

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ МІСІЙ З ВИВЧЕННЯ ТА ОСВОЄННЯ МІСЯЦЯ

¹Ільченко М.Ю., ¹Вигівський М.С., ¹Наритник Т.М., ²Капштик С.В.

¹ Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

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

TELECOMMUNICATIONS SYSTEM FOR INFORMATION SUPPORT OF MISSIONS FOR STUDYING AND COLONIZATION OF THE MOON

Proposals for the creation of an telecommunication system whose task is to provide information support to missions to study and explore the moon are presented. The task of the system is information support of international lunar missions and connection of consumers on the Moon to terrestrial information systems. The composition of the system is determined, prototypes and key technologies necessary for the creation of the proposed system are shown. The results of the preliminary assessment of the characteristics of the system in terms of increasing bandwidth (information transfer rate) are presented.

Представлено пропозиції щодо створення телекомунікаційної системи завданням якої є інформаційна підтримка місій з вивчення та освоєння Місяця. Завдання системи – інформаційна підтримка міжнародних місячних місій та підключення споживачів на Місяці до наземних інформаційних систем. Визначено склад системи, показано прототипи та ключові технології, що необхідні для створення запропонованої системи. Представлено результати попередньої оцінки характеристик системи щодо нарощування пропускної здатності (швидкості передачі інформації).

На сьогоднішній день увага вчених та дослідників різних країн все більше прикута до Місяця. Розробляється багато Місячних місій, які передбачають доставку техніки та апаратів для проведення наукових досліджень і перевезення геологічної породи на Землю. Активно опрацьовуються питання побудови на Місяці постійної інфраструктури, призначеної для довгострокового перебування персоналу місій. Метою цих місій стане досконале вивчення Місяця, видобуток корисних копалин. Отримані знання та відпрацьовані технології планується використати для подальшого освоєння космосу. NASA, ESA та космічні агентства багатьох країн вивчають питання створення космічної станції на орбіті навколо Місяця та запуску на навколomisячну орбіту супутників різноманітного призначення.

Для успішного розвитку Місячних проектів необхідна якісна і стабільна інформаційна підтримка із Землі. Адже на сьогодні на Місяці не має достатніх інформаційних та обчислювальних ресурсів для обробки та зберігання отриманих даних, а на Землі цих ресурсів вдосталь. На вирішення питання створення інформаційно-телекомунікаційного мосту між Землею та Місяцем спрямовано багато проектів. Ці проекти передбачають створення угруповання супутників зв'язку на низькій навколomisячній орбіті, які є аналогом низькоорбітальних навколосемних систем. Також пропонується створення супутників на місячно-стаціонарній орбіті. Недоліком усіх цих проектів [1,2,3] є обмежені можливості супутників на навколomisячній орбіті.

1. Особливості руху Місяця навколо Землі, що впливають на схемно-конструктивні рішення.

При вивченні питання створення телекомунікаційної системи Земля-Місяць потрібно

врахувати особливості руху Місяця навколо Землі. Місяць обертається навколо Землі по орбіті еліптичної форми. Відстань між Землею та Місяцем змінюється в межах від 356 410 до 406 740 км [4,5]. Середня відстань становить 384 440 км. Повний оборот місяць здійснює за 27,322 доби. Цей проміжок часу називається сидеричним, або зоряним місяцем. Період обертання Місяця навколо своєї осі в точності дорівнює періоду її обертання навколо Землі. Кут між площиною орбіти Місяця і площиною екватора Землі змінюється в межах від $18,5^\circ$ до $28,5^\circ$, тобто сидеричному місяцю, тому вона завжди звернена до нас однією своєю стороною. Внаслідок лібрацій¹⁾ центр видимого диска Місяця переміщається в межах $\pm 7^\circ 54'$ довготи по місячному екватору (лібрація по довготі) і в межах $\pm 6^\circ 50'$ широти вздовж меридіана Місяця (Лібрація по широті).

2. Опис телекомунікаційної системи Земля-Місяць.

Телекомунікаційна система Земля-Місяць складається з двох сегментів: місячний сегмент та земний сегмент. Місячний сегмент створений двома однаковими автономними модулями, що розміщені на поверхні Місяця. Особливість обертання Місяця навколо власної осі і його оберненість до Землі постійно однією стороною дозволяє забезпечити постійне знаходження Землі в полі огляду двох автономних модулів, що суттєво спрощує його конструкцію. Для забезпечення постійного енергоживлення автономні модулі мають бути розміщені в районі полюсів Місяця.

Автономний модуль обладнаний приймально-передавальною офсетною антеною великого діаметру (8 м, 16 м або 24 м), яка забезпечує зв'язок в частотних діапазонах L та S. На сьогодні добре відпрацьована технологія проектування та виготовлення антен великого розміру, які використовуються у складі геостационарних супутників типу Inmarsat-4, Inmarsat-6, Thuraya [6]. Опромінювач антени встановлений на відкидну мачту і обладнаний механічним приводом для відстеження зміни місця розташування антени на поверхні Землі.

До складу корисного навантаження автономного модуля також входить обчислювальний модуль, який забезпечує проведення обчислень для споживачів Місячних місій, та виконує функції хмарного дата-центру на поверхні Місяця, телекомунікаційне обладнання для під'єднання до телекомунікаційної системи телекомунікаційних та інформаційних систем, що будуть розгорнуті на поверхні Місяця.

За своєю конструкцією автономний модуль схожий на геостационарний супутник, який додатково обладнаний рушійною установкою м'якої посадки на поверхні Місяця, системою горизонтування конструкції, яка модифікована для умов відстеження руху Сонця вздовж горизонту і системою сонячних батарей, що є первинним джерелом електроенергії.

Земний сегмент телекомунікаційної системи створений із залученням земних антен із розміром дзеркала в межах 25-32 м. Зазвичай такі антени використовуються в якості радіотелескопів. Використання технологій, що притаманні радіотелескопам, зокрема технології радіоінтерферометрії із наддовгою базою (РНДБ), дозволяє суттєво покращити умови приймання інформаційного потоку в напрямку від Місяця до Землі і таким чином покращити швидкість передачі інформації в цьому напрямку. Зважаючи на обертання Землі навколо власної осі для підтримки постійного функціонування телекомунікаційної системи доцільно залучити декілька антен із відносною довготою в межах 60° - 120° .

Земний сегмент підключений до магістральної мережі Інтернет, через який здійснюється доступ до мережі центрів і сховищ даних, центрів управління місіями, наукових установ, дослідницьких центрів, тощо.

3. Частотний діапазон та основні показники радіолінії Місяць-Земля.

При виборі частотного діапазону для організації телекомунікаційної системи потрібно враховувати велику кількість чинників. Головними з них є природні обмеження, які визначені великою довжиною радіолінії (до 410 тис. км) в напрямку Земля-Місяць та Місяць-Земля. В рамках проекту, що розглядається, пропонується використовувати частотні діапазони L, S (1,5 ГГц; 2,5 ГГц). Для лінії Земля-Місяць пропонується використовувати частотний діапазон S (2,5 ГГц), а для лінії Місяць-Земля – частотний діапазон L (1,5 ГГц).

Регламент Радіозв'язку [7] передбачає виділення на первинній основі декількох смуг

частот різної ширини в частотних діапазонах L,S для низки космічних служб. Але використання частини зазначених смуг для цілей міжпланетного зв'язку та створення відповідної телекомунікаційної системи потребує додаткового опрацювання. Зважаючи на важливість проблеми інформаційної підтримки місячних місій для подальшого розвитку космічних технологій та освоєння Місяця, питання про виділення в частотному діапазоні L,S частини смуги частот для міжпланетного зв'язку на вторинній основі можна виносити на розгляд міжнародної спільноти. Для цілей попереднього розрахунку радіолінії телекомунікаційної системи Земля-Місяць прийнято частоти 1,5 ГГц та 2,5 ГГц.

Основні результати попередніх розрахунків радіоліній.

Вихідні дані, що були використані при проведенні оціночних попередніх розрахунків, представлено в Таблиці 1 із врахуванням існуючого досвіду щодо створення космічних радіоліній [8].

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку.

Показник	Варіант 1	Варіант 2
Частота: лінія Місяць-Земля лінія Земля-Місяць	1,5 ГГц 2,5 ГГц	
Довжина радіолінії:	410 тис. км	
Антенна автономного модуля: офсетна антена	16 м	24 м
Антенна земної станції	25м / 32м	
Вихідна потужність передавача автономного модуля	200 Вт	
Шумова температура приймального тракту автономного модуля	800 К	
Шумова температура приймального тракту земної станції	150 К	
Спектральна ефективність телекомунікаційної системи [9].	4,0-4,5 Біт/Гц · сек	
Відношення сигнал/шум (S/N) на вході приймального тракту земної станції	16 дБ	

Результати попередніх оціночних розрахунків наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Результати розрахунку для радіолінії Місяць-Земля

Показник	Варіант 1	Варіант 2
Еквівалентна ізотропно випромінювана потужність автономного модуля	68 дБВт	71,5 дБВт
Щільність потоку потужності на вході антени земної станції	-115,3 дБВт/м ²	-111,7 дБВт/м ²
Підсилення передавальної антени за умови ефективності 0,5	44,9 дБ	48,5 дБ
Підсилення приймальної антени 32 м за умови ефективності 0,6	71,8 дБ	
Затухання радіосигналу у вільному просторі	208,2 дБ	
Додаткові сумарні втрати на поширення радіосигналу в атмосфері Землі	≤ 5 дБ	
Бюджет радіолінії шириною 10 МГц [10].	≥ 48,4 дБ	≥ 52,0 дБ
Бюджет радіолінії шириною 50 МГц [10].	≥ 41,4 дБ	≥ 45,0 дБ

Отримані результати були перевірені за допомогою методики, що була використана в роботі [5].

4. Врахування особливостей використання великих антен

Таблиця 3. Ширина діаграми спрямованості антен в L,S діапазоні по рівню -3 дБ.

Антенна	Частота $f_0 = 1,5$ ГГц ($\lambda = 0,2$ м)	Частота $f_0 = 2,5$ ГГц ($\lambda = 0,12$ м)
16 м	0,88°	0,53°
24 м	0,58°	0,35°
25 м	0,56°	0,34°
32 м	0,44°	0,26°

Земна куля спостерігається з поверхні Місяця під кутом $1,79^\circ \div 2,05^\circ$. Зазначений видимий кут перевищує ширину діаграми спрямованості передавальної антени. Тому антенна система

автономного модуля має бути обладнана засобами корегування положення опромінювача для прийнятної орієнтації приймального та передавального променів.

Додатковим фактором, який впливає на конструктивні рішення блоку опромінювача антенної систем автономного модуля є лібрація Місяця, яку також необхідно враховувати.

Висновки:

1. Місії щодо дослідження Місяця потребують інформаційної підтримки з боку земного сегменту та земних інформаційних систем. Розв'язати це питання можливо шляхом створення телекомунікаційної системи із автономним модулем, що розташований на поверхні Місяця.

2. Для забезпечення функціонування телекомунікаційної системи Місяць-Земля на поверхні Місяця пропонуємо розмістити автономні модулі. За конструктивними рішеннями та складу основного обладнання автономні модулі наближені до геостаціонарного супутника із певними вдосконаленнями, які враховують необхідність посадки модуля на поверхню Місяця та його тривалу експлуатацію.

3. Попередні енергетичні розрахунки показують, що використання у складі телекомунікаційної системи Місяць-Земля антен великого розміру та розташування на поверхні Місяця автономного модуля з антеною 16 / 24 м забезпечує прийнятний енергетичний потенціал радіолінії, що дозволяє використовувати види модуляції із високими показниками спектральної ефективності. Таким чином запропонована архітектура побудови телекомунікаційної системи Місяць-Земля володіє необхідним потенціалом щодо збільшення пропускної здатності та збільшення обсягів інформаційного обміну.

4. Використання у складі місячного та земного сегментів телекомунікаційної системи антен великих розмірів вимагає обладнання антенної системи автономного модуля засобами управління орієнтацією приймального та передавального променів.

Література

1. Moonlight [Електронний ресурс] // ESA. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Lunar_satellites.
2. NASA's Lunar Exploration Program Overview [Електронний ресурс] // NASA. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/artemis_plan-20200921.pdf.
3. ILRS Guide for Partnership [Електронний ресурс] // CNSA. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6812150/content.html>.
4. Куликовский П.Г. Справочник любителя астрономии / Под ред. В. Г. Сурдина. Изд. 6-е, испр. и доп. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 704 с.
5. Расчёт энергетики радиолинии «Земля–Луна» / В. Е. Чеботарев, О. Б. Грицан, А. М. Бадертдинов, В. А. Анжина / ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва», г. Железногорск, Красноярский край, Россия / Исследования Наукограда, № 3 (9) июль-сентябрь 2014, с. 21-24.
6. Inmarsat-6 F1, 2 (GX 6A, 6B) / Електронний ресурс. Режим доступу: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/inmarsat-6.htm
7. Регламент радиосвязи. Статьи. Том 1. / © ITU 2016
8. Справочник по связи для космических исследований / Издание 2014 года / Бюро радиосвязи. Женева, 2015 г.
9. Наритник Т.М. Лекційне заняття №3 [Електронний ресурс]: конспект лекцій / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. Режим доступу: https://drive.google.com/file/d/1s7dXlmUnCgOK5SNfPAIitIcK3yfTm9x9/view?usp=drive_web&authuser=0
10. Наритник Т.М. Лекційне заняття №5 [Електронний ресурс]: конспект лекцій / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. Режим доступу: https://drive.google.com/file/d/1s7dXlmUnCgOK5SNfPAIitIcK3yfTm9x9/view?usp=drive_web&authuser=0.