

УДК 621.396

**ПЕРСПЕКТИВНІ СЕРЕДНЬООРБІТАЛЬНІ ТА НИЗЬКООРБІТАЛЬНІ СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

КАПШТИК С.В., НАРИТНИК Т.М.

*Науково-дослідний інститут телекомунікацій НТУУ «КПІ»,  
пр.в. Індустріальний, 2, Київ, 03056, Україна  
director@mitris.com*

САЙКО В.Г.

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01033, Україна,  
vgsaiko@gmail.com*

**PERSPECTIVE MEDIUM ORBITAL AND LOW ORBITAL SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS**

KAPSCTYK S.V., NARYTNIK T.N.

*Research Institute of Telecommunications, NTUU “KPI”,  
Industrialny lane, 2, Kiev, 03056, Ukraine  
director@mitris.com*

SAIKO V.G.

*Kyiv National Taras Shevchenko University,  
Solomyanskast.,60, Kiev, 01033, Ukraine  
vgsaiko@gmail.com*

**Анотація:** Розглянуто технічні аспекти основних перспективних проектів в сегментах середньоорбітальних та низькоорбітальних систем супутникового зв'язку, а також проект вітчизняної низькоорбітальної інформаційно-телекомунікаційної системи з використанням терагерцового діапазону, яка базується на використанні платформ супутників класу мікро- і наносупутник та розподілу функціональних блоків складного корисного навантаження супутників більш високого класу за кількома функціонально пов'язаними супутниками. Запропонована система низькоорбітального супутникового зв'язку представляє угруповання низькоорбітальних космічних апаратів (LEO-система) з архітектурою «розподіленого супутника», яке включає угруповання кореневих (провідних) супутників та супутників-ретрансляторів (ведених). Кореневі супутники пов'язано між собою в кільцеву мережу високошвидкісними лініями зв'язку між супутниками. Геометричний розмір «розподіленого супутника» – область навколо кореневого супутника радіусом приблизно 1 км. Сукупність променів, які формуються супутниками-ретрансляторами, складають зону обслуговування LEO-системи. Вимоги по інтегральній зоні обслуговування LEO-системи (географічна зона обслуговування) визначають вимоги до кількості розподілених супутників в системі в цілому. У проекті для зменшення взаємних завад між угрупованням кореневих (ведучих) супутників та супутників-ретрансляторів (ведених) і відповідно мінімізації спотворень інформаційного сигналу при реалізації міжсупутникового зв'язку, дану лінію (радіоканал) створено в неліцензійному частотному (наприклад, в терагерцовому 140 ГГц) діапазоні. Крім того, він додатково дозволяє мінімізувати розмір антен такого широкопasmового каналу і спростити функціонування цих супутникових систем.

**Ключові слова:** супутникові телекомунікації, геостаціонарні супутники, низькоорбітальні системи супутникового зв'язку, супутники великої пропускної здатності, розподілений супутник, мікросупутник і наносупутник, дистанційне зондування землі, супутниковий зв'язок, системи Інтернету речей, інформаційно-телекомунікаційна система.

**Abstract:** The technical aspects of the main promising projects in the segments of medium and low-orbit satellite communication systems are considered, as well as the project of the domestic low-orbit information and telecommunications system using the terahertz range, which is based on the use of satellite platforms of the micro- and nanosatellite class and the distribution of functional blocks of complex satellite payloads more high-end on multiple functionally related satellites. The proposed system of low-orbit satellite communications represents the groupings of low-orbit

spacecraft (LEO-system) with the architecture of a "distributed satellite", which include the groupings of the root (leading) satellites and satellite repeaters (slaves). Root satellites are interconnected in a ring network by high-speed links between the satellites. The geometric size of the "distributed satellite" is the area around the root satellite with a radius of about 1 km. The combination of beams, which are formed by the repeater satellites, make up the service area of the LEO system. The requirements for the integrated service area of the LEO system (geographical service area) determine the requirements for the number of distributed satellites in the system as a whole. In the proposed system to reduce mutual interference between the grouping of the root (leading) satellites and repeater satellites (slaves) and, accordingly, minimizing distortions of the information signal when implementing inter-satellite communication, this line (radio channel) was created in an unlicensed frequency (e.g., in the terahertz 140 GHz) range. In addition, it additionally allows you to minimize the size of the antennas of such a broadband channel and simplify the operation of these satellite systems..

**Keywords:** satellite telecommunications, geostationary satellites, low-orbit satellite communication systems, high-capacity satellites, distributed satellite, micro- and nano-satellite, Earth remote sensing, satellite communication, the Internet of Things, information and telecommunication system.

**Аннотация:** Рассмотрены технические аспекты основных перспективных проектов в сегментах средне- и низкоорбитальных систем спутниковой связи, а также проект отечественной низкоорбитальной информационно-телекоммуникационной системы с использованием терагерцового диапазона, которая базируется на использовании платформ спутников класса микро- и наноспутник и распределения функциональных блоков сложной полезной нагрузки спутников более высокого класса по нескольким функционально связанным спутникам. Предложенная система низкоорбитальной спутниковой связи, представляет группировки низкоорбитальных космических аппаратов (LEO-система) с архитектурой «распределённого спутника», которые включают группировки корневых (ведущих) спутников и спутников-ретрансляторов (ведомых). Корневые спутники связаны между собой в кольцевую сеть высокоскоростными линиями связи между спутниками. Геометрический размер «распределённого спутника» - область вокруг корневого спутника радиусом около 1 км. Совокупность лучей, которые формируются спутниками-ретрансляторами, составляют зону обслуживания LEO-системы. Требования по интегральной зоне обслуживания LEO-системы (географическая зона обслуживания) определяют требования к количеству распределённых спутников в системе в целом. В предлагаемой системе для уменьшения взаимных помех между группировкой корневых (ведущих) спутников и спутников-ретрансляторов (ведомых) и соответственно минимизации искажений информационного сигнала при реализации межспутниковой связи, данную линию (радиоканал) создано в нелицензионный частотном (например, в терагерцевом 140 ГГц) диапазоне. Кроме того, он дополнительно позволяет минимизировать размер антенн такого широкополосного канала и упростить функционирование этих спутниковых систем.

**Ключевые слова:** спутниковые телекоммуникации, геостационарные спутники, низкоорбитальные системы спутниковой связи, спутники большой пропускной способности, распределённый спутник, микро- и наноспутник, дистанционное зондирование Земли, спутниковая связь, системы Интернета Вещей, информационно-телекоммуникационная система.

## ВСТУП

Згідно з довгостроковими прогнозами маркетингових компаній в найближчі 10 років в секторі супутникових інформаційних систем драйвером розвитку стають малі супутники і космічні низькоорбітальні системи з цими супутниками. Зростаючий інтерес до використання таких орбіт зумовлений багатьма чинниками. До них відносяться:

- очікуване зростання попиту на вільну пропускну здатність, яке зумовлене впровадженням нових технологій мобільного зв'язку та високошвидкісного бездротового Інтернет-доступу 4G та 5G;
- впровадження в найближче десятиріччя систем Інтернету речей (Internet of Things – IoT) та їх сегментно-орієнтованих різновидів, як то Інтернет речей для застосування в промисловості (Industrial Internet of Things – IIoT) та Інтернет речей для віддалених районів (Remote Internet of Things – RIoT), що обумовлює подальший розвиток телекомунікаційних систем для передачі зростаючого графіка цих послуг;
- завдання дослідження Землі з космосу для цілей наукових досліджень і економічного використання природних ресурсів, контролю розвитку і функціонування інфраструктурних проектів, функціонування територіально розподілених промислових виробництв, транспортної інфраструктури всіх видів.

Низькоорбітальна система супутникового зв'язку, разом з необхідністю використання значної кількості супутників для організації безперервного зв'язку і необхідністю маршрутизації інформаційних потоків між абонентами, має ряд переваг: невелика відстань до супутників

від Землі і, отже, до абонентів, і пов'язані із цим мінімальні затримки сигналів, що покращує якість голосового зв'язку, Internet і інтерактивного телебачення (відео-переговори, відео-конференції); знижується потужність і вага корисного навантаження - бортової приймально-передавальної апаратури і, як наслідок, вимоги до потужності бортових систем електроживлення супутників, а також апаратури абонентів. Розташування орбіт системи супутникового зв'язку нижче радіаційних поясів Землі (нижче 1400–1500 км) забезпечує захист супутників і радіоелектронної апаратури від жорсткого іонізуючого сонячного випромінювання, що збільшує їх термін активного існування, супутники доставляються на низьку більш «дешеву» орбіту, що вимагає менших витрат на їх виведення в космос.

*Метою цієї статті є розгляд технічних аспектів основних проектів в сегментах перспективних середньо- та низькоорбітальних систем супутникового зв'язку невійськового призначення та систем і засобів забезпечення їх тривалої експлуатації на орбіті.*

### НИЗЬКООРБІТАЛЬНА СИСТЕМА СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ OneWeb

Низькоорбітальна система супутникового зв'язку (LEO-система) OneWeb відноситься до класу супутникових систем зв'язку великої пропускної здатності. Пропускна здатність кожного супутника становить до 7,5 Гбіт/с. Система призначена для надання кінцевим споживачам послуг широкопasmового доступу до мережі Internet із швидкістю передачі інформації до 50 Мбіт/с та малим часом затримки менше 50 мс. Мала затримка зумовлена використанням низької кругової навколоземної орбіти (LEO – LowEarthOrbit, англ.) (див. Рисунок 1) висотою 1200 км, для якої затримка на розповсюдження сигналу становить від 4 мс (у випадку кута місця 90°) до 9,2 мс (для кута місця 15°). Мала затримка передавання інформації суттєво розширює потенційний ринок попиту на послуги системи і дозволяє надавати послуги в сегменті ринку Інтернету Речей (IoT – InternetOfThings).

На рисунку показано значення затримки на розповсюдження та затримки із врахуванням затримки в ретрансляторі супутника та типових схем надання послуги в системі. Космічний сегмент системи OneWeb складається з 720 супутників. Супутники розміщені в 18 орбітальних площинах, в кожній з яких знаходиться по 32 супутники (рисунок 2). Висота орбіти становить 1200 км, нахилення орбіти 87,9°. В кожній орбітальній площині додатково будуть розміщені резервні супутники. Така побудова орбітального угруповання забезпечує повне покриття поверхні Землі, на більшій частині якого мінімальний кут місця для антени земної станції – терміналу кінцевого споживача становитиме не менше 60°. Загальна кількість супутників в системі OneWeb до цього часу дискутується і за окремими даними має зрости до 2 тис. супутників.



Рисунок 1 – Затримка передачі інформації для систем супутникового зв'язку: низькоорбітальні системи (LEO), середньоорбітальні системи (MEO) та геостационарні (GEO)



Рисунок 2 – Орбітальне угруповання системи OneWeb.

Система OneWeb надає послуги високошвидкісного доступу до мережі Internet кінцевим споживачам із використанням супутників на орбіті та станцій спряження, які розташовані на поверхні Землі. Тракт надання послуг включає (див. рисунок 3): станцію спряження, яка знаходиться на поверхні Землі і підключена до високошвидкісної наземної мережі Internet, супутник-ретранслятор на орбіті, термінал користувача.



Рисунок 3 – Структура надання послуг доступу до мережі Internet в системі OneWeb

Супутник OneWeb відноситься до класу супутників із корисним навантаженням «прозорого» типу. Супутник OneWeb (рисунок 4) використовує радіолінії до терміналів користувачів в смузі частот Ку-діапазону (10,7...12,75/14,0...14,5 ГГц) та радіолінії до станцій спряження в Ка-діапазоні (17,8...20,2/27,5...30 ГГц). Пропускна здатність одного супутника становить 7,5 Гбіт/с.

Для формування променів до станції спряження супутник має дві параболічні антени Ка-діапазону, які відстежують напрямок на станцію спряження (див. рисунок 4). Зв'язок із станцією спряження підтримує одна антена, друга антена наводиться на іншу станцію спряження, в зону дії якої входить супутник в процесі його руху по орбіті. Після встановлення зв'язку реалізується процедура м'якого переходу до іншої станції спряження. Підсилення ВЧ сигналу в Ка-діапазоні здійснюється за допомогою 4 твердотільних підсилювачів.



Рисунок 4 – Супутник OneWeb. Зовнішній вигляд

Кожен супутник формуватиме прямокутну зону обслуговування користувачів, розмір якої на поверхні Землі становитиме  $1080 \times 1080$  км. Зона обслуговування формується за допомогою 16 вузьких променів користувачів еліптичної форми, витягнутих в напрямку «схід-захід» (див. рисунок 5). Пропускна здатність одного променя становить 400 Мбіт/с. Кожен промінь користувачів формує один канал. Підсилення ВЧ сигналів в каналах корисного навантаження супутника OneWeb здійснюється із застосуванням 16 твердотільних підсилювачів.



Рисунок 5 – Зона обслуговування супутника OneWeb. Промені користувачів в Ku-діапазоні

В прямому каналі (від станції спряження до терміналу користувача) корисне навантаження здійснює перенесення смуги частот кожного каналу з діапазону Ка в діапазон Ку. В діапазоні Ка передається одночасно 16 каналів смугою частот 250 МГц кожен, які в корисному навантаженні супутника OneWeb переносяться в Ку-діапазон. В зворотному напрямку кожен канал смугою частот 125 МГц променю користувачів переноситься в Ка-діапазон і передається в напрямку станції спряження.

Для забезпечення одночасної роботи великої кількості терміналів користувачів в прямому каналі використовується одночастотний режим роботи із часовим ущільненням (TDMA) із шириною спектру сигналу 250 МГц. В зворотному каналі кожен термінал використовує одночастотний режим із часовим ущільненням (SC-TDMA/FDMA) із шириною спектру від 1,25 МГц до 20 МГц.

З метою запобігання створенню неприйнятних перешкод геостационарним системам супутникового зв'язку та потерпання в результаті впливу перешкод від геостационарних систем супутникового зв'язку в системі OneWeb застосована технологія «динамічного тангажу» (Progressive Pitch Technology) (рисунок 6). Суть технології «динамічного тангажу» полягає в повороті супутника на кут не менше  $10^\circ$  від напрямку надір по мірі його наближення до екватору. Маневр повороту починається при проходженні супутником широт  $50^\circ$  в напрямку екватора і досягає максимального значення при проходженні широт  $30^\circ$ . При проходженні екватору супутник розвертається в протилежному напрямку і по мірі наближення до широти  $50^\circ$  поступово зменшує відхилення від напрямку надір.



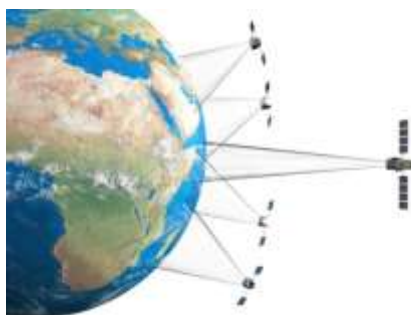


Рисунок 6. Технологія «динамічного тангажу» (ProgressivePitchTechnology) в системі OneWeb

Згідно даним засобів масової інформації розгортання першої черги орбітального угруповання системи OneWeb заплановано на 2018 рік.

### НИЗЬКООРБІТАЛЬНА СИСТЕМА СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ Iridium-NEXT

Низькоорбітальна система супутникового зв'язку Iridium-NEXT є другим поколінням низькоорбітальної системи персонального мобільного супутникового зв'язку Iridium, яка була створена та введена в експлуатацію в 1998 році.

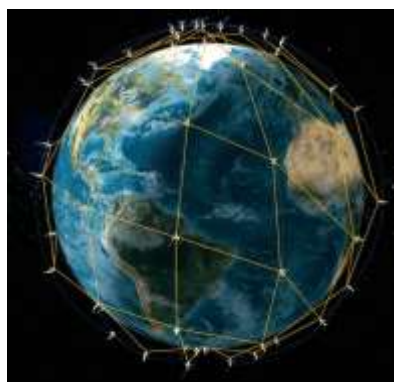


Рисунок 7 – Архітектура орбітального угруповання системи Iridium-NEXT

Система Iridium-NEXT буде використовувати таку ж саму архітектуру орбітального угруповання (див. рисунок 7): низька навколосемна кругова орбіта висотою 780 км із нахиленням  $86,4^\circ$  та орбітальним періодом 100,5 хв. Орбітальне угруповання складається з 66 активних супутників, які розташовані в 6 орбітальних площинах. Площини від 2-ї до 5-ї повернуті в просторі відносно одна одної на кут  $31,6^\circ$ , 1-а та 6-та площини повернуті на кут  $22^\circ$ .

ВL-діапазоні кожен супутник формує 48 приймально-передавальних променів; в Ка-діапазоні супутник формує два перенацілювані промені для зв'язку із станцією спряження та чотири промені міжсупутникового зв'язку.

Структура надання послуг в системі Iridium-NEXT передбачає (див. рисунок 8) використання земних станцій спряженні (Iridium Gateway), які забезпечують з'єднання із наземною мережею зв'язку та передачі даних. Шлюзова станція по фідерній лінії (Ка-діапазон, 29,1...29,3/19,4...19,6 ГГц) з'єднується із супутником та забезпечує його супроводження в зоні радіовидимості шлюзової станції. Кінцевий споживач за допомогою терміналу з'єднується із супутником (L-діапазон, 1616...1626,5 МГц). Корисне навантаження супутника здійснює комутацію викликів і в залежності від місця знаходження абонента здійснює комутацію в інший промінь, до шлюзової станції або, в разі відсутності зв'язку із шлюзовою станцією, передає виклик по лінії міжсупутникового зв'язку (Ка-діапазон, 23,1...23,38 ГГц) до сусіднього супутника для його трансляції до абонента, до шлюзової станції або до іншого супутника.

Кожен супутник підтримує зв'язок по лінії «супутник-супутник» (міжсупутникова лінія) з чотирма сусідніми супутниками: двома супутниками у своїй орбітальній площині та двома найближчими супутниками в двох сусідніх площинах.



Рисунок 8 – Структура надання послуг в системі Iridium-NEXT

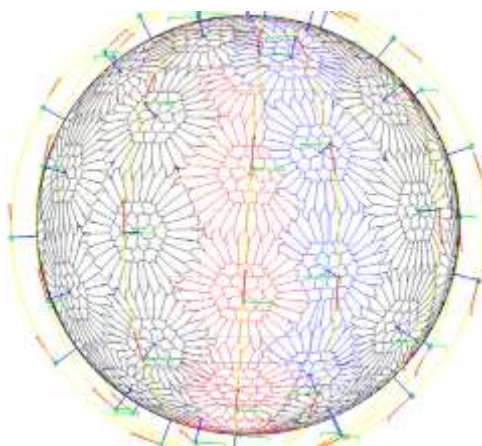


Рисунок 9. Перетинання на поверхні Землі зон обслуговування та променів L-діапазону сусідніх супутників системи Iridium-NEXT

Корисне навантаження супутника Iridium-NEXT відноситься до регенеративного типу і забезпечує комутацію та маршрутизацію викликів і трафіку. Для формування 48 променів користувачів (див. рисунок 9) супутник Iridium-NEXT (див. рисунок 10) обладнаний фазовою антенною решіткою (MainMissionAntennaL-band), яка знаходиться на нижній поверхні супутника (поверхня, яка постійно обернена до Землі).



Рисунок 10 – Супутник Iridium-NEXT. Зовнішній вигляд та розміщення обладнання

Супутникова лінія між супутником Iridium-NEXT та терміналом користувача забезпечує передавання даних на швидкостях: 2,4 кбіт/с для передавання голосової інформації, до 64 кбіт/с для передачі даних та коротких повідомлень на ручні пристрої (HandsetDataService&ShortBurstData), від 512 кбіт/с до 1,5 Мбіт/с для передачі даних на термінали IridiumOpenPortTerminal. Усі ці послуги надаються в L-діапазоні. На додаток супутники Iridium-NEXT надають послуги передачі даних в Ka-діапазоні на переносні та мобільні пристрої зі швидкістю до 8 Мбіт/с.

Для забезпечення зв'язку із станціями спряження та міжсупутникового зв'язку супутник Iridium-NEXT обладнаний перенацілюваними параболічними антенами Ka-діапазоні, які розташовані на нижній (оберненій до Землі) поверхні супутника.

Відмінністю супутників Iridium-NEXT є встановлення додаткового гостьового корисного навантаження. Гостьове корисне навантаження супутників Iridium-NEXT виконує функції моніторингу атмосфери, радіовисотоміру поверхні моря, хвиль та льоду, радіометру для глобальних вимірювань випромінювання Землі, отримання мультиспектральних зображень для моніторингу навколишнього середовища, систем виявлення пожеж, спеціальних датчиків для спостереження за полярними льодами або напрямками руху хмар. Дані від корисного навантаження передаються до безпосередньо центрів обробки даних або по міжсупутникових лініях в режимі близькому до реального часу.

Гостьове корисне навантаження супутників Iridium-NEXT також включає приймачі ADS-B (AutomaticDependentSurveillance-Broadcast), призначені для прийому сигналів від передавачів ADS-B, які встановлені на усіх комерційних літаках і здійснюють періодичну передачу інформації транспондера літака Mode-S на частоті 1090 МГц (див. рисунок 11). Ця передача містить інформацію про ідентифікаційний номер літака (ID), поточні координати, висоту та місце призначення. Інформація передається до центрів контролю авіаційним рухом. Передача здійснюється в загальному потоці інформації основного корисного навантаження супутників Iridium-NEXT.

Гостьове корисне навантаження супутників Iridium-NEXT включає також обладнання системи автоматичної ідентифікації (AutomaticIdentificationSystem) морських суден в акваторії Північної Атлантики (див. рисунок 12). Ця система працює в частотному діапазоні VHF і забезпечує автоматичний обмін інформацією про ідентифікацію судна, його координати (місцезнаходження), курс та швидкість, що дозволяє здійснювати моніторинг руху морських суден та запобігати виникненню непередбачуваних ситуацій. Система дозволяє доставляти інформацію до диспетчерських центрів з мінімальною затримкою практично в реальному часі. Оператором системи моніторингу є компанія Harris Corp.



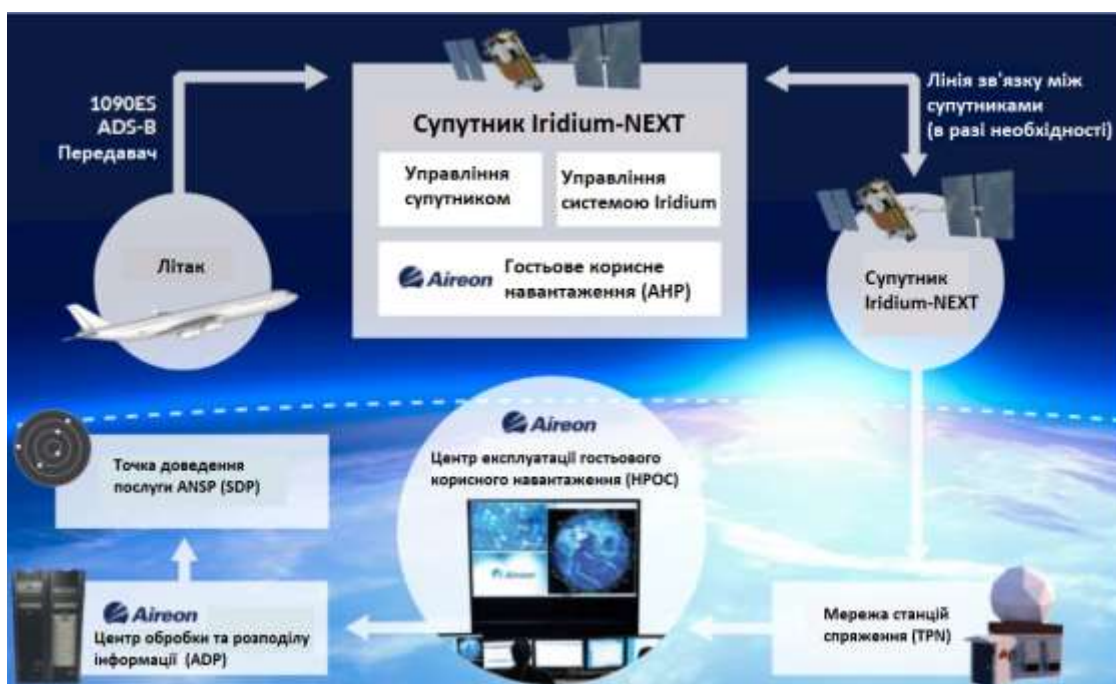


Рисунок 11 – Взаємодія системи Iridium-NEXT із системою контролю аерорухом



Рисунок 12. Система автоматичної ідентифікації морських суден в Північній Атлантиці

### СИСТЕМА STARLINK (SpaceX)

Супутникова система на негеостационарній орбіті StarLink (SpaceX non-geostationary orbit satellite system) призначена для надання широкого спектру телекомунікаційних та радіомовних послуг для домогосподарств, комерційних, гуманітарних, урядових та промислових користувачів по всьому світу.

Таблиця 1 – Параметри орбітального угруповання системи StarLink

Орбітальне угруповання системи StarLink					
Параметр	Перший етап розгортання (1600 супутників)	Другий етап розгортання (2825 супутників)			
Кількість орбітальних площин	32	32	8	5	6
Кількість супутників в орбітальній площині	50	50	50	75	75
Висота орбіти	1150 км	1110 км	1130 км	1275 км	1325 км
Нахилення орбіти	53°	53,8°	74°	81°	70°

Система StarLink складається з 4425 супутників (до яких будуть додані резервні супутники), які будуть розміщені в 83 орбітальних площинах висотою від 1110 до 1325 км.

Орбітальне угруповання розраховано для забезпечення на усій поверхні Земля мінімального кута місця для антен терміналів користувачів більше  $40^\circ$ .

Система StarLink використовує частотний ресурс в двох частотних діапазонах ( $\downarrow/\uparrow$ ):

- на ланці супутник-термінал користувача: 14,0...14,5/10,7...12,7 ГГц;
- на ланці супутник-станція спряження: 27,5...29,1, 29,5...30,0/17,8...18, 6,18, 8...19,3 ГГц;
- командно-телеметрична радіолінія: 13,85...14,0/12,15...12,25, 18,55...18,6 ГГц.

В системі StarLink широко застосовуються фазовані антенні решітки:

- у складі корисного навантаження супутника для формування перенацілюваних незалежно керованих променів користувачів;
- у складі терміналів користувачів для забезпечення прийому/передачі сигналу по променю користувачів та відстеження руху супутника;
- у складі станцій спряження для забезпечення відстеження руху супутника.

Усі промені користувачів супутника StarLink керовані та орієнтуються незалежно в по усій видимій частині поверхні Землі. Але зона радіовидимості терміналу користувача обмежена кутом місця  $40^\circ$  (див. рисунок 13), тому зона видимості одного супутника на орбіті висотою 1150 км визначена кутом  $40,46^\circ$  від напрямку надір і охоплює територію на поверхні Землі у формі кола площею 3,5 млн. км<sup>2</sup> і радіусом 1060 км.

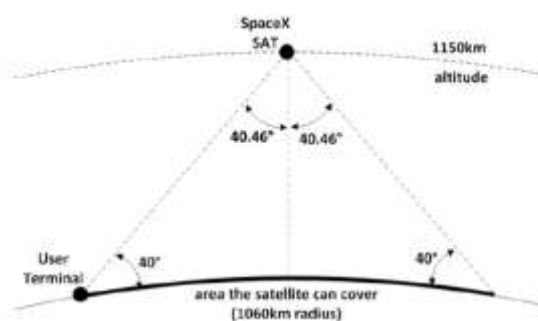


Рисунок 13 – Діапазон зони обслуговування керованих променів Ku-діапазону

По мірі віддалення напрямку орієнтації променю від напрямку надір ширина променю постійно збільшується (промінь розширюється) в площині, яка сформована напрямком, що перпендикулярний площині фазованої антенної решітки та напрямку наведення променю.

### НИЗЬКООРБІТАЛЬНА СИСТЕМА СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ LeoSat

Низькоорбітальна система супутникового зв'язку LeoSat призначена для надання послуг високошвидкісної передачі даних та ширококутового доступу до мережі Internet для користувачів із стаціонарними та пересувними (швидко розгортвані) земними терміналами. Система дозволяє надавати кінцевим споживачам послугу високошвидкісного зв'язку в Ka-діапазоні із швидкістю до 1,2 Гбіт/с. До переваг низькоорбітальної системи супутникового зв'язку LeoSat відноситься мала затримка передачі інформації, що зумовлено використанням низької навколосемної орбіти.

Орбітальне угруповання системи LeoSat на першому етапі буде складатись із 78 робочих супутників та 6 резервних супутників, які розташовані на низькій полярній навколосемній круговій орбіті (LowEarthOrbit–LEO) висотою приблизно 1400 км. Супутники будуть розташовані в 6 орбітальних площинах по 13 супутників в кожній. Додатково в кожній орбітальній площині буде розташовано один резервний супутник. На рисунок 14 показана архітектура орбітального угруповання системи LeoSat.



Рисунок 14 – Архітектура орбітального угруповання системи LeoSat

В подальшому, на другому етапі розгортання системи, склад орбітального угруповання планується збільшити до 108 працюючих супутників, а кількість супутників в кожній орбітальній площині буде доведена до 18.

Орбітальне угруповання системи LeoSat складається із супутників, які відносяться до класу супутників великої пропускної здатності (High-Throughput Satellites – HTS). Відмінністю системи LeoSat є створення в космосі магістральної оптичної мережі на базі оптичних ліній зв'язку між супутниками (Optical Intersatellite Links – OISL). Для забезпечення зв'язку із земними станціями: станції спряження та термінали користувачів – супутники LeoSat використовують спрямовані керовані промені Ка-діапазону. Корисне навантаження супутників LeoSat забезпечує обробку прийнятої інформації та її маршрутизацію в напрямку інших променів, або OISL. Таким чином, здатність корисного навантаження супутників LeoSat здійснювати маршрутизацію інформаційних потоків та використання оптичних ліній зв'язку між супутниками дозволяє орбітальному угрупованню системи LeoSat сформувати в космосі повнозв'язну магістральну мережу передачі даних.

Наземна інфраструктура для надання послуг системи LeoSat включає станції спряження та термінали користувачів. Термінали користувачів використовують 1,2 м антени, або антени більших розмірів в залежності від умов розповсюдження радіохвиль та вимог послуг. Станції спряження призначені для забезпечення з'єднання із наземною первинною магістральною мережею зв'язку та магістральною мережею Internet. Станції спряження використовують 2,4 м антени або антени більшого розміру залежно від умов розповсюдження радіохвиль.

Управління експлуатацією системи LeoSat буде здійснюватися з основного та резервного центрів управління польотом. Резервний центр управління польотом (ЦУП) буде здатний повністю дублювати функції основного ЦУП. Управління польотом супутників буде здійснюватися за допомогою станцій спряження, які будуть підключені до ЦУП за допомогою віртуальних приватних мереж (Virtual Private Network – VPN).

На рисунок 15 наведено логічну структуру надання послуг кінцевим споживачам в системі LeoSat.

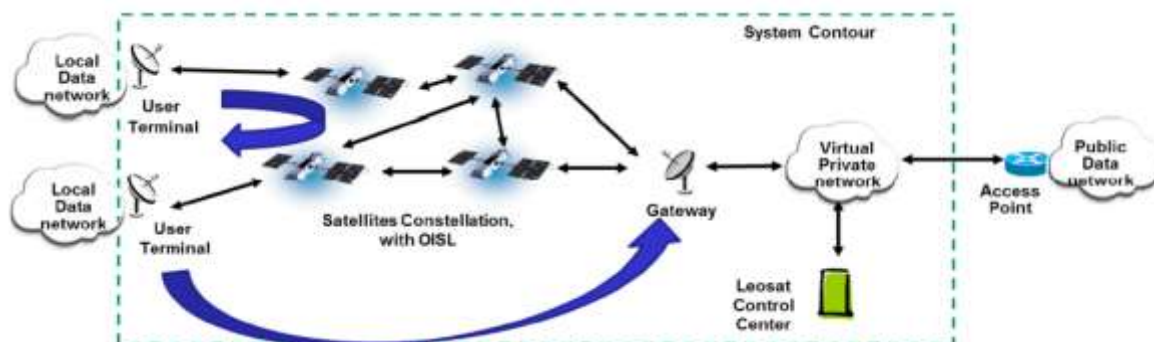


Рисунок 15 – Логічна схема надання послуг кінцевим споживачам в системі LeoSat

Земні станції – термінали користувачів (User Terminal) під'єднані до локальних мереж передачі даних (Local Data Network) користувачів через стандартний інтерфейс локальної мережі. Через радіо інтерфейс термінали користувачів з'єднуються із супутником LeoSat. Кожен супутник LeoSat формує в Ка-діапазоні 12 незалежних керованих променів з діаграмою спрямованості круглої форми різної ширини. Залежно від призначення променю, кожен промінь здатний передавати один або декілька каналів із смугою пропускання 500 МГц в обох напрямках «земля-супутник» та «супутник-земля». Супутник здійснює незалежний прийом інформації в кожному промені Ка-діапазону від земних станцій (термінали користувачів та станції спряження) та в кожній оптичній лінії зв'язку між супутниками. Корисне навантаження супутника здійснює демодуляцію прийнятого сигналу та відновлення кадрів інформації з двійкового потоку та забезпечує маршрутизацію отриманого кадру на підставі заголовку кадру інформаційної згідно таблиці маршрутизації системи LeoSat до терміналу іншого променю супутника LeoSat для передачі до іншого терміналу користувача чи земної станції спряження, або до терміналу оптичного каналу для передачі по оптичній лінії зв'язку між супутниками OISL в магістральній мережі космічного базування.

Радіо інтерфейс між земними станціями та супутниками LeoSat базується на стандарті цифрового супутникового мовлення другого покоління DVB-S2.В ланці «супутник-земна станція» передача здійснюється в режимі множинного доступу із часовим ущільненням (Time Division Multiplexing - TDM). Кожна земна станція, яка знаходиться в межах зони обслуговування променю, приймає та обробляє увесь груповий потік, який містить усі кадри групового потоку інформації, і який передається на одній несучій. Земна станція виділяє адресовані їй кадри за ознакою адреси в заголовку кадру.

В ланці «земна станція – супутник» виділена смуга частот поділена на окремі смуги шириною від 50 до 250 МГц. Кожній земній станції (терміналу) виділяється окрема смуга частот. В межах виділеної смуги земна станція передає інформацію в режимі один канал на несучу (Single Channel per Carrier – SCPC).

Термінал користувача може використовувати смугу частот до 500 МГц в обох напрямках передачі і забезпечувати прийом/передачі інформації зі швидкістю до 1,2 Гбіт/с. Станція спряження забезпечує обробку до чотирьох каналів зі смугою частот 500 МГц кожен в обох напрямках в суміжних та рознесених смугах частот.

Для досягнення оптимальної пропускну здатності в залежності від наявного енергетичного запасу залежно від погодних умов та умов розповсюдження радіохвиль для кожної земної станції (термінал користувача та станція спряження) в системі LeoSat застосовується адаптивне кодування та модуляція (Adaptive Coding and Modulation–ACM) в поєднанні із управлінням потужністю. Режим ACM дозволяє змінювати параметри модуляції та швидкість кодування (яка визначає здатність коду корегувати похибки) від кадру до кадру в груповому потоці.

Розподіл на призначення смуг частот для кожного променю і кожної земної станції здійснює програмне забезпечення управління частотним ресурсом.

Система LeoSat буде використовувати супутникові мережі, заявлені в Радіобюро Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ-Р) Адміністрацією Зв'язку Франції: MCSAT-2 LEO-2. В таблиці 2 наведено дані щодо смуг частот, які будуть використано системою LeoSat.

Корисне навантаження кожного супутника LeoSat формує 12 незалежних керованих променів Ка-діапазону, з яких 2 промені є променями великої пропускну здатності (High Capacity Beam); і 10 звичайних променів (Regular Beam) вузьких (із шириною променю  $4,1^\circ$ ) та широких (із шириною променю  $5^\circ$ ). Промені великої пропускну здатності призначені для зв'язку із терміналами користувачів та станціями спряження. Промені забезпечують одночасну роботу з двома поляризаціями: правостороння та лівостороння кругова, і передавати до чотирьох каналів зі смугою пропускання 500 МГц кожен. Звичайний промінь призначений виключно для роботи із терміналами користувачів, використовує одну з поляризацій: право-

сторонню, або лівосторонню кругову, і передає один канал зі смугою пропускання 500 МГц.

Таблиця 2 – Смуги частот, які використовуються системою LeoSat

Тип лінії та напрямок передачі	Діапазони частот
Земна станція – супутник (службова інформація та лінія «до верху» для інформації станції спряження)	27,5 ÷ 28,35 ГГц
	28,35 ÷ 28,6 ГГц
	28,6 ÷ 29,1 ГГц
	29,5 ÷ 30,0 ГГц
Супутник – земна станція(службова інформація та лінія «до низу» інформації станції спряження)	17,8 ÷ 18,6 ГГц
	18,8 ÷ 19,3 ГГц
	19,3 ÷ 19,7 ГГц
	19,7 ÷ 20,2 ГГц

Чотири оптичних лінії зв'язку між супутниками спрямовані на сусідні супутники: два сусідніх супутники в спільній орбітальній площині в напрямку на північ та південь від супутника, та по одному найближчому супутнику в двох сусідніх орбітальних площинах, які розташовані на схід на захід від супутника. Кожна оптична лінія зв'язку забезпечує двосторонній обмін інформацією.

На рисунку16 наведено структурну схему корисного навантаження супутника LeoSat.

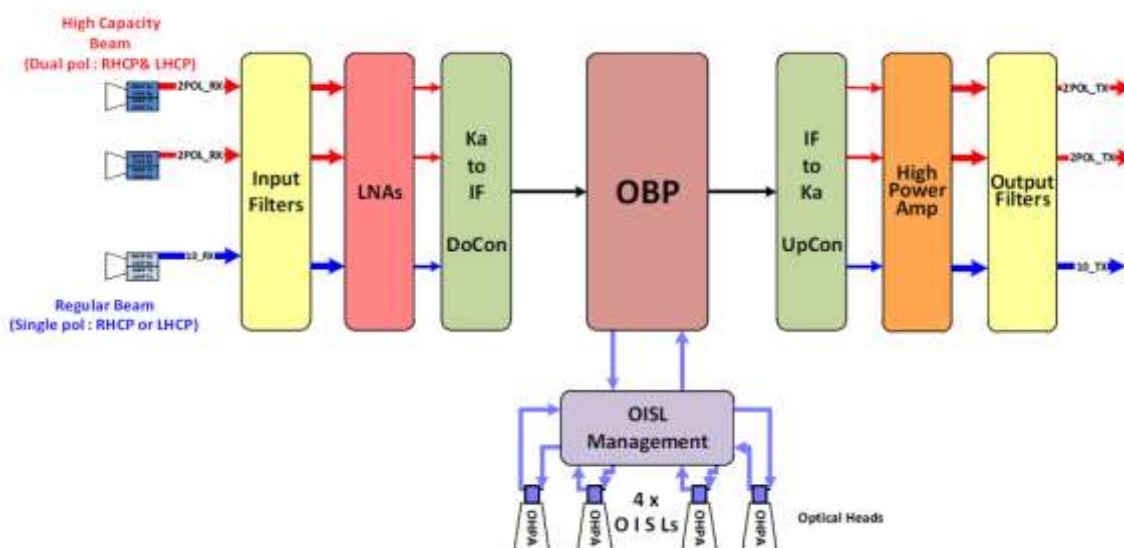


Рисунок 16 – Структурна схема корисного навантаження супутника LeoSat

Для здійснення функцій обробки та маршрутизації інформації на борту супутника корисне навантаження супутників LeoSat містить такі елементи (див. рисунок 16):

- приймальні промені звичайні (Regular Beam) та великої пропускну здатності (HighCapacityBeam), які підключені до входних фільтрів (Input Filters) та підсилювачів із малим рівнем шуму (LNA);
- понижуючі конвертори з Ка-діапазону до смуги частот проміжної частоти (KatoIFDoCon);
- бортовий процесор (OBP);
- конвертор для перенесення сигналу з проміжної частоти до Ка-діапазону (IFtoKaUpCon);
- високочастотні підсилювачі потужності (High Power Amp) та вихідні фільтри (OutputFilters), які підключені до передавальних променів;



– система управління оптичними лініями зв'язку між супутниками (OISLManagement), до якої підключені чотири приймально-передавальні оптичних головки (OpticalHeads).

Розробником супутників системи LeoSat французька компанія Thales Alenia Space. Супутники LeoSat створені на базі платформи ELITEBUS™2000, яка є модернізацією платформи ELITEBUS™1000, що використовувалась для супутників низькоорбітальних систем супутникового зв'язку Global Star, O3b та IridiumNEXT. На рисунку 17 наведено зовнішній вигляд супутника LeoSat в складеному (стартовому) стані (рисунок 17.а) та розгорнутому (робочому) стані (рисунок 17.б).

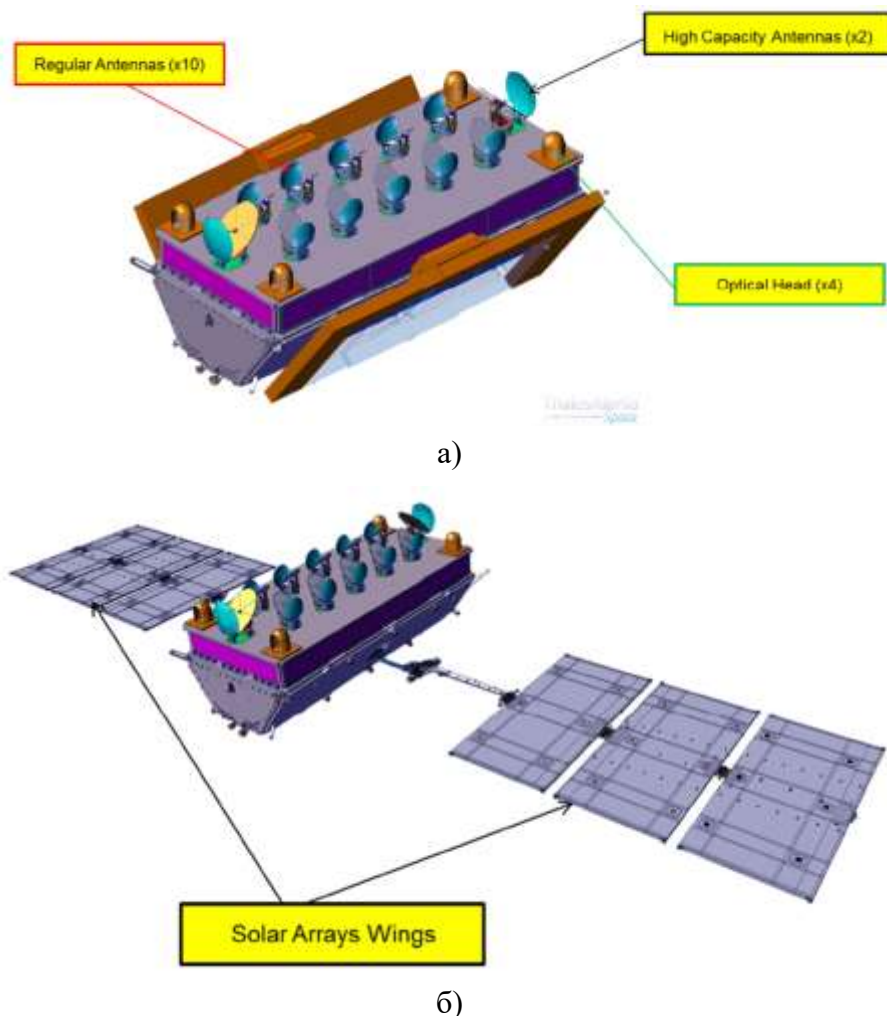


Рисунок 17 – Зовнішній вигляд супутника LeoSat: а) в складеному стані; б) в розгорнутому стані.

Платформа ELITEBUS™ 2000 містить в своєму складі наступні системи:

- система енергоживлення із сонячними панелями та бортовою батареєю;
- систему управління орбітальним польотом та підтримки орієнтації супутника, до складу якої входять: датчики, гіроскопічні приводи-маховики, PS-приймач, бортовий комп'ютер системи управління;
- рушійна установка із стаціонарно-плазмовими двигунами (двигуни Холла);
- система забезпечення теплового режиму;
- силова конструкція з боксами для розміщення корисного навантаження.

На поверхні супутника, яка постійно обернена до Землі, розміщені 10 антен звичайних керуваний променів Ка-діапазону із вузьким та широким променями (Regular Antennas), 2 антени керуваний променів великої пропускної здатності Ка-діапазону (High Capacity An-

tennas), та 4 оптичних керованих головки ліній оптичного зв'язку між супутниками (Optical Head).

### ВІТЧИЗНЯНИЙ ПРОЕКТ СИСТЕМИ НИЗЬКООРБІТАЛЬНОГО СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Потреба надання інформації по каналу зв'язку ведучого супутника абонентам, що дислоковані на території покритій веденим супутником, координати якого можуть бути в сусідній точці, виникає при необхідності надання інформації таким абонентам. Це також приводить до розширення кількості обслуговуваних абонентів джерелом інформації, підключеного до каналу ведучого супутника.

Для практичної реалізації даного підходу відоме технічне рішення [1] передбачає оснащення низькоорбітального космічного апарату активною фазованою антенною решіткою і приймачем сигналу та супутниковою системою позиціонування, і, угрупованням геостаціонарних супутників-ретрансляторів системи зв'язку. Причому кожен з геостаціонарних супутників-ретрансляторів системи зв'язку забезпечує формування глобального променя, що покриває всю видиму підсупутникову область, і забезпечує здійснення такого способу супутникового зв'язку.

За допомогою апаратури радіонавігації і бортової системи навігації та управління рухом проводиться автономна «посадка» веденого супутника на задану орбітальну позицію і утримання його на цій позиції протягом заданого часу або, як максимум, протягом терміну активного існування. Управління веденим супутником і контроль над його технічним станом проводять за допомогою ведучого супутника. Таке технічне рішення дозволяє дещо розширити територію обслуговування системою та реалізувати прийнятну якість передачі інформації. Але для нормального функціонування створеної системи радіонавігації і передачі інформації, що базується на апаратурі радіонавігації, необхідно створити і використовувати канал передачі даних або канал зв'язку. Такий канал при використанні стандартної частоти в супутниковій системі при обслуговуванні міжсупутникового зв'язку може впливати на інші канали зв'язку і спотворювати сигнал та відповідно впливати на якість передачі.

Також недоліком такого технічного рішення є складність реалізації ресурсу різних супутникових систем, суттєве підвищення вартості за рахунок використання значної кількості супутників, постійної потреби в визначенні взаємної дислокації супутників низькоорбітальних космічних апаратів. При цьому розширення території обслуговування із прийнятною імовірністю необхідної якості передачі суттєво зменшується оскільки в каналі передачі використовуються апарати (супутники), що постійно рухаються відносно геостаціонарного супутника із значною швидкістю і на значних відрізках території. При цьому розмір території обслуговування збільшується не досить значно через вихід низькоорбітального супутника із зони покриття геостаціонарного супутника.

З метою усунення зазначених вище недоліків і розширення зони покриття інформаційними послугами абонентів супутникового зв'язку пропонується інноваційний спосіб та система низькоорбітального супутникового зв'язку.

Запропонована система низькоорбітального супутникового зв'язку (рисунк 18), представляє угруповання низькоорбітальних космічних апаратів (LEO-система) з архітектурою «розподіленого супутника», яке включає угруповання кореневих (ведучих) супутників та супутників-ретрансляторів (ведених).

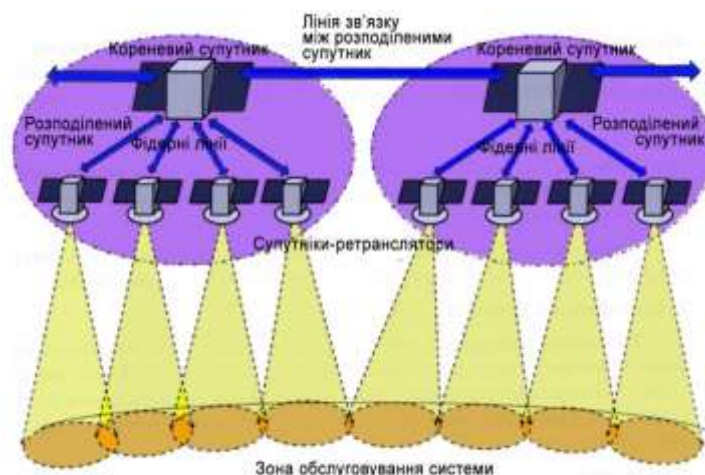


Рисунок 18 – Архітектура низькоорбітальної системи супутникового зв'язку

Навколо кожного кореневого супутника формується мікрогрупування супутників-ретрансляторів, яке називається «розподілений супутник». Функції кореневого супутника в обраній фазовій точці орбітальної площині робочої орбіти виконують міні-або мікро-супутники, а функції супутників-ретрансляторів – куб-сати. Кореневі супутники пов'язані між собою в кільцеву мережу високошвидкісними лініями зв'язку між супутниками. Геометричний розмір «розподіленого супутника» - область навколо кореневого супутника радіусом приблизно 1 км. Це означає, що куб-сати здійснюють груповий політ на відстані не більше 1 км від кореневого супутника. Космічний сегмент LEO-системи складається з декількох орбітальних площин, що мають однакову кількість розподілених супутників, однакове спосіб, і відрізняються довготою висхідного вузла. У кожній орбітальній площині розподілені супутники рівномірно розміщені з однаковою відносною істинною аномалією.

Запропонований спосіб низькоорбітального супутникового зв'язку (рисунок 19) передбачає проведення, щонайменше, одного сеансу зв'язку між, щонайменше, одним корневим (ведучим) низькоорбітальним космічним апаратом і, щонайменше, однієї наземною станцією, через мікрогрупування низькоорбітальних супутників-ретрансляторів системи зв'язку і, щонайменше, одним користувачем послуг супутникового зв'язку.

Супутник-ретранслятор формує промінь/промені користувачів з обмеженою зоною обслуговування. Сукупність променів, які формуються супутниками-ретрансляторами, складають зону обслуговування LEO-системи. Вимоги по інтегральній зоні обслуговування LEO-системи (географічна зона обслуговування) визначають вимоги до кількості розподілених супутників в системі в цілому. Супутник-ретранслятор випромінює в промені користувачів цифровий потік відповідного формату і приймає цифровий потік відповідного формату від кінцевого користувача.

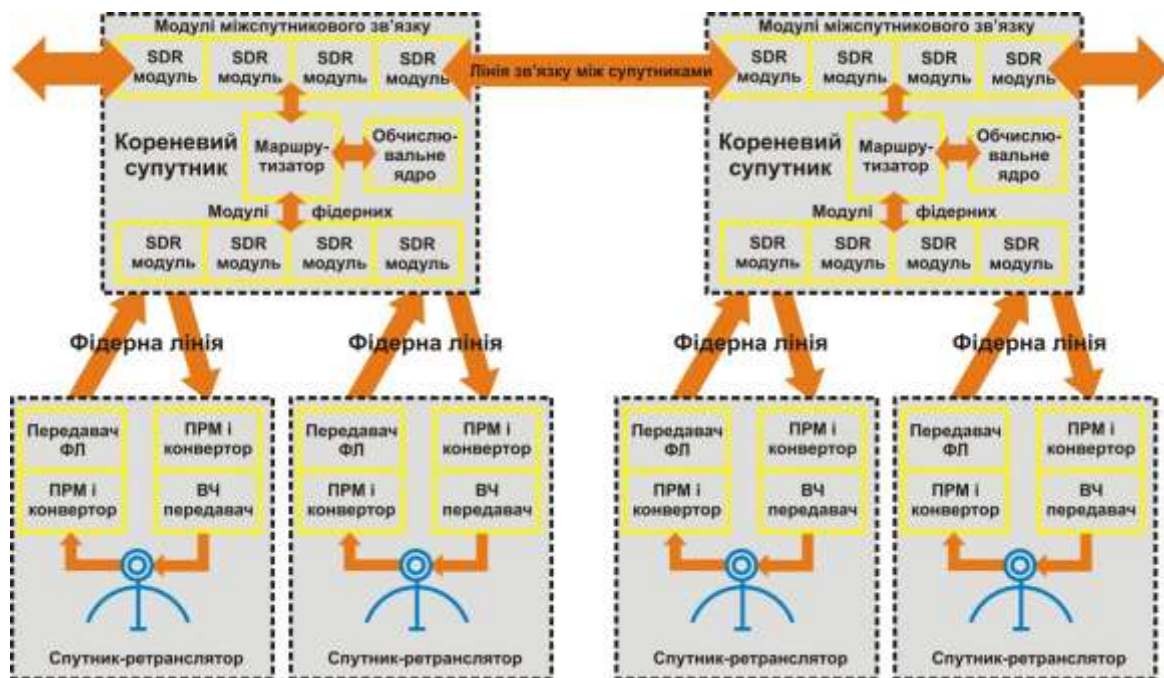


Рисунок 19 Схема функціонування «розподіленого супутника» в складі низькоорбітальної системи супутникового зв'язку

Реалізація запропонованого способу передбачає здійснення наступних дій:

1. Виконання кореневим супутником наступних функцій:

- управління функціонуванням «розподіленого супутника»;
- формування транспортних цифрових потоків для передачі в абонентських променях «розподіленого супутника», надання послуг кінцевим споживачам і передача цих потоків на супутники-ретранслятори для випромінювання в призначених для користувача променях;
- прийом від супутників-ретрансляторів інформаційних цифрових потоків від кінцевих користувачів та їх обробка;
- маршрутизація трафіку для передачі потоків інформації на земні станції сполучення (GW) в променях станцій сполучення та до сусідніх «розподіленим супутникам» в лінії зв'язку між супутниками;
- проведення вимірювань взаємного розташування кореневого супутника і супутників-ретрансляторів з визначенням похилій дальності взаємного кутового розташування, оцінка часу поширення сигналу по лінії між супутникового зв'язку;
- формування та підтримку місцевої шкали часу для синхронізації функціонування супутників в складі «розподіленого супутника»;
- управління польотом кореневого супутника, прийом від наземного комплексу управління команд управління, їх обробка, трансляція на наземний комплекс управління телеметричної інформації про стан кореневого супутника;
- прийом від наземного комплексу управління та трансляція команд управління, адресованих супутникам-ретрансляторів, прийом від супутників ретрансляторів телеметричної інформації та трансляція цієї інформації на наземний комплекс управління (при штатній експлуатації).

2. Виконання супутником-ретранслятором наступних функцій:

- формування в Ku-діапазоні променів користувачів низькоорбітальної системи для надання послуг кінцевим користувачам низькоорбітальної системи супутникового зв'язку;

- прийом від кореневого супутника транспортного цифрового потоку в відповідному форматі і передача цього потоку по променю користувачів кінцевим споживачам;
- прийом в промені користувачів інформації від кінцевих споживачів в відповідному стандарті транспортного цифрового потоку, трансляція прийнятого потоку відбитого сигналу на кореневий супутник по лінії зв'язку між супутниками в терагерцовому діапазоні;
- прийом від кореневого супутника команд управління (в режимі штатної експлуатації) і передача телеметричної інформації для трансляції на наземний комплекс управління;
- прийом команд управління від наземного комплексу управління та передача телеметричної інформації на командно-вимірювальну станцію наземного комплексу управління в аварійному режимі (при втраті зв'язку з кореневим супутником).

### 3. Формування наступних променів у LEO-системі:

- промені користувачів, призначені для забезпечення зв'язку космічного сегмента з терміналами кінцевих користувачів (User's Terminal–UT);
- промені станцій сполучення (шлюзових станцій, GateWay–GW) для забезпечення зв'язку космічного сегмента зі станціями сполучення і через них з наземною мережею зв'язку;
- промені ліній зв'язку між супутниками, призначені для забезпечення передачі інформації між розподіленими супутниками.

Схема функціонування «розподіленого супутника» в складі низькоорбітальної системи супутникового зв'язку на фіг.19 працює наступним чином.

1. Інформаційним та інтелектуальним ядром розподіленого супутника є кореневий супутник. Маршрутизатор корисного навантаження кореневого супутника забезпечує маршрутизацію інформаційних потоків відповідно до статичних і динамічних таблиць маршрутизації.

2. Розподілені супутники в LEO-системі пов'язані між собою лініями зв'язку між супутниками, які за допомогою модулів формують магістральну мережу LEO- системи. Кожен розподілений супутник пов'язаний з двома сусідніми розподіленими супутниками в своїй орбітальній площині і з двома найближчими розподіленими супутниками в двох сусідніх орбітальних площинах - по одному в кожній орбітальній площині. У складі розподіленого супутника функції підтримки лінії зв'язку між супутниками покладені на кореневий супутник, який оснащений модулями фідерних ліній та відповідно чотирма модулями програмно конфігурованого радіо (SDR модуль) і відповідними високочастотними приймально-передавачами (ВЧ модуль). Приклад реалізації ВЧ-модулів наведено в [2]. SDR-модулі забезпечують формування транспортного цифрового потоку для передачі інформації в магістральній мережі LEO-системи в променях зв'язку між супутниками. Приклад реалізації SDR-модуля наведено в [3].

У складі пропонованої системи включений окремий обчислювач завданням якого є виконання необхідних обчислень для забезпечення функціонування всіх систем в межах зони обслуговування "розподіленого супутника".

У вітчизняному проекті для зменшення взаємних завад між угрупованням корневих (ведучих) супутників та супутників-ретрансляторів (ведених), які знаходяться в радіусі приблизно 1 км, та відповідно мінімізації спотворень інформаційного сигналу при реалізації міжсупутникового зв'язку дану лінію (радіоканал) створено в неліцензійному частотному (наприклад, в терагерцовому 140 ГГц) діапазоні. Крім того, він додатково дозволяє мінімізувати розмір антен такого широкосмугового каналу і спростити функціонування цих супутникових систем. Приклад реалізації каналу терагерцового діапазону наведено в [4].



Як відомо, відношення  $P_t/P_r = (4\pi)^2 \cdot (d)^2 / G_r \cdot G_t \lambda^2$  (рівняння Фрііса) характеризує зміну рівня сигналу при проходженні його по каналу зв'язку у вільному просторі (каналу міжсупутникового зв'язку), де  $P_t$  – потужність сигналу передавальної антени;  $P_r$  – потужність сигналу, що надходить на вхід власне приймача після приймальної антени;  $G_r$  та  $G_t$  – коефіцієнти підсилення відповідно приймальної та передавальної антен;  $d_n$  – відстань між передавальною та приймальною антенами;  $\lambda$  – довжина робочої хвилі передавача.

В разі використання частотного діапазону 140 ГГц довжина хвилі складе 0,21 см і основні втрати потужності при ізотропному розповсюдженні хвиль ( $L_0$ ) виражаться як  $16\pi^2 d_n^2 / \lambda^2$ . Тому при використанні антен із коефіцієнтом підсилення 50 дБ  $P_r$  – потужність сигналу, що надходить на антену приймача сигнал на трасі  $d_n = 1$  км зменшується на величину біля 135 дБ ( $3,16 \cdot 10^{13}$  разів). Тоді при загальному підсиленні передавальної та приймальної антен 100 дБ на відстані  $d_n = 1$  км рівень ізотропного сигналу зміниться приблизно в  $10^{10} / 3,16 \cdot 10^{13} = 3,1 \cdot 10^{-4}$  разів (44,8 дБ). Для ізотропного рівня на вході передавальної антени 100 мВт на виході каналу (вході приймального каналу) будемо мати 0,03 мВт.

Як відомо [5] для радіотелекомунікаційних систем терагерцового діапазону можуть бути досягнені значення узагальненого енергетичного показника, в якості якого використовують коефіцієнт системи, рівний відношенню вихідної потужності передавача до мінімально допустимої (порогової) потужності корисного сигналу на вході приймача (реальна чутливість приймача) при  $BER = 10^{-3}$  в межах 90 дБ.

Таким чином, в запропонованому рішенні з використання терагерцового радіоканала для забезпечення міжсупутникового зв'язку маємо запас по потужності 45,2 дБ, який забезпечує високу надійність функціонування терагерцової лінії для міжсупутникового зв'язку.

На космічних апаратах для створення каналів в терагерцовому діапазоні необхідно розмістити апаратуру перенесення частотного гігагерцового діапазону в терагерцовий частотний діапазон та антени передачі інформації в терагерцовому діапазоні по каналу міжсупутникового зв'язку.

За рахунок цього в пропонованому способі, на відміну від прототипу, забезпечується розширення зони покриття інформаційними послугами абонентів супутникового зв'язку. Крім того, архітектура «розподіленого супутника» дозволяє використовувати платформи мікросупутників масою до 100 кг і наносупутників масою до 10 кг та створює умови для зниження вартості низькоорбітального інформаційно-телекомунікаційної системи, а рознесення функціональних елементів цільової корисного навантаження системи за кількома фізично відокремленими елементами дозволяє спростити відновлення працездатності системи і створити умови для вдосконалення системи в процесі експлуатації.

## ВИСНОВКИ

До позитивних факторів, що сприяють зростаючому інтересу до космічних апаратів класу куб-сат з боку операторів і замовників космічних апаратів і з боку виробників обладнання, корисного навантаження і платформ куб-сатов, є їх дешевизна і мінімальні терміни виготовлення (складання). Поки що проблемою залишається тривалий час очікування запуску куб-сатов на робочі орбіти. Однак, очікуваний в найближчі роки вихід на ринок ракет-носіїв понад малого класу дозволить вирішити цю проблему.

Розгортання системи, що створить на низькій навколосеземній орбіті опорну базову мережу високошвидкісної передачі даних, може розглядатися як міжнародний проект, орієнтований на кілька цілей:

- створення умов для полегшення доступу до космічних досліджень та використання навколоземної орбіти на основі технології куб-сат багатьма країнами, операторами, міжнародними організаціями та університетами;
- полегшення умов об'єднань зусиль різних країн і народів для інформаційного забезпечення рятувальних місій в зонах надзвичайних ситуацій;
- сприяння зусиллям міжнародної спільноти з контролю за безпечним використанням навколоземного космічного простору і мінімізації наслідків діяльності операторів різних країн по використанню місій з куб-сатами.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Патент RU 2486674, Н 04 В 7/185. Способ спутниковой связи, система спутниковой связи и бортовой радиотехнический комплекс низкоорбитального космического аппарата / Татарников А. В., Стругов С. А., Каменев А. Г., Ефимов А. Г. Патентообладатель Закрытое акционерное общество «Меркурий» (RU). Заявл. 18.04.2012; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18.
2. Сомов А.М. Спутниковые системы связи / Сомов А.М., Корнев С.Ф. // М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 244 с.
3. Галкин В.А. Основы программно-конфигурируемого радио / Галкин В.А. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 372 с.
4. Пат. 93139 Україна, МПК Н04В 7/165 (2006.01). Канал передачі даних в терагерцовому діапазоні з пропускною здатністю більше 1 Гбіт/с / Ільченко М.Ю., Наритник Т.М., Казіміренко В.Я., Радзіховський В.В., Кузьмін С.Є; – Заявник і патентовласник Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут». – № u20140189; заявл. 25.02.2014; опубл. 25.09.2014, Бюл. № 8, 5 с., іл.
5. Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону: монографія / Кравчук С.О., Наритник Т.М.// Житомир.: ФОП «Євенок О.О.». – 2014. – 394 с.

#### REFERENCES

1. PatentRU 2486674, H 04 B 7/185. Sposob sputnykovoj svjazy, sistema sputnykovoj svjazy y bortovoj radyotehnycheskij kompleks nyzkoorbytal'nogo kosmycheskogo apparata / TatarnykovA. V., StrugovS. A., KamenevA. G., EfymovA. G. Patentoobladatel' Zakrytoe akcyonernoe obshhestvo «Merkuryj» (RU). Zajavl. 18.04.2012; opubl. 27.06.2013 Bjul. № 18.
2. SomovA.M. Sputnykovie systemy svjazy. M.: Gorjachaja lynyja – Telekom, 2012. – 244 s. Somov A.M., Kornev S.F.
3. GalkynV.A. Osnovy programmno-konfyguryruemogo radyo. – M.: Gorjachaja lynyja – Telekom, 2013. – 372 s. GalkynV.A.
4. Pat. 93139 Ukraïna, MPKH04B 7/165 (2006.01). Kanal peredachi danix v teragercovomu diapazoni z propusknoyу zdatnistyу bil'she 1 Gbit/s / Il'chenkoM.Yu., NaritnikT.M., KazimirenkoV.Ya., RadzixovskijV.V, Kuz'minS.E; – Zayavnik i patentovlasnik Nacional'nij texnichnij universitet «Kiïvs'kij politexnichnij institut». – № u20140189; zayavl. 25.02.2014; opubl. 25.09.2014, Byul. № 8,5 s., il.
5. KravchukS.O. Telekomunikacijni sistemi teragercovogo diapazonu: monografiya. // Zhitomir.: FOP «EvenokO.O.». -- 2014. – 394 s. KravchukS.O., NaritnikT.M.