

ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНА СУПУТНИКОВА ІНФРАСТРУКТУРА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

¹Жабчик А.І., ¹Нарушкевич О.М., ¹Наритник Т.М., ²Капштик С.В.

*¹Навчально-науковий інститут телекомунікаційних,
систем КПП ім. Ігоря Сікорського, Україна*

*²Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Україна
E-mail: nastia2767@gmail.com; sashanarushkevych@gmail.com;
director@mitris.com; s.kapshtyk@spacecenter.gov.ua*

SOFTWARE-CONFIGURED SATELLITE INFRASTRUCTURE OF THE INTERNET OF THINGS

Abstract. The state of use of the satellite component for Internet of Things systems operating on the basis of the 5G ecosystem is considered. A multi-level satellite infrastructure is proposed, which is designed to support the functioning of Internet of Things systems and includes geostationary and low-orbital components. To support Internet of Things systems, the satellite infrastructure includes computing power for the implementation of cloud, fog, and edge computing. In order to improve data transmission management, it is proposed to create a software-configured data transmission network as part of the satellite infrastructure of the Internet of Things. The data transmission network combines geostationary and low-orbit components. The use of software-configured data transmission network technology makes it possible to simplify the operational adjustment of the low-orbit component to the regional characteristics of Internet of Things services and generated traffic.

Інтернет речей став одним з основних драйверів розвитку телекомунікаційних систем. Впровадження систем Інтернету речей супроводжується постійним зростання попиту на вільну пропускну здатність телекомунікаційних мереж. З цієї причини в специфікаціях стандартів 4G та 5G дослідницька група 3GPP починаючи в релізу 14 виділяє системи і послуги Інтернету речей в окремий напрямок, який формалізований у вигляді вузькосмугової послуги Інтернету речей (англ. 5GLTENarrowbandInternetofThings, або NB-IoT). Для розширення зони надання послуг 4G, 5G, включаючи послуги NB-IoT, дослідницька група 3GPP починаючи з релізу 14 включає до складу інфраструктури мобільної мережі супутникову складову. До беззаперечних переваг супутникових систем зв'язку та передачі даних відносяться практично глобальна зона обслуговування та спроможність забезпечити підключення незалежно від стану наземних телекомунікаційних мереж. В релізах групи 3GPP супутникова складова розглядається в першу чергу як оперативний засіб забезпечити підключення віддалених районів із непідготовленою інфраструктурою, де розміщені базові станції, до кореневої мережі. Для цього типу послуг група 3GPP ввела термін “неназемна мережа” (англ. Non-TerrestrialNetworks). У відповідь на пропозиції групи 3GPP розробники та оператори супутникових телекомунікаційних систем звернули особливу увагу на забезпечення сумісності цих систем із наземними системами широкосмугового доступу 5G.

В релізі 17 супутниковій компоненті відводиться більш важливе місце в екосистемі 5G [1], яка розглядається як критично важлива складова глобальної екосистеми 5G. В релізі визначені специфікації для безпосереднього підключення 5G до супутника (англ. direct-to-device 5Goversatellite). Реліз 17 передбачає використання геостаціонарної і низькоорбітальної складових, відзначаючи їх переваги та недоліки. В частині розвитку інфраструктури 5G супутникова компонента розглядається як засіб для підключення віддалених зон обслуговування для технології, що отримала назву «Нове радіо не наземних мереж» (англ. NewRadio - Non-TerrestrialNetworks, NR-NTN). В цьому випадку NR-NTN можна розглядати

як частину розширеної мобільної широкопasmової мережі (англ. Enhanced Mobile Broadband, eMBB) [10]. Зважаючи на вимоги ринку щодо впровадження систем і послуг Інтернету речей ряд провідних супутникових компаній – операторів почали пропонувати на ринку власні рішення. На сьогодні більше 80% обсягу послуг супутникового Інтернету речей надають компанії Inmarsat, Iridium, GlobalStar ORBCOM [5].

Одним з головних напрямків розвитку супутникових телекомунікаційних систем є впровадження технології програмно-конфігурованих мереж (англ. Software-defined Network, SDN) [4]. Метою впровадження цієї технології є спрощення управління конфігурацією супутникової мережі та забезпечення її гнучкості, надійності, адаптації до нових видів послуг, тощо.

До особливостей супутникових систем, які передбачають надання послуг Інтернету речей, важливою властивістю є їх здатність забезпечити надання послуг із різними стандартами IoT, зокрема із стандартами, що базуються на технології LoRa® та на технології IoT-NTN. Для досягнення такої мети підхід, який базується на використанні технологій SDN та програмно-конфігурованого радіо (Software-Defined Radio, SDR), є привабливим і створює передумови для подальшої інтеграції до екосистеми 5G. На спрощення реконфігурації мережі та спільного використання її ресурсів багатьма споживачами послуг орієнтовані технології «віртуалізації мережевих функцій» (англ. Network Function Virtualization, NFV) та віртуалізації мережі (англ. Network Virtualization, NV) [11]. В якості перспективної супутникової телекомунікаційної системи, яка спрямована на надання послуг Інтернету речей із використанням власних обчислювальних потужностей для реалізації концепції краєвих (або граничних), туманних та хмарних обчислень, пропонується багаторівнева програмно-конфігурована супутникова інфраструктура Інтернету речей.

Програмно-конфігурована супутникова інфраструктура Інтернету речей (далі - IoT супутникова інфраструктура) складається з трьох основних сегментів:

- геостационарний сегмент;
- низькоорбітальний сегмент;
- наземний сегмент.

На рис.1. представлена архітектура космічної складової IoT супутникової інфраструктури. Геостационарний сегмент включає GEO супутники-ретранслятори та GEO-супутники – хмарні центри даних. GEO супутники-ретранслятори призначені для забезпечення формування та підтримки ліній зв'язку типу «супутник-супутник» із LEO супутниками-ретрансляторами, для взаємодії із наземним комплексом управління та наземними засобами операторів і сервіс-провайдерів, а також із наземними мережами передачі даних.

GEO супутники-ретранслятори обладнані цифровим корисним навантаженням, яке функціонує із використанням технологій SDN та SDR. В конструкції високочастотної частини корисного навантаження GEO супутників-ретрансляторів використовуються технології супутників великої пропускної здатності (англ. High-Throughput Satellite, HTS), що дозволяє формувати одночасно велику кількість керованих та нерухомих променів. Керовані промені призначені для супроводження руху LEO супутників-ретрансляторів.

Для формування керованих променів використовуються фазовані антенні решітки. GEO супутники – хмарні центри даних призначені для обробки, збереження та поширення даних, та надання обчислювальної потужності для підтримки послуг Інтернету речей, побудованих із використанням «хмарної» складової. Усі GEO супутники об'єднані лініями зв'язку типу «супутник-супутник», що дозволяє сформувати GSO мережу передачі даних кільцевої архітектури.

Низькоорбітальна складова IoT супутникової інфраструктури побудована на базі архітектури розподіленого супутника [12]. Розподілені супутники розташовані в кількох орбітальних площинах на низькій навколоземній орбіті. Параметри орбіти, кількість орбітальних площин і розподілених супутників в кожній площині визначається зоною обслуговування та показниками безперервності обслуговування. Низькоорбітальна складова призначена для забезпечення взаємодії із кінцевими пристроями Інтернету речей в режимі

безпосереднього доступу (англ. Direct-to-Satellite) та із використанням терміналів кінцевих споживачів. Режим безпосереднього доступу використовується для послуг Інтернету речей на базі вузькосмугових протоколів LoRa® та NB-IoT. При використанні послуг Інтернету речей, які вимагають широкосмугового каналу, включаючи канали передачі відеоінформації, використовуються термінали користувачів, аналогом яких є термінали низькоорбітальних систем Starlink та OneWeb.

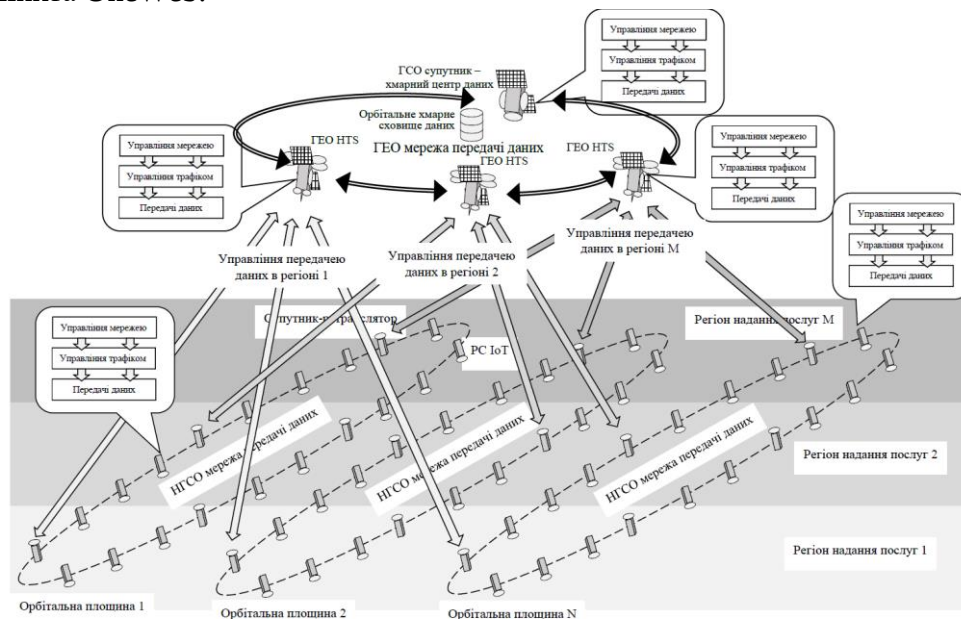


Рис.1. Архітектура космічної складової IoT супутникової інфраструктури.

Кожен розподілений супутник за допомогою ліній зв'язку типу «супутник-супутник» встановлює лінії зв'язку з двома сусідніми розподіленими супутниками в своїй орбітальній площині та по одному розподіленому супутнику в двох сусідніх орбітальних площинах. Лінії зв'язку між розподіленими супутниками утворюють транспортну мережу для орбітальної системи передачі даних низькоорбітальної складової IoT супутникової інфраструктури. Для забезпечення повнозв'язності IoT супутникової інфраструктури до складу кожної орбітальної площини низькоорбітальної складової введені LEO супутники-ретранслятори, завданням яких є підтримка лінії «супутник-супутник» з GEO супутниками-ретрансляторами.

До особливостей низькоорбітальної складової відносяться фактори, які зумовлені особливостями низької навколоземної орбіти. А саме, супутники постійно рухаються відносно об'єктів, розташованих на поверхні Землі, та відносно супутників, розташованих на геостаціонарній орбіті. Тому зона радіобачення низькоорбітального супутника постійно рухається по поверхні Землі, проходячи усі широти в межах зони обслуговування системи, а склад низькоорбітальних супутників, які знаходяться в межах до зони радіобачення геостаціонарного супутника, постійно змінюється. Зважаючи на певні відмінності в складі та специфіці послуг Інтернету речей в різних регіонах світу, необхідно зазначити, що зони обслуговування супутників усіх орбітальних площин зі складу низькоорбітальної складової в певний час будуть проходити по усіх регіонах поверхні Землі. Тому в складі низькоорбітальної складової можна виділити певні групи супутників в кожній орбітальній площині, які надають послуги у визначених регіонах світу, і таким чином розділити склад супутників кожної орбітальної площини на певні групи, як це показано на рис.1. Супутники зі складу геостаціонарної складової знаходяться в стаціонарному положенні відносно цих регіонів. Тому ці супутники мають забезпечувати підтримку функціонування низькоорбітальної складової і надання нею послуг Інтернету речей згідно регіональної специфіки, зважаючи на постійну зміну складу супутників низькоорбітальної складової у визначеному регіоні. Така відмінність враховує не тільки алгоритми обробки інформації Інтернету речей, а й маршрутизацію циркулюючої інформації.

IoT супутникова інфраструктура має власні обчислювальні потужності, які реалізують хмарні, туманні та краєві, або граничні обчислення, що відповідає багаторівневій ієрархічній архітектурі систем Інтернету речей. Хмарні обчислення реалізуються обчислювальними потужностями спеціально виділених GEO супутників – хмарних центрів обробки даних. Для реалізації туманних і краєвих (граничних) обчислень до розподілених супутників зі складу низькоорбітальної складової введені супутники-обчислювачі [12].

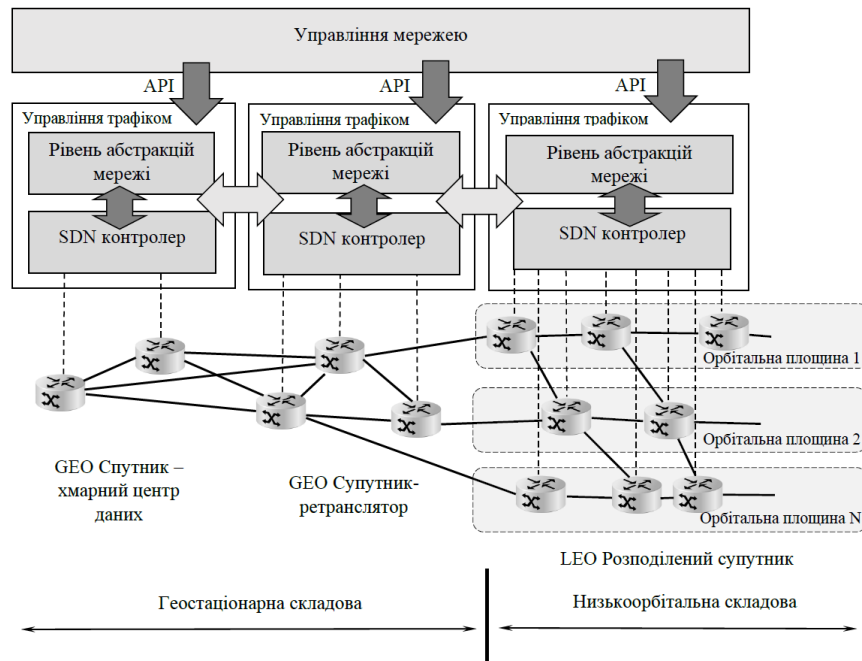


Рис.2. Архітектура SDN мережі IoT супутникової інфраструктури.

Геоестаціонарна та низькоорбітальна складові IoT супутникової інфраструктури утворюють єдину SDN мережу передачі даних. На рис.2 представлена SDN мережа передачі даних IoT супутникової інфраструктури. Функціонал управління передачею даних ГСО мережі розподілений між трьома площинами (див. рис.2): управління мережею, управління трафіком та передачі даних. На рівні управління мережею здійснюється управління архітектурою IoTсупутникової інфраструктури як мережі передачі даних в цілому та її складових для надання послуг Інтернету речей. Для спрощення управління мережею використовуються технології NFV та NVв поєднанні із гіпервізорами, як засобами віртуалізації функцій і спрощення представлення інформації в графічному вигляді. Рівень управління мережею здійснює управління геоестаціонарною складовою і низькоорбітальною складовимиIoT супутникової інфраструктури. Рівень управління мережею взаємодіє із рівнем управління трафіком за допомогою програмованого інтерфейсу додатків (англ. ApplicationProgrammingInterface, API).

У відповідності до абстракцій мережі (англ. NetworkAbstractions), які визначені на підставі отриманих по північному інтерфейсу API, рівень управління трафіком визначає конфігурацію SDN контролерів ГЕО мережі передачі даних. Керуюча інформація у вигляді API через південний інтерфейс рівня управління трафіком доводиться до пристроїв рівня передачі даних, які здійснюють маршрутизацію інформації Інтернету речей, що циркулює в системі. Кожен із GEO супутників-ретрансляторів забезпечує інформаційних обмін із LEOсупутниками-ретрансляторами зі складу низькоорбітальної складової в межах власної зони обслуговування. По каналу передачі даних, який побудований із використанням ліній «супутник-супутник» передаються дані слайсу даних Інтернету речей та інформація слайсу управління мережею передачі даних. На рис.2 показані західний і східний інтерфейси площини управління трафіком, які забезпечують передачі API між геоестаціонарною та низькоорбітальною складовими.

У складі низькоорбітальної складової на базі ліній «супутник-супутник» між

розподіленими супутниками сформовано низькоорбітальну SDNмережу передачі даних, яка є складовою частиною SDNмережі IoT супутникової інфраструктури. SDNконтролери зі складу рівня управління трафіком визначають розподіл потоків даних в межах низькоорбітальної складової та між низькоорбітальною та геостаціонарною складовими. Зважаючи на особливості руху низькоорбітальної складової відносно поверхні Землі перелік завдань, що реалізуються SDN контролерами динамічно змінюється у відповідності із рухом зони обслуговування розподіленого супутника відносно поверхні Землі. Зміна завдань здійснюється із використанням західного та східного інтерфейсів у відповідності до структур послуг Інтернету речей, які визначені API по північному інтерфейсу.

Висновки.

1. Розвиток сучасних телекомунікаційних мереж 4G, 5G передбачає використання геостаціонарної та низькоорбітальної супутникової складової для розширення зони обслуговування наземних мереж за технологією не наземних мереж NTN, і забезпечення підключення пристроїв Інтернету речей безпосередньо до супутника за вузькосмуговою технологією IoT-NB.

2. Для розвитку систем Інтернету речей запропонована багаторівнева супутникова інфраструктура, архітектура якої передбачає використання геостаціонарної і низької навколоземної орбіти, що відповідає концепції «не наземних мереж» екосистеми 5G.

3. Супутникова інфраструктура Інтернету речей має власні обчислювальні потужності для підтримки систем Інтернету речей, які побудовані за багаторівневою ієрархічною архітектурою, і реалізує хмарні обчислення на рівні геостаціонарної складової та туманні і краєві (граничні) обчислення на рівні низькоорбітальної складової.

4. Для організації передачі даних в супутниковій інфраструктурі Інтернету речей реалізована програмно-конфігурована мережа передачі даних, яка об'єднує геостаціонарну і низькоорбітальну складові. Використання технології програмно-конфігурованих мереж передачі даних дозволяє спростити управління системою передачі даних, її реконфігурацію та відновлення працездатності, і оперативно впроваджувати нові послуги Інтернету речей шляхом розробки програмованих інтерфейсів додатків.

Література

1. 3GPP реліз 17.
2. 5G from Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks / Xingqin Lin, Stefan Rommer, Sebastian Euler, Emre A. Yavuz, and Robert S. Karlsson
3. Software-defined intelligent satellite-terrestrial integrated networks: insights and challenges / Shuo Yuan, Mugen Peng, Yaohua Sun, Xiqing Liu / Digital Communications and Networks / Available online 21 June 2022 / <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.06.009>
4. Inmarsat and hiSky Complete Test for IoT Service Offering / електронний документ. Режим доступу: <https://www.satellitetoday.com/technology/2022/07/06/inmarsat-and-hisky-complete-tests-for-iot-service-offering/>
5. Software-Defined Next-Generation Satellite Networks: Architecture, Challenges, and Solutions / Shuang Xu, Xing-Wei Wang, and Min Huang / 2169-3536 © 2018 IEEE, Vol.6, 2018, pp.4027-4041.
6. Ільченко М.Ю. Низькоорбітальна супутникова система інтернету речей на базі розподіленого супутника / М.Ю. Ільченко, Т.М. Наритник, В.І. Присяжний, С.В. Капштик, С.А. Матівенко / Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 4, с. 57-85 / <https://doi.org/10.15407/knit2020.04.000>.