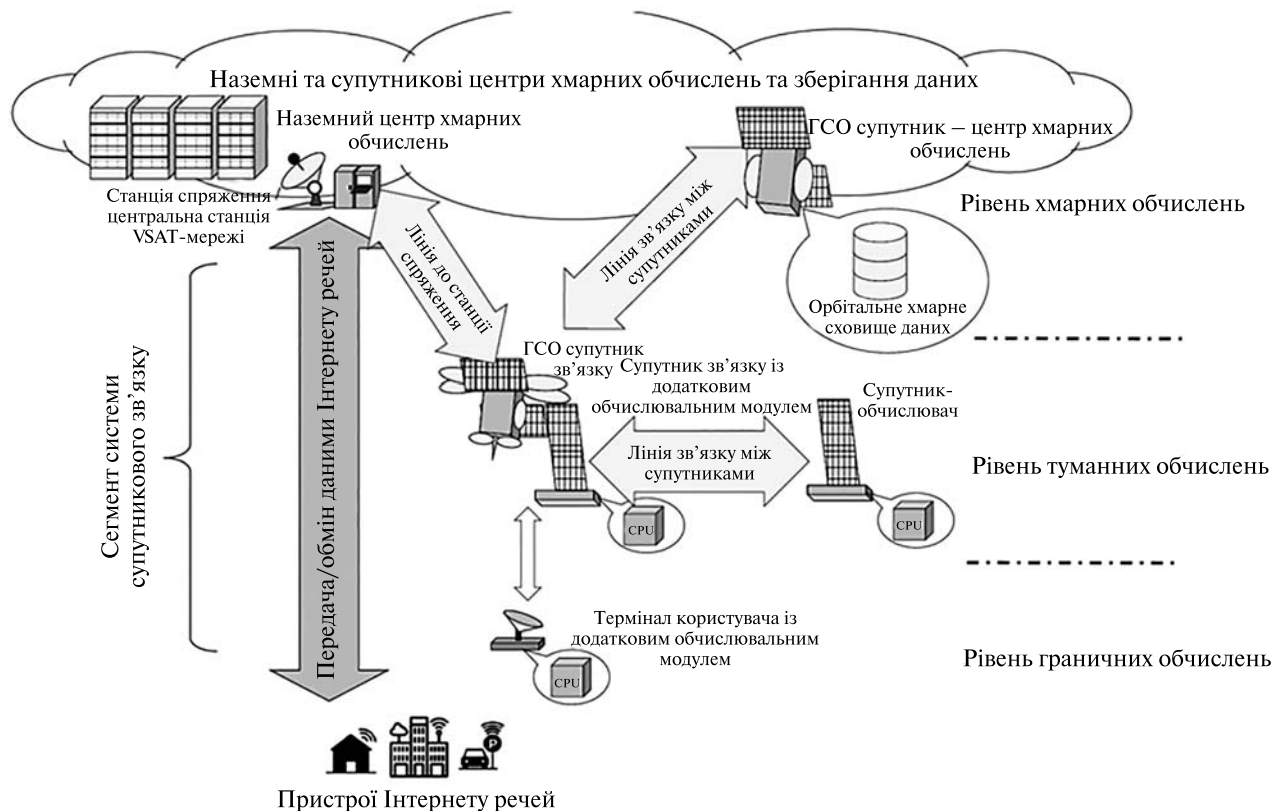


Рис. 3. Ієрархічна модель супутникової системи інтернету речей, побудованої на базі архітектури туманних та граничних обчислень

[33]. Як було зазначено раніше, у більшості випадків межею супутникової телекомунікаційної системи/мережі є інтерфейс терміналу користувача, або VSAT-термінал, що перебувають поруч із місцем розташування пристроїв інтернету речей — сенсорів і актуаторів. Забезпечити впровадження граничних обчислень у супутникові телекомунікаційні системи можна, додавши до обладнання модему VSAT-терміналу окремий обчислювальний модуль або одноплатний комп'ютер. Конструктивно модем терміналу користувача, або VSAT-терміналу — це плата, на якій встановлено мікросхеми та навісні елементи модему. Плату модему встановлено в корпусі із вбудованим або виносним блоком живлення. Методом модернізації таку конструкцію можна доповнити одноплатним комп'ютером, який забезпечуватиме реалізацію граничних обчислень. Альтернативним варіантом є включення

одноплатного комп'ютера до складу локальної мережі типу Ethernet, до якої під'єднано Wi-Fi-роутер та інше обладнання технології радіодоступу пристроїв інтернету речей малого радіусу дії. Додавання обчислювальної потужності буде задовольняти обчислювальні потреби пристроїв інтернету речей, що перебувають у межах зони дії мережі радіодоступу малого радіусу дії. В цьому разі по каналу супутникового зв'язку буде передаватися тільки інформація про результати обробки локальної інформації інтернету речей.

Туманні обчислення (Fog Computing) реалізуються на проміжних рівнях ієрархічної моделі інтернету речей [27]. До проміжного рівня ієрархічної структури інтернету речей, що включає сегмент супутникових телекомунікацій, належать супутник-ретранслятор або орбітальне угруповання супутників. До цього сегменту належать як супутники, що перебувають на геоста-

ціонарній орбіті, так і супутники зі складу орбітальних угруповань, що перебувають на низькій або середній навколосезній орбіті. Реалізувати туманні обчислення у супутниковому сегменті систем інтернету речей можна шляхом внесення до орбітального сегменту обчислювальної потужності для реалізації туманних обчислень. В роботах [1, 6, 20] було запропоновано підхід до реалізації туманних обчислень шляхом доповнення мікроугруповань (Microconstellation) окремими супутниками-обчислювачами (Satellite-computer). Враховуючи той факт, що модернізація обладнання супутників-ретрансляторів можлива тільки на етапі їхнього виготовлення, реалізація туманних обчислень в орбітальному сегменті супутникових систем інтернету речей займе більш тривалий час. Цей час охоплює розробку проєкту модернізованого супутника, його наземні випробування, очікування завершення строку експлуатації вже запущених супутників та черги на послугу запуску.

Доповнення орбітального сегменту супутникових телекомунікаційних систем обчислювальною потужністю дозволить реалізувати туманні обчислення для обробки інформації інтернету речей від пристроїв, що перебувають у межах зони обслуговування супутника-ретранслятора. В результаті підвищується оперативність обробки інформації, скорочується час затримки. Трафік інформації інтернету речей буде завантажувати тільки ланку супутникового зв'язку «термінал користувача — супутник-ретранслятор». В напрямку «супутник-ретранслятор — станція спряження (GateWay) / центральна станція VSAT-мережі (VSAT-network HUB)» буде передаватися тільки результат обробки та узагальнена інформація інтернету речей, що суттєво скоротить обсяг інформації, що передається, та збільшить її вартість.

Сучасні технології організації та функціонування супутникових телекомунікацій та технології проєктування і виробництва космічних апаратів різноманітного призначення суттєво розширюють можливості супутникових телекомунікаційних систем щодо реалізації хмарних обчислень, які розташовані на верхньому ієрархічному рівні архітектури системи інтернету

речей. Крім традиційного способу забезпечення доставки інформації інтернету речей до хмарного центру обробки даних, який передбачає використання станції спряження або центральної станції VSAT-мережі, яка під'єднана до магістральної мережі інтернет, можливе альтернативне рішення — розробка та запуск спеціалізованих космічних апаратів — космічних хмарних центрів обробки та зберігання даних (Satellite Cloud Data Center). Сьогодні в стадії розробки вже перебуває проєкт SpaceBelt [5]. Але цей проєкт передбачає використання супутників — банків даних (або хмарних сховищ даних), що розташовані на низькій навколосезній орбіті. Доступ до супутників — сховищ даних передбачається здійснювати через супутник-ретранслятор на геостационарній орбіті.

Альтернативним рішенням є розробка та запуск геостационарних космічних апаратів, корисним навантаженням яких буде модуль хмарного центру обробки даних. Доступ до цих космічних апаратів буде здійснюватися через геостационарні супутники-ретранслятори по лініях зв'язку між супутниками (Inter-Satellite Link). Для підвищення надійності зберігання даних та проведення обчислювальних операцій, збільшення продуктивності хмарних обчислень супутникові центри хмарної обробки даних будуть під'єднані до наземних хмарних центрів обробки даних за допомогою спеціальних високошвидкісних захищених радіоліній.

**2.2. Низькоорбітальна супутникова система на базі протоколу LoRaWAN.** Низькоорбітальну телекомунікаційну систему, побудовану для передачі інформації інтернету речей із використанням модифікованого протоколу зв'язку на велику відстань LoRaWAN можна адаптувати для реалізації туманних обчислень шляхом модернізації архітектури системи, доповнивши корисне навантаження кубсату шлюзом LoRaWAN та необхідною обчислювальною потужністю (див. рис. 4).

Враховуючи особливості архітектури LoRaWAN, корисне навантаження кубсату, можна доповнити таким обладнанням:

- шлюз LoRaWAN (Gateway) та сервер мережі (Network Server), які забезпечують збирання ін-

Угрупування супутників на низькій навіколоземній орбіті

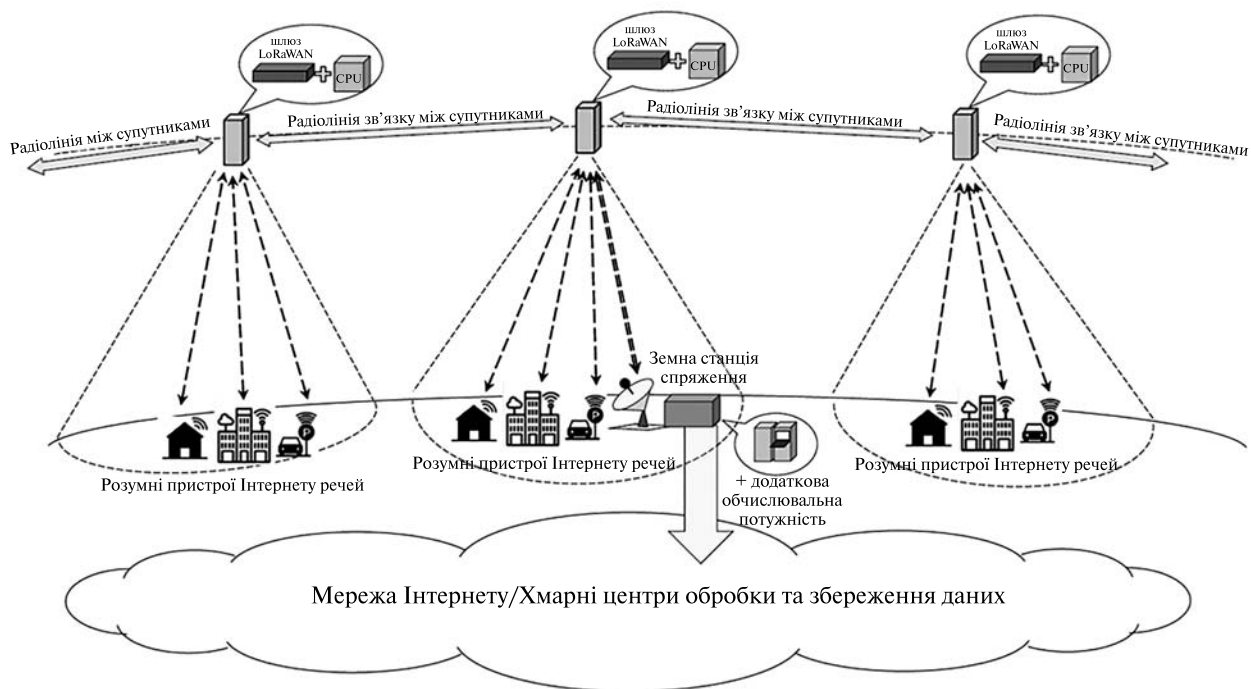


Рис. 4. Архітектура модифікованої низькоорбітальної супутникової системи інтернету речей на базі протоколу LoRaWAN

формації від сенсорів та здійснюють ретрансляцію інформацію сенсорів до сервера додатків в єдиному потоці;

- обчислювальний модуль (CPU), який буде виконувати функції сервера додатків безпосередньо на борту кубсата. Включення обчислювального модуля до складу корисного навантаження кубсата дозволить реалізувати в низькоорбітальній супутниковій системі технологію туманних обчислень для забезпечення обробки безпосередньо на борту кубсата пакетів інформації розумних пристроїв інтернету речей (IoT Smart Things Information Burst), які перебувають у межах зони обслуговування кубсата.

Реалізувати запропоновані зміни можна протягом декількох років. Зважаючи на те що термін експлуатації кубсатів достатньо короткий і зазвичай не перевищує 3...5 років, впровадити запропоновані зміни можна при запуску чергового покоління кубсатів, призначеного для підтримки функціонування орбітального угруповання системи.

Для підтримки взаємодії орбітального та наземного сегментів низькоорбітальної телекомунікаційної системи інтернету речей, побудованої із використанням космічних апаратів класу кубсат та яка надає послуги інтернету речей на базі модифікованого протоколу LoRaWAN, до складу наземної інфраструктури системи доцільно ввести земну станцію спряження (GateWay Earth Station) орбітального угруповання з наземною мережею інтернет. Основним завданням земної станції спряження є прийом потоку узагальненої інформації інтернету речей, тобто інформації про результати обробки в туманному шарі системи інтернету речей пакетів інформації сенсорів, та трансляція прийнятого потоку до хмарного центру обробки даних. Земна станція спряження в низькоорбітальній телекомунікаційній супутниковій системі обслуговує одночасно декілька супутників. Тому доцільно доповнити склад обладнання земної станції спряження комп'ютером або обчислювачем, які додають земній станції обчислювальну потужність. Дода-



вання земної станції обчислювальної потужності дозволить реалізувати туманні обчислення для узагальнення інформації інтернету речей, що поступає від декількох кубсатів, що перебувають у межах зони радіобачення земної станції спряження. В ієрархічній архітектурі інтернету речей така обробка узагальненої інформації відповідає рівню туманних обчислень.

Для підвищення ефективності низькоорбітальних супутникових телекомунікаційних систем, побудованих із використанням малих та надмалих космічних апаратів, зокрема кубсатів, в архітектурі систем передбачаються лінії зв'язку між супутниками (Inter-Satellite Link, ISL) [4]. Застосування ліній зв'язку між кубсатами в низькоорбітальній телекомунікаційній системі дозволить передавати потік узагальненої інформації інтернету речей на сусідній кубсат для подальшої ретрансляції на земну станцію спряження і таким чином розширити зону обслуговування земної станції спряження та скоротити їхню кількість.

**2.3. Низькоорбітальна система широкопasmового доступу OneWeb.** До особливостей архітек-

тури низькоорбітальної супутникової системи широкопasmового доступу (Broadband Access Satellite System) OneWeb належить використання корисного навантаження супутника прозорого типу (Transparent Payload). Корисне навантаження супутників OneWeb здійснює перенесення смуги частот променя користувачів (User Beam) у смугу частот променя станції спряження (Gateway Beam) [33]. У корисному навантаженні супутника не здійснюється обробка інформації. Архітектура системи OneWeb не передбачає використання ліній зв'язку між супутниками.

Для адаптації системи OneWeb до особливостей інтернету речей та впровадження граничних і туманних обчислень можна використовувати можливості терміналів користувачів (User Terminal) і станції спряження (див. рис. 5). Межею мережі в системі OneWeb з боку кінцевого користувача є інтерфейс з локальною мережею Ethernet або з мережею радіодоступу Wi-Fi. Термінал користувача може бути доповнений обчислювальним модулем у вигляді окремого процесорного блоку або одноплатного комп'ютера.

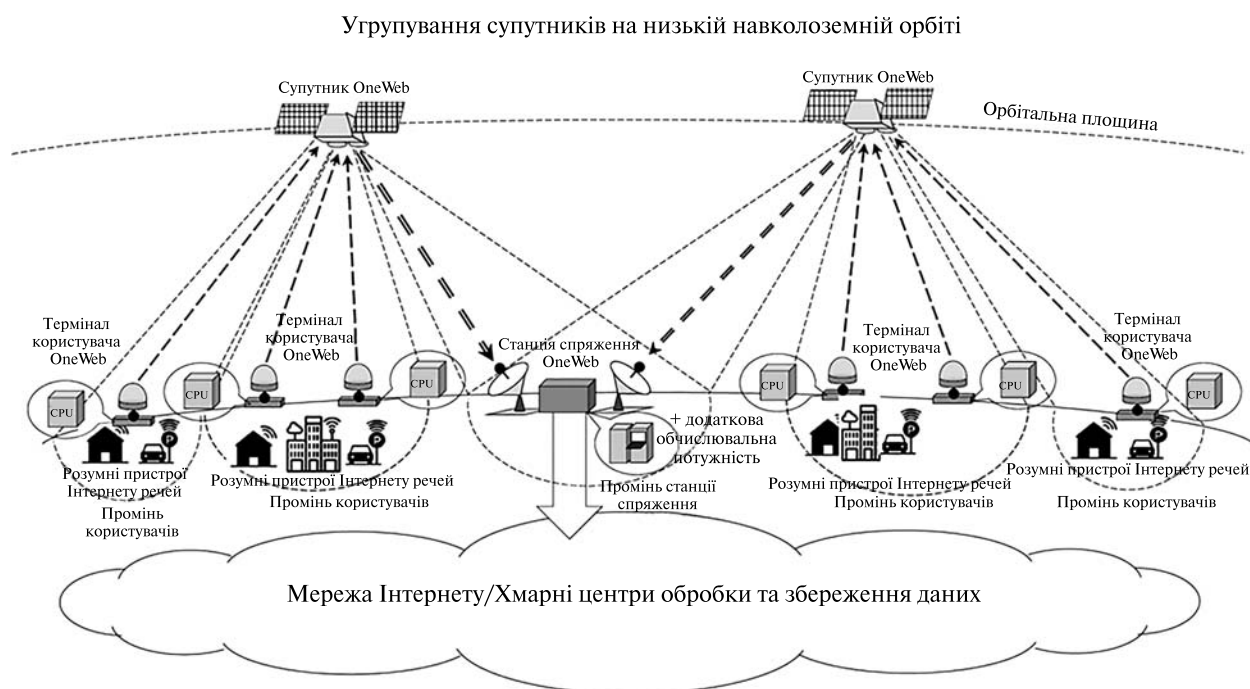


Рис. 5. Адаптація системи OneWeb для систем інтернету речей

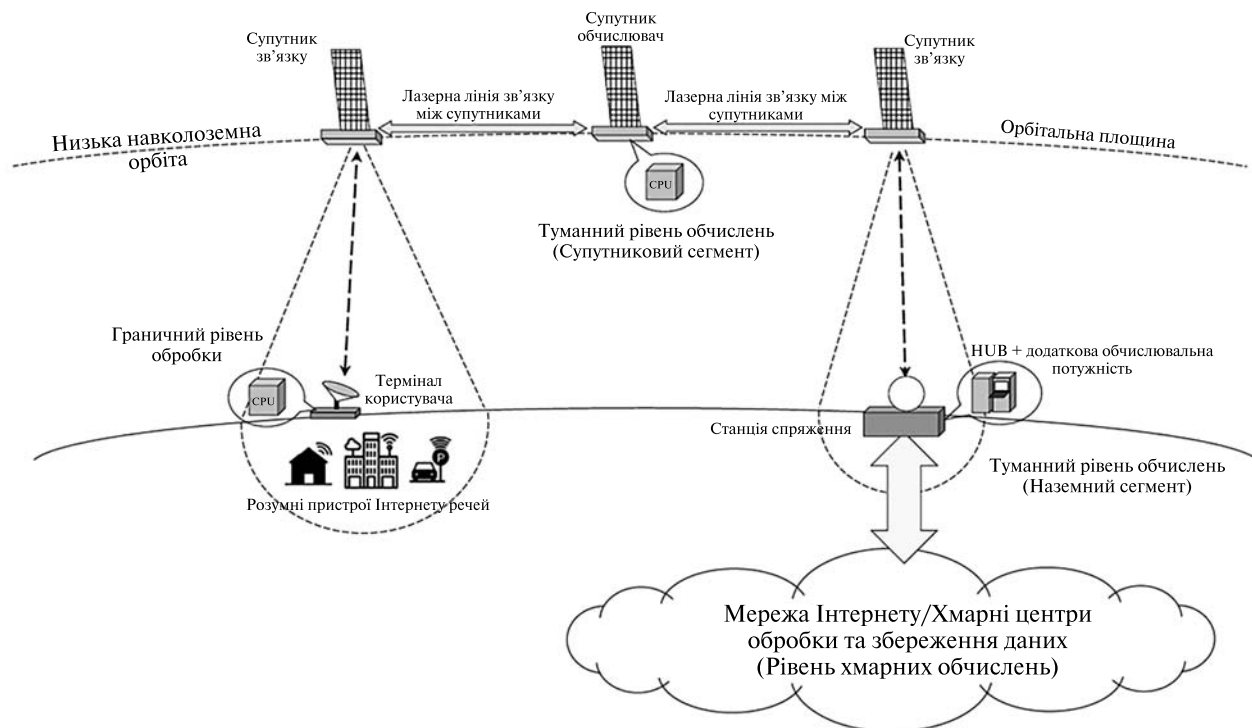


Рис. 6. Адаптація системи StarLink для надання послуг інтернету речей з граничними та туманними обчисленнями

Альтернативним варіантом є підключення одноплатного комп'ютера до локальної мережі Ethernet. Створену обчислювальну потужність, розташовану у місці розміщення терміналу користувача безпосередньо поруч з пристроями інтернету речей (сенсорів та актуаторів), введено до складу системи з метою реалізації граничних обчислень (Edge Computing). Доповнення терміналу користувача обчислювальними засобами дозволить здійснювати первинну обробку пакетів інформації сенсорів інтернету речей та формувати команди керування для актуаторів на рівні терміналу користувача. По каналу супутникового зв'язку буде передаватися узагальнена інформація, сформована за результатами обробки інформації локальної групи пристроїв інтернету речей, розташованих у межах зони дії технології радіодоступу малого радіусу дії.

Туманні обчислення можна реалізувати на рівні станції спряження. Для цієї мети обладнання станції спряження потрібно доповнити обчислювальним модулем — багатопроцесорною

комп'ютерною групою/стійкою (див. рис. 5). Це обладнання буде здійснювати обробку інформації інтернету речей, що надходить із зони обслуговування супутника OneWeb, або від супутників, які перебувають у межах зони обслуговування станції спряження. Команди управління для окремих пристроїв та груп пристроїв інтернету речей — актуаторів, будуть передаватися від станції спряження через супутник до терміналу користувача. Узагальнена інформація про результати обробки інформації інтернету речей та про прийняті рішення / сформовані команди управління буде передаватися по мережі інтернет до хмарних центрів обробки та збереження даних як до верхнього рівня ієрархічної архітектури системи інтернету речей.

**2.4. Низькоорбітальна система ширококутового доступу StarLink.** Низькоорбітальна супутникова система ширококутового доступу (Low-Earth Orbit Broadband Access Satellite System) StarLink, як і система OneWeb, має сформовану архітектуру, орієнтовану на надання послуг ши-

рокосмугового доступу до інтернет кінцевим споживачам. Як вже було показано раніше, наявна архітектура першої черги системи дозволяє надавати тільки послуги інтернету речей хмарної архітектури.

Для адаптації системи StarLink до особливостей інтернету речей та впровадження граничних та туманних обчислень можливо застосовувати методи, аналогічні раніше запропонованим для системи OneWeb, а саме (див. рис. 6):

- доповнення терміналів користувачів одноплатними комп'ютерами або підключення до локальної мережі одноплатного комп'ютера для реалізації граничних обчислень для пристроїв інтернету речей, що перебувають у межах мережі сети радіодоступу малого радіусу дії;

- доповнення складу обладнання станції спряження окремою багатопроцесорною комп'ютерною групою/стійкою для реалізації туманних обчислень для обробки інформації пристроїв інтернету речей, розташованих у межах зони обслуговування усіх супутників, що перебувають у межах зони радіобачення станції спряження.

Використання в архітектурі системи StarLink оптичних/лазерних ліній зв'язку між супутниками (Laser Inter-Satellite Link) [13, 20] дозволяє розглядати рішення про доповнення орбітального угруповання супутників StarLink (StarLink Constellation) супутниками-обчислювачами (див. рис. 6). На відміну від супутників-ретрансляторів StarLink, корисним навантаженням супутника-обчислювача є обчислювальний модуль — процесорний блок і модуль довгострокової пам'яті. Як і супутники-ретранслятори, супутник-обчислювач має у складі свого корисного навантаження маршрутизатор (Router). Для забезпечення зв'язку з іншими супутниками супутник-обчислювач обладнано оптичними головками для оптичних/лазерних ліній зв'язку між супутниками.

Завданням супутника-обчислювача є створення обчислювальної потужності безпосередньо на низькій навколоземній орбіті в одній орбітальній площині із супутниками-ретрансляторами. У кожній орбітальній площині (Orbital Plane) орбітального угруповання StarLink можна розмістити декілька супутників-обчислю-

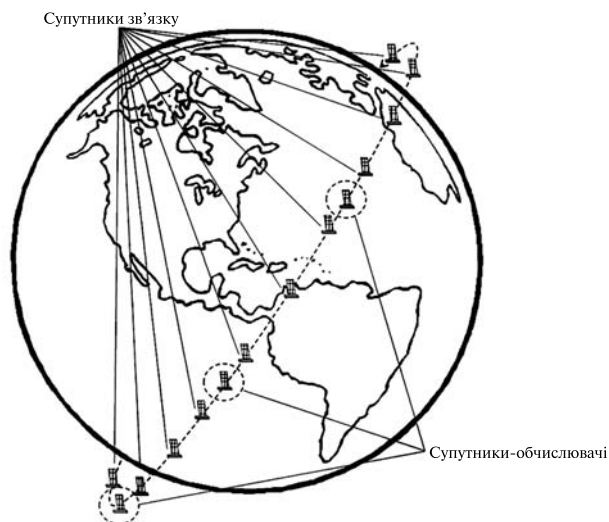


Рис. 7. Розташування супутників-обчислювачів в орбітальній площині орбітального угруповання StarLink

вачів (див. рис. 7). Інформація інтернету речей буде передаватися від супутників-ретрансляторів до супутника-обчислювача для обробки, узагальнення і формування команд керування по лініях зв'язку між супутниками. Розташування в орбітальній площині супутників-обчислювачів та наведення на них оптичних приймачів-передавачів / оптичних головок лазерних ліній зв'язку між супутниками не призведе до руйнування цілісності кільцевої мережі передачі даних орбітальної площини, оскільки супутник-обчислювач, як і супутник-ретранслятор, обладнано маршрутизатором, який розподіляє потоки інформації, призначені для подальшої ретрансляції по кільцевій мережі орбітальної площини та виділяє інформацію, призначену для обробки в обчислювальному модулі супутника-обчислювача.

Доповнення орбітального угруповання StarLink супутниками-обчислювачами дозволить отримати безпосередньо на орбіті обчислювальну потужність для реалізації туманних обчислень для систем інтернету речей.

**2.5. Геоестаціонарна система високої пропускної здатності. Орбітальний хмарний центр обробки даних.** Геоестаціонарні системи супутникового зв'язку є важливою складовою частиною сучас-

них супутникових телекомунікаційних систем. Зростаючий попит на пропускну здатність для передачі даних та надання інформаційних послуг, у першу чергу послуг доступу до інтернет, стали драйвером для появи нового класу геостационарних супутників зв'язку — супутників великої пропускної здатності (High Throughput Satellite, HTS). Основною перевагою цих супутників є низька вартість передачі одного біта інформації між двома абонентами [36].

Архітектура геостационарних супутникових телекомунікаційних систем високої пропускної здатності має свої особливості, про які було зазначено вище. Ще однією особливістю супутників великої пропускної здатності HTS є правило: один вузький промінь — один транспондер (One Transponder per One Spot Beam) [26]. Згідно з цим правилом транспондер забезпечує підсилення сигналів в усій ширині смуги частот, яка може становити 150...250 МГц чи більше.

Архітектуру геостационарних систем високої пропускної здатності (HTS System) можна адаптувати до особливостей систем інтернету речей в декілька етапів наступним чином (див. рис.8). На першому етапі можлива модернізація елементів системи, що належать наземному сегменту зв'язку: VSAT-термінали користувачів (User VSAT Terminal) та станції спряження. Додавання обчислювальних потужностей на цих елементах дозволить реалізувати граничні та туманні обчислення (Edge and Fog Computing) для систем інтернету речей. Можливі технічні рішення щодо впровадження обчислювальної потужності на цих елементах аналогічні тим, що вже були розглянуті раніше для низькоорбітальних систем OneWeb та StarLink.

Доступні сьогодні технології проектування та виробництва геостационарних супутників із строком експлуатації 15...20 років, та накопичений досвід формування і орбітальної експлуатації орбітальних угруповань супутників, взаємодії супутників, що перебувають на орбіті, дозволяє розглядати питання про створення у перспективі орбітального хмарного сховища даних (Orbital Cloud Data Storage), яке складається із декількох геостационарних супутників — хмарних центрів обробки даних

(GEO Satellite Cloud Data Center) (див. рис. 8). Орбітальне хмарне сховище даних не може розглядатись як альтернатива наземним хмарним центрам обробки та зберігання даних, оскільки обчислювальні потужності та можливості щодо об'єму сховищ для зберігання даних для наземних хмарних центрів є практично необмеженими. Орбітальне хмарне сховище даних є доповненням до наземної хмарної інфраструктури і орієнтоване у першу чергу на обробку та зберігання даних супутникових систем інтернету речей. Для підвищення надійності зберігання даних та збільшення при необхідності обчислювальної потужності орбітальне хмарне сховище даних взаємодіє із наземною інфраструктурою хмарних центрів за допомогою спеціально виділених радіоліній передачі даних.

Геостационарні супутники високої пропускної здатності будуть забезпечувати доступ до геостационарних супутників — хмарних центрів обробки даних за допомогою ліній зв'язку між супутниками (Inter-Satellite Link), які працюють у радіо- чи оптичному діапазоні частот. Можливість застосування у відкритому космосі оптичних ліній зв'язку великої протяжності доведено експериментально при створенні Європейської системи передачі даних (Europe Data Relay System, EDRS), яку було розроблено на замовлення Європейського космічного агентства [10].

Для спрямування інформації інтернету речей до орбітального хмарного сховища даних геостационарний супутник високої пропускної здатності (GEO HTS Satellite) повинен забезпечувати маршрутизацію трафіку інтернету речей. Маршрутизація може здійснюватись таким чином:

- при використанні у складі супутника корисного навантаження регенеративного типу (Regenerative Payload) шляхом виділення із потоку даних, що передаються VSAT-терміналами, інформації інтернету речей та маршрутизації інформації інтернету речей в напрямку до геостационарного супутника — хмарного центра обробки даних. Як базова для цього може застосовуватись технологія вдосконаленого супутника із обробкою на борту (Advanced Regenerative on-board Processing Satellite, AR-OBPS) [32];

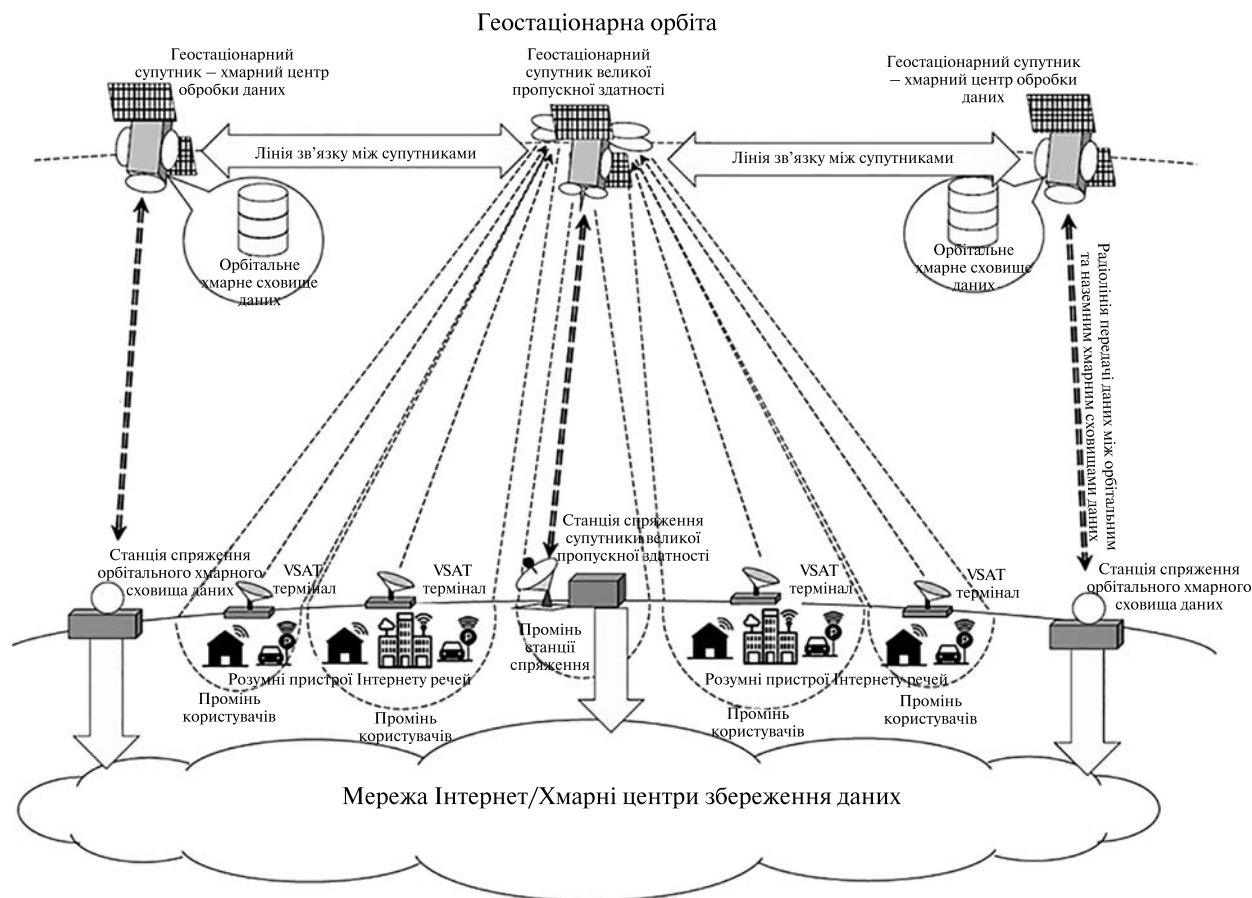


Рис. 8. Адаптація геостационарних систем високої пропускної здатності до особливостей інтернету речей та взаємодія із орбітальним хмарним центром обробки даних

• при виділенні для передачі інформації інтернету речей окремих смуг частот в загальній смузі частот кожного променя шляхом комутації цих смуг частот. Комутація смуг частот, виділених для передачі інформації інтернету речей, буде здійснюватися в цифровому корисному навантаженні супутника окремо від інших смуг частот, і буде передаватися по лінії зв'язку між супутниками до геостационарного супутника — хмарного центру обробки даних. У ролі базової для цього може застосовуватись технологія цифрового корисного навантаження Intelsat Epic NG Platform [34].

Орбітальне хмарне сховище даних (Orbital Cloud Data Storage) може забезпечувати обробку інформації інтернету речей, яка надходить від низькоорбітальних систем інтернету речей (див.

рис. 9). В цьому випадку низькоорбітальна система, яка використовує, наприклад, модифікований протокол LoRaWAN, забезпечує реалізацію туманних обчислень, як це показано раніше, а орбітальне хмарне сховище даних забезпечує хмарний рівень обчислень (див. рис. 3).

Взаємодія між кубсатами низькоорбітальної системи та геостационарними супутниками — хмарними центрами обробки даних здійснюється за допомогою ліній зв'язку між супутниками. Для організації лінії зв'язку між супутниками на геостационарній та низькій круговій орбіті (GEO-LEO Inter-Satellite Link) кубсати зі складу низькоорбітальної системи мають бути обладнані параболічними спрямованими антенами, що розгортаються після відділення кубсата (Deployable Parabolic Dish Antenna) та його пере-

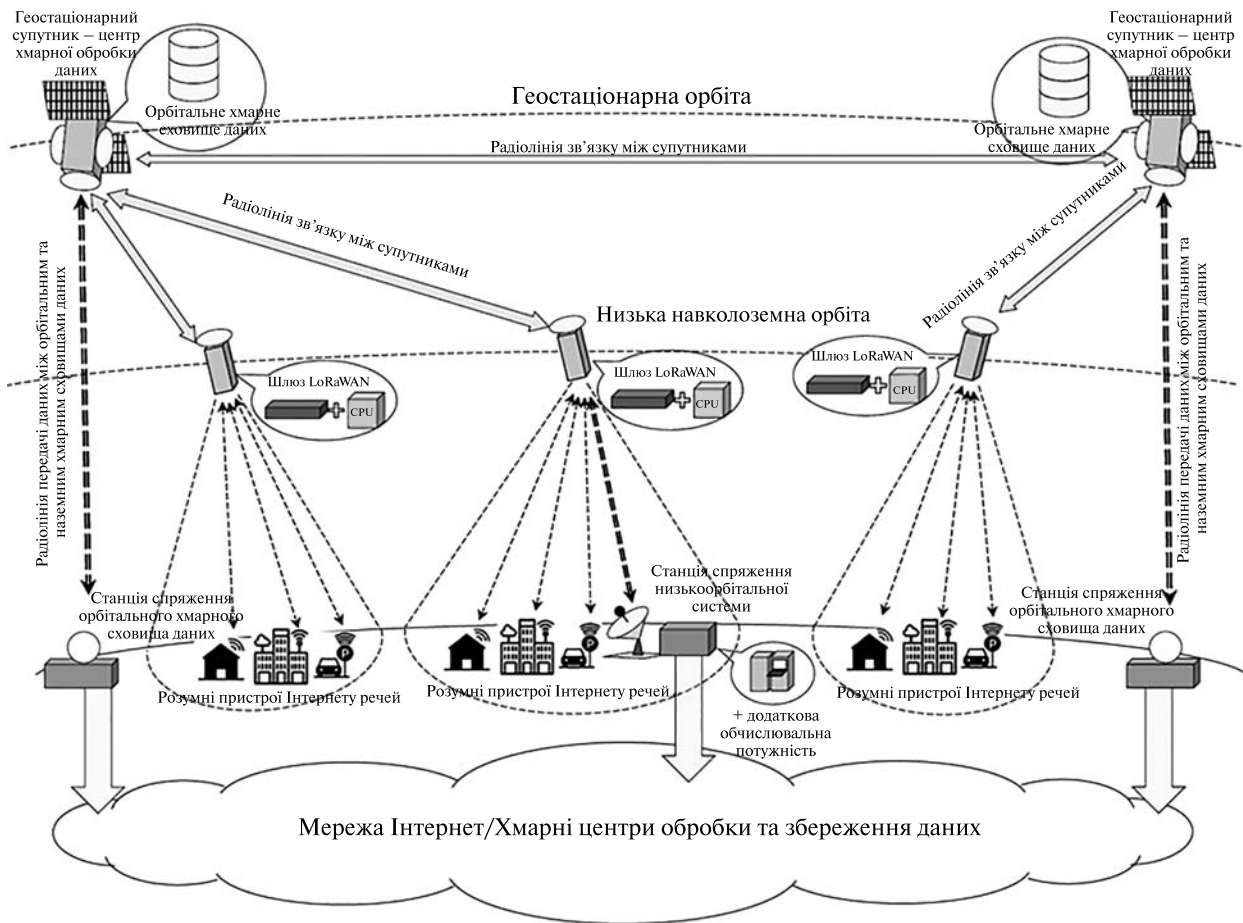


Рис. 9. Взаємодія орбітального хмарного сховища даних та низькоорбітальної системи інтернету речей, яка використовує модифікований протокол LoRaWAN

ходу на робочу орбіту [2]. Конструкція кубсатів, що входять до складу супутникової системи на низькій навколосемній орбіті (Low Earth Orbit, LEO), має забезпечувати наведення спрямованої параболічної антени в напрямку на геостаціонарний супутник — хмарний центр обробки даних, або на геостаціонарний супутник високої пропускної здатності (GEO THS Satellite), який в цьому випадку буде виконувати функцію ретранслятора і маршрутизатора інформації інтернету речей.

На рис. 10 наведена архітектура орбітального угруповання комбінованої супутникової системи інтернету речей. Кубсати, що перебувають на низькій навколосемній орбіті, здійснюють прийом інформації інтернету речей / пакетів інфор-

мації інтернету речей безпосередньо від сенсорів, та передачу інформації управління безпосередньо до пристроїв — актуаторів, із використанням модифікованого протоколу LoRaWAN. На рис. 10 для спрощення показано тільки одну орбітальну площину. Низькоорбітальна складова орбітального угруповання містить декілька орбітальних площин. Кількість орбітальних площин визначається виходячи із вимог до безперервності надання послуг, потужності, енергоефективності та строку експлуатації пристроїв інтернету речей — сенсорів і актуаторів та іншими факторами. Кубсати обладнано параболічними антенами, які розгортаються після виведення кубсата на робочу орбіту, і призначені для підтримки ліній зв'язку між супутниками типу

«низька навколосемна орбіта — геостационарна орбіта» (LEO-GEO RF Link). Конструкція кубсатів забезпечує наведення параболічних антен у напрямку геостационарного супутника.

На геостационарній орбіті розташовані геостационарні супутники — хмарні центри обробки даних, та/або геостационарні супутники високої пропускної здатності, оснащені обладнанням для підтримки ліній зв'язку між супутниками типу «геостационарний супутник — геостационарний супутник» (GEO-GEO Inter-Satellite Link). Геостационарний супутник забезпечує прийом узагальненої інформації інтернету речей від кубсатів, які перебувають у межах його зони радіобачення. Для забезпечення суцільної зони радіобачення кубсатів достатньо розташувати на геостационарній орбіті три геостационарні супутники — центри хмарної обробки даних, або супутники великої пропускної здатності. Цілісність орбітального хмарного сховища даних забезпечується за допомогою ліній зв'язку між супутниками на геостационарній орбіті та ліній підключення геостационарних супутників — центрів хмарної обробки даних до наземної інфраструктури хмарних обчислень через станцію спряження (Orbital Cloud Data Gate Way) (див. рис. 10).

Лінії зв'язку між супутниками типу «геостационарна орбіта — геостационарна орбіта» та типу «низька навколосемна орбіта — геостационарна орбіта» (LEO-GEO Inter-Satellite Link) використовують радіодіапазон та/або оптичні/лазерні лінії. Перспективним напрямком розвитку технології ліній зв'язку між супутниками є освоєння вищих діапазонів частот, зокрема терагерцового. Проведені дослідження та практичні експерименти підтвердили можливість організації таких ліній на відстані великої дальності, до 1 тис. км та більше [14—18, 23, 24, 30, 31]. При використанні терагерцового діапазону частот вирішується питання збільшення швидкості передачі інформації за рахунок використання ширших смуг частот, забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, виключається ймовірність впливу навмисних перешкод, спрощується процедура міжнародної координації. Прикладом успішного практичного використання терагерцового діапазону частот для збільшення швидкості передачі інформації є запуск дослідного китайського супутника з бортовим ретранслятором терагерцового діапазону, який призначений для тестування мереж зв'язку покоління 6G [7].

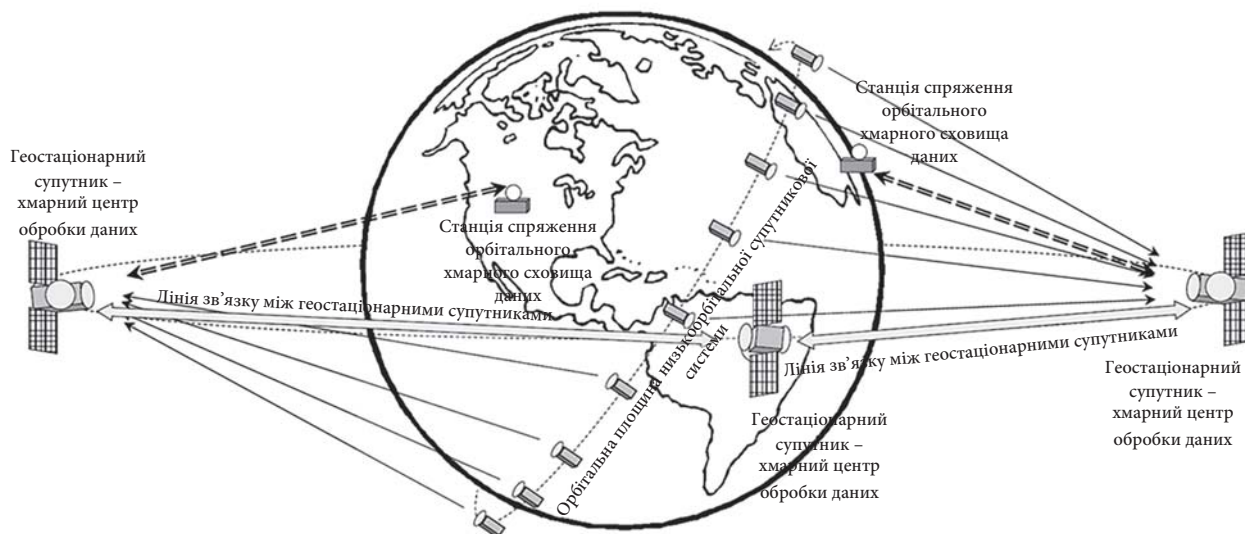


Рис. 10. Архітектура орбітального угруповання комбінованої (низькоорбітальна — геостационарна, LEO-GEO) супутникової системи інтернету речей

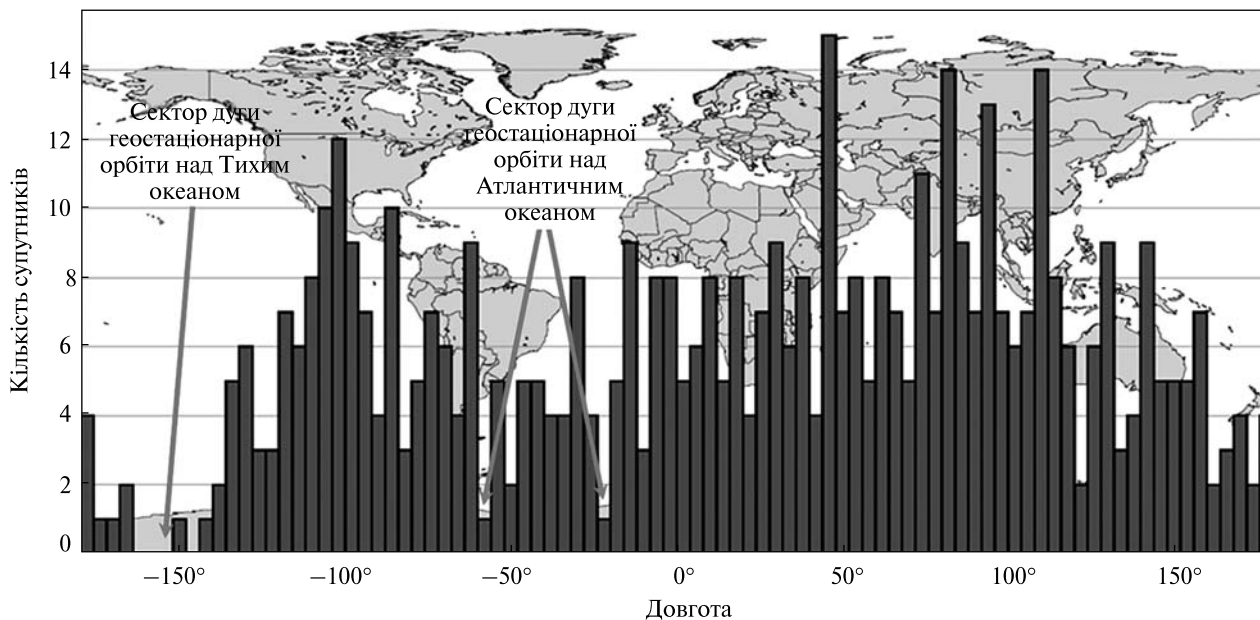


Рис. 11. Завантаження геостационарної орбіти [22] функціонуючими геостационарними супутниками

Геостационарна орбіта достатньо завантажена функціонуючими геостационарними супутниками різноманітного призначення (див. рис. 11, [8]) та супутниками, що виведені із експлуатації.

Як видно з рис.11, найбільш вільними секторами геостационарної орбіти є сектори, розташовані над Тихим і Атлантичним океанами: сектори  $144^{\circ}\dots 164^{\circ}$ ,  $56^{\circ}\dots 60^{\circ}$ ,  $20^{\circ}\dots 24^{\circ}$  з. д. Враховуючи той факт, що для забезпечення доступу до геостационарних супутників — центрів хмарної обробки даних використовуються лінії зв'язку між геостационарними супутниками, геостационарні супутники зі складу орбітального хмарного сховища даних можна розташувати в цих секторах геостационарної орбіти, які не становлять інтересу з точки зору послуг супутникового зв'язку для кінцевих споживачів, що перебувають на поверхні Землі.

### 3. ВИСНОВКИ

1. Сучасні супутникові телекомунікаційні системи забезпечують передачу інформації систем інтернету речей, побудованих переважно за хмарною архітектурою. Недоліком хмарної архітектури систем інтернету речей є необхідність

передачі всього об'єму інформації пристроїв інтернету речей до хмарних центрів обробки даних і у зворотному напрямку, що призводить до неефективного завантаження супутникових телекомунікаційних систем.

2. Супутникові телекомунікаційні системи можна адаптувати до особливостей інформаційних потоків систем інтернету речей, які використовують технології туманних та граничних обчислень для підвищення власної ефективності. Адаптація супутникових телекомунікаційних систем до особливостей реалізації туманних та граничних обчислень інтернету речей здійснюється методом додавання обчислювальної потужності в термінали користувачів, в корисне навантаження супутників-ретрансляторів і станції спряження або центральні станції VSAT-мереж. Таке розташування обчислювальної потужності та розподіл обчислень дозволяє зберегти строгу ієрархічну архітектуру інтернету речей, скоротити час обробки та обсяг інформації, яку потрібно передавати, підвищити коштовність інформації, що передається до хмарного центру обробки інформації.

3. Запропоновано шляхи переходу супутникових телекомунікаційних систем від хмарної



архітектури систем інтернету речей до багаторівневої архітектури із застосуванням граничних і туманних обчислень. Розглянуто варіанти впровадження туманних обчислень в низькоорбітальних системах: орбітальне угруповання кубсатів, що використовує модифікований протокол LoRaWAN — доповнення корисного навантаження кубсатів та їхню заміну під час планового оновлення орбітального угруповання; система OneWeb — модернізація обладнання терміналів прикінцевих користувачів та станції спряження; система StarLink — модернізація обладнання терміналів користувачів і станцій спряження, включення до складу орбітального угруповання додатково супутників — обчислювачів.

4. В геостационарних системах великої пропускної здатності впровадження граничних та туманних обчислень можливо здійснити в два етапи. На першому етапі перехід до туманних і граничних обчислень можливий шляхом модернізації обладнання терміналів користувачів та станцій спряження з метою доповнення складу обладнання обчислювальними модулями / багатопроцесорними комплексами. На другому етапі в ході планової заміни геостационарного супутника великої пропускної здатності його корисне навантаження можна оснастити додатковим обладнанням для виділення трафіка систем інтернету речей, обробки цього трафіка і проведення обчислень для реалізації туманних обчислень у складі космічного сегмента системи.

5. Для підвищення оперативності обробки, зберігання та забезпечення доступу систем ін-

тернету речей до хмарних сервісів доцільне створення космічного сегмента хмарних сервісів — орбітального хмарного сховища даних, яке складається зі з'єднаних за допомогою ліній зв'язку між супутниками декількох геостационарних супутників — центрів хмарної обробки даних. Доступ до орбітального хмарного сховища даних може здійснюватися через модернізовані геостационарні супутники високої пропускної здатності та через кубсати, що перебувають на низькій навколоземній орбіті і обладнані засобами для підтримки ліній зв'язку між супутниками типу «низька навколоземна орбіта — геостационарна орбіта».

6. Для геостационарних супутників — центрів хмарної обробки даних можливо використовувати сегменти геостационарної орбіти, які не є привабливими з точки зору розташування супутників для забезпечення послуг супутникового зв'язку та мовлення для споживачів, що перебувають на континентальній частині поверхні Землі.

7. Для організації ліній зв'язку між супутниками типу «геостационарна орбіта — геостационарна орбіта» та «низька навколоземна орбіта — геостационарна орбіта» для забезпечення доступу геостационарних супутників і супутників на низькій навколоземній орбіті до орбітального хмарного сховища даних, окрім використання традиційних радіоліній в Ka-діапазоні або оптичних/лазерних ліній зв'язку, можливе використання радіоліній в терагерцовому діапазоні частот.

## REFERENCES

1. *5G sub 6 GHz technologies and trends*. URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/34295-g-sub-6-ghz-technologies-and-trends> (Last accessed: 15.07.2021).
2. Akan V., Yazgan E. *Antennas for space applications: A Review*. DOI: 10.5772/intechopen.93116. URL: <https://www.intechopen.com/books/advanced-radio-frequency-antennas-for-modern-communication-and-medical-systems/antennas-for-space-applications-a-review> (Last accessed: 15.07.2021).
3. *Azure Space partners bring deep expertise to new venture*. URL: <https://news.microsoft.com/transform/azure-space-partners-bring-deep-expertise-to-new-venture/> (Last accessed: 15.07.2021).
4. Burleigh S. C., De Cola T., Morosi S., Jayousi S., Cianca E., Fuchs C. (2019). From connectivity to advanced internet services: A comprehensive review of small satellites communications and networks. *Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 2019, ID 6243505, 17. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/6243505> (Last accessed: 15.07.2021).
5. Caleb H. Cloud Constellation selects LeoStella to build 10 data-storage satellites. (2019). URL: <https://spacenews.com/cloud-constellation-selects-leostella-to-build-10-data-storage-satellites/> (Last accessed: 15.07.2021).
6. Chernyshev A. I., Demidenko I. O., Voruev A. V., Mikhnevich S. Yu. (2018). Programmable network access control with adaptive configuration of physical interfaces. *Proc. F. Scorina Gomel State Univ.*, № 6 (111), 55–62.
7. *China sends 'world's first 6G' test satellite into orbit*. URL: <https://www.bbc.com/news/av/world-asia-china-54852131> (Last accessed: 15.07.2021).
8. *Classification of geosynchronous objects*. Date 28 May 2018 Issue 20 Rev 0. European Space Agency, European Space Operations Centre.
9. *Edge Computing for Dummies®*, *Stratus Special Edition* (2020). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
10. *EDRS (European Data Relay Satellite) Constellation / SpaceDataHighway*. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/edrs> (Last accessed: 15.07.2021).
11. *Enciklopediya STARLINK*. URL: <https://www.comnews.ru/content/209438/2020-10-07/2020-w41/enciklopediya-Star-Link> (Last accessed: 15.07.2021).
12. *Global IoT market to grow to \$1.5trn annual revenue by 2030*. (2020). URL: <https://www.iot-now.com/2020/05/20/102937-global-iot-market-to-grow-to-1-5trn-annual-revenue-by-2030/> (Last accessed: 15.07.2021).
13. Handley M. *Delay is not an option: Low latency routing in space*. Univ. College London. URL: [https://www.researchgate.net/publication/328891593\\_Delay\\_is\\_Not\\_an\\_Option\\_Low\\_Latency\\_Routing\\_in\\_Space](https://www.researchgate.net/publication/328891593_Delay_is_Not_an_Option_Low_Latency_Routing_in_Space) (Last accessed: 15.07.2021).
14. Ilchenko M. Ye., Kalinin V. I., Narytnik T. N., Cherepenin V. A. (2011). *Wireless UWB ecologically friendly communications at 70 nanowatt radiation power*. CriMiCo 2011–2011 21st International Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology, Conf. Proc., ID 6068964, 355–356. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-81455143600&partnerID=40&md5=fbcc806eed6877cb29ff71b940370a6c> (Last accessed: 15.07.2021).
15. Ilchenko M. Ye., Kuzmin S. Ye., Narytnik T. N., Fisun A. I., Belous O. I., Radzikhovsky V. N. (2013). Transceiver for 130–134 GHz band digital radio relay system. *Telecommunications and Radio Engineering*, **72** (17), 1623–1638. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i17.70 (Last accessed: 15.07.2021).
16. Ilchenko M. Ye., Narytnik T. N., Didkovsky R. M. (2013). Clifford algebra in multipleaccess noise-signal communication systems. *Telecommunications and Radio Engineering*, **72** (18), 1651–1663. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v72.i18.20> (Last accessed: 15.07.2021).
17. Ilchenko M. Y., Narytnik T. N., Fisun A. I., Belous O. I. (2011). Terahertz range telecommunication systems *Telecommunications and Radio Engineering*, **70** (16), 1477–1487. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i16.60 (Last accessed: 15.07.2021).
18. Ilchenko M. Ye., Narytnik T. N., Fisun A. I., Belous O. I. (2008). Conception of development of millimeter and submillimeter wave band radio telecommunication systems. *Telecommunications and Radio Engineering*, **67** (17), 1549–1564. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v67.i17.30 (Last accessed: 15.07.2021).
19. Ilchenko M., Narytnik T., Prisyazhny V., Kapshtyk S., Matvienko S. (2019). *The solution of the problem of the delay determination in the information transmission and processing in the LEO satellite internet of things system*. IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2019: Proceedings. ID 9061350, 419–425. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85083638366&doi=10.1109%2FPICTST47496.2019.9061350&partnerID=40&md5=7768787b80c0fd34e7417001cecc231b> (Last accessed: 15.07.2021).
20. Ilchenko M., Narytnik T., Prisyazhny V., Kapshtyk S., Matvienko S. (2019). *The solution of the problem of the delay determination in the information transmission and processing in the LEO satellite internet of things system*. IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine, 2019/ IEEE Xplore Digital Library. Kyiv, 419–425. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9061350> (Last accessed: 15.07.2021).

21. Ilchenko M., Narytnyk T., Prisyazhny V., Kapshtyk S., Matvienko S. (2020). The computing load balancing through the orbital computer network of the internet of things. *Telecommunications and Radio Engineering*, **79** (4), 343—352. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i4.70
22. Ilchenko M., Narytnyk T., Prisyazhny V., Kapshtyk S., Matvienko S. (2021). *Low-Earth orbital internet of things satellite system on the basis of distributed satellite architecture*. Advances in Computer, Communication and Computational Sciences. Proceedings of IC4S 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, 1158. 301—314. Springer Nature Singapore Pte Ltd.
23. Ilchenko M. Ye., Narytnyk T. M., Radzikhovsky B. M., Kuzmin S. E., Lutchak O. V. (2015). Development of the transmitting and receiving channels for terahertz band relay systems. *Telecommunications and Radio Engineering*, **74** (11), 981—998. DOI: 10.1615/telecomradeng.v74.i11.30 (Last accessed: 15.07.2021).
24. Ilchenko M. E., Narytnyk T. N., Radzikhovsky V. N., Kuzmin S. E., Lutchak A. V. (2016). Design of transmitting and receiving radio-relay systems' radiopaths of terahertz range. *Electrosvyaz*, **2**, 40—48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25594179> (Last accessed: 15.07.2021).
25. Maral G., Bousquet M. (2009). *Satellite communications systems*. 5th ed. John Wiley & Sons Ltd.
26. Minoli D. (2015). *Innovations in satellite communications and satellite technology. The Industry Implications of DVB-S2X, High Throughput Satellites, Ultra HD, M2M, and IP*. John Wiley & Sons, Inc.
27. Mohan N., Kangasharju J. *Edge-fog cloud: A distributed cloud for internet of things computations*. CIoT'16 1570310864 / DOI: 10.1109/CIOT.2016.7872914
28. Narytnyk T. N. (2014). Possibilities of using THz-band radio communication channels for super high-rate backhaul. *Telecommunications and Radio Engineering*, **73** (15), 1361—1371. URL: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15> (Last accessed: 15.07.2021).
29. Narytnyk T. (2016). *The ways of creation and use of telecommunication systems in the terahertz band transport distribution 5G mobile networks*. Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications be used on this conference proceedings. Consistency is required to ensure that Science and Technology (PIC S&T). 36—39.
30. Narytnyk T. M. (2018). Principles of development of the terahertz band telecommunication system based on the technology of harmonic signal as the information carrier. *Telecommunications and Radio Engineering*, **77** (16), 1423—1440. URL: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v77.i16> (Last accessed: 15.07.2021).
31. Narytnyk T. M., Lutchak O. V., Osypchuk S. O., Uryvskyi L. O. (2015). Criteria and algorithms for shaping of the signal-code sequences on the basis of Wi-Fi technology at deployment of the terahertz band telecommunication system. *Telecommunications and Radio Engineering*, **75** (20), 1823—1839. URL: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v74.i20.50> (Last accessed: 15.07.2021).
32. Nguyen J. *Overview of existing and future advanced satellite systems*. DOI: 10.5772/intechopen.93227. URL: <https://www.intechopen.com/online-first/overview-of-existing-and-future-advanced-satellite-systems> (Last accessed: 15.07.2021).
33. *OneWeb non-geostationary satellite system (LEO): Attachment A. Technical Information to Supplement Schedule S, April 2016*, SAT-LOI-20160428-00041 (Last accessed: 15.07.2021).
34. *Operating in an Epic<sup>NG</sup> Environment*. URL: [www.intelsat.com](http://www.intelsat.com) (Last accessed: 15.07.2021).
35. *Satellite 2020 — Lacuna Space explains LoRaWAN satellite success*. URL: <https://www.spaceitbridge.com/satellite-2020-lacuna-space-explains-lorawan-satellite-success.htm> (Last accessed: 15.07.2021).
36. *Satellite communications & broadcasting markets survey. Forecasts to 2025 / 23rd Edition*. September 2016. 2016 Euroconsult.
37. Ye Chen, Wei Liu, Tian Wang, Qingyong Deng, Anfeng Liu, Houbing Song (2019). An adaptive retransmit mechanism for delay differentiated services in industrial WSNs. *EURASIP J. Wireless Commun. and Networking*. ID 258. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1566-2> (Last accessed: 15.07.2021).

Стаття надійшла до редакції 15.07.2021  
 Після доопрацювання 15.10.2021  
 Прийнято до друку 16.12.2021

Received 15.07.2021  
 Revised 15.10.2021  
 Accepted 16.12.2021

*М. Ю. Ільченко*<sup>1</sup>, Director of Institute of Telecommunication Systems, 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, director@mitris.com

*Т. М. Наритник*<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

*В. І. Присяжний*<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

*С. В. Капштик*<sup>2</sup>, NSFCTC Assistant Director, Ph.D. in Tech.

E-mail: Sergii.kapshtyk@gmail.com

*С. А. Матвієнко*<sup>3</sup>, Chief Designer, Ph.D. in Tech., Senior Researcher

E-mail: matvienko\_2005@ukr.net

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

37, Peremohy Ave, Kyiv, 03056 Ukraine

<sup>2</sup> National Space Facilities Control and Test Center

8 Moskovska Str., Kyiv, 01010 Ukraine

<sup>3</sup> Private Joint Stock Company “Scientific and Production Complex “KURS”

9 Boryspilska Str, Kyiv, 02099 Ukraine

#### SPACE INFRASTRUCTURE OF IOT. CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

We present an overview of possibilities for existing Satellite Communication Systems utilization to provide Internet of Things Services. It is shown that existing Satellite Communication Systems provide traffic transmission for IoT Systems with Cloud Architecture. The proposals are explicated on the possibility of using Fog and Edge Computing for Satellite Communication Systems. The implementation of Fog and Edge computing in IoT Systems requires the modernization of the Low-Earth Orbit (LEO) and Geostationary Orbit (GEO) Satellite Communication Systems, and we show the ways of their enhancement. To increase the efficiency of IoT data processing and the reliability of IoT Data Storage, we propose to construct an Orbital Cloud Data Storage in GEO, which consists of several GEO Satellites — Cloud Computing Data Centers. Such a structure would require the development of methods of access providing to the Orbital Cloud Data Storage. For these purposes, our propositions include using GEO High-Throughput Satellites and satellites from the structure of LEO Satellite Communication. The issues of interaction between Orbital Cloud Data Storage and ground-based Cloud Data Processing and Storage Infrastructure are briefly considered. The orbital slots in GEO are proposed for the location of GEO Satellites — Cloud Computing Data Centers.

**Key words:** Internet of Things Services, Satellite Communication System, GEO, LEO, orbital constellation of satellites, Smart Things of IoT.