

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-87-45>

УДК 621.396.67

ПАРФЬОНОВ Глеб

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0002-8322-2137>

gparfonov@gmail.com

АНТИПЕНКО Руслан

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-8931-1977>

r.antypenko@gmail.com

СПОСІБ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕВНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ НЕСТАБІЛІЗОВАНИМИ НАНОСУПУТНИКАМИ В СУЗІР'ЯХ

У статті розглянуто концепцію забезпечення безперервного міжсупутникового зв'язку для нестабілізованих піко- та наносупутників, що функціонують без системи керування орієнтацією та орбітою (ADCS) в умовах хаотичного обертання та орбітального дрейфу. Запропонований підхід базується на використанні багатогранної антенної конфігурації з круговою поляризацією, що забезпечує просторову та поляризаційну інваріантність каналу зв'язку. Як фізичну реалізацію розглянуто систему з кількох антенних елементів, розміщених на гранях платформи типу CubeSat, із послідовною активацією відповідно до алгоритму вибору оптимального напрямку випромінювання. Особливу увагу приділено принципам формування діаграми спрямованості та підтриманню стійкості зв'язку за умов довільної орієнтації апарата. Аналізуються підходи до мінімізації втрат, пов'язаних із поляризаційною невідповідністю. Розглянута модель орієнтована на застосування в малих супутникових угрупованнях, де критичною є автономність та надійність зв'язку без використання активних систем стабілізації.

Ключові слова: пікосупутник, наносупутник, втрати в радіолінії, міжсупутниковий зв'язок, сузір'я супутників

PARFONOV Hlieb, ANTYPENKO Ruslan

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

METHOD OF ENSURING CONTINUOUS COMMUNICATION BETWEEN UNSTABILIZED NANO-SATELLITES IN CONSTELLATIONS

The article presents a concept for ensuring continuous inter-satellite communication for unstabilized pico- and nanosatellites operating without an attitude and orbit control system (ADCS). The proposed approach is intended for spacecraft undergoing chaotic rotation and orbital drift, where traditional pointing or orientation-dependent communication schemes become ineffective. The concept is based on a multi-faceted antenna configuration that uses circular polarization to achieve spatial and polarization stability in radio communication under unpredictable changes in orientation.

The physical basis for testing the proposed communication method is a configuration of six patch antennas integrated on all faces of a 1U cubesat. The antenna elements are activated sequentially using a switching algorithm based on a pilot signal from the main satellite. The research focuses on creating a system and evaluating the link sustainability, particularly at the edges of the antenna radiation pattern, to determine the possibility of maintaining reliable inter-satellite communication in the absence of an attitude and orbit control system. Numerical modeling was performed in the 5.8 GHz range, with results that can be scaled to higher frequencies.

Based on the results of numerical modeling, the optimal PTFE substrate ZYF300CA-P was determined, which provided a gain of 4.1–6.1 dBi, a reflection coefficient better than -25 dB, and an axial ratio less than 5.6 dB over a beamwidth of over 110°. Additional modeling, taking into account the impact of the integrated solar panels, confirmed their minimal effect on system parameters – the deviation did not exceed 0.5 dB.

The results of the radio channel transmission loss calculation show losses in the range of (104; 107.5) dBm for a distance of 1500 m, which corresponds to a degradation of no more than 4 dB at the edges of the diagram, indicating the stability of communication under conditions of rotation and orbital drift. Analysis of the envelope for four coplanar elements shows that switching the best face provides continuous coverage without systematic deep nulls: for most orientations, the radio channel loss does not exceed 2 dB, while only narrow angular sectors show degradation up to 3 dB. Using circular polarization, unlike linear and elliptical polarization, minimizes polarization mismatch losses under dynamic orientation conditions and ensures link stability. The obtained results confirm the practical feasibility and effectiveness of the proposed antenna architecture for creating reliable inter-satellite communication systems in small satellite constellations without the need for an attitude and orbit control system.

Keywords: picosatellite, nanosatellite, losses in the radio line, inter-satellite communication, constellation of satellites

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.06.2026

Опубліковано / Published 10.09.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ПАРФЬОНОВ Глеб, АНТИПЕНКО Руслан

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Мініатюризація космічної техніки відкрила шлях до створення недорогих наукових місій на основі супутникових платформ формату CubeSat. Використання стандартних модульних конструкцій дозволило суттєво зменшити вартість запуску та розробки космічних апаратів, що сприяло активному розвитку місій із

використанням малих супутників. Одним із перспективних напрямків розвитку таких систем є формування сузір'їв малих космічних апаратів, які спільно виконують наукові або технологічні завдання (рис. 1).

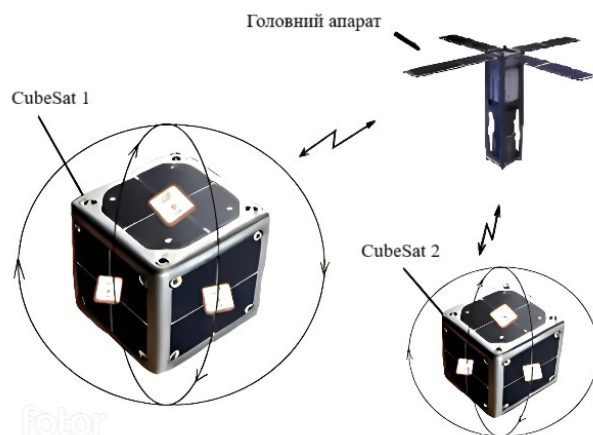


Рис. 1. Сузір'я супутників

Однак реалізація таких систем пов'язана з рядом технічних викликів, одним із найважливіших з яких є забезпечення надійного міжсупутникового зв'язку в межах сузір'я.

У традиційних космічних платформах стабільність радіолінії досягається за рахунок використання систем визначення та керування орієнтацією (ADCS — Attitude Determination and Control System), які дозволяють підтримувати спрямування антени у бік приймача. Проте для нано- та пікосупутників застосування таких систем призводить до збільшення маси, енергоспоживання та складності апарата. Крім того, у сузір'ях із динамічними відносними рухами супутників необхідність постійного коригування орієнтації може негативно впливати на загальну надійність системи.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Одним із напрямків підвищення ефективності таких систем є використання кількох антенних елементів, що забезпечують просторове рознесення діаграм спрямованості. Наприклад, у роботі [1] запропоновано багатоелементну антенну систему для CubeSat, що складається з чотирьох щілинних антен, розміщених на корпусі супутника. Використання просторового рознесення діаграм випромінювання дозволяє підвищити стабільність радіоканалу та розширити робочу смугу частот. Проте у запропонованій архітектурі всі антени працюють одночасно у складі багатоканальної системи, що збільшує складність апаратної реалізації та енергоспоживання. Крім того, у роботі не розглядається вплив хаотичного обертання супутника на стабільність радіолінії.

Інший клас рішень становлять апертурні антени на основі багатограних панельних рефлекторів, які дозволяють отримати високі коефіцієнти підсилення та широкую робочу смугу частот завдяки використанню складної багатогранної геометрії[2]. Однак такі конструкції потребують механізмів розгортання після виведення на орбіту та, як правило, орієнтовані на роботу з фіксованим напрямком передавання або приймання сигналу.

Існують також підходи, спрямовані на створення антен, характеристики яких мало залежать від орієнтації супутника у просторі[3]. У таких рішеннях використовується електромагнітне випромінювання, що формується струмовими модами корпусу космічного апарата. Подібні антени дозволяють реалізувати надійний канал телеметричного та командного зв'язку без застосування механічних пристроїв розгортання, проте така архітектура не забезпечує формування підвищеної спрямованості випромінювання у визначених просторових секторах.

Отже, існуючі дослідження або передбачають використання кількох антенних елементів, розташованих у межах однієї поверхні корпусу супутника, або застосування розгортних апертурних конструкцій для формування великої ефективної антенної апертури, або інтеграцію антени безпосередньо в конструкцію корпусу для зменшення залежності характеристик від орієнтації апарата. При цьому у науковій літературі недостатньо розглянуті підходи до побудови антенних систем міжсупутникового зв'язку, здатних забезпечувати стабільну роботу радіолінії в умовах довільної орієнтації космічних апаратів без використання систем керування орієнтацією.

У даній роботі розглядається реалізація міжсупутникової системи зв'язку для нестабілізованих наносупутників на основі багатогранної антенної конфігурації, що складається з шести патч-антен, розміщених на різних гранях супутника. У кожен момент часу активним є лише один антенний елемент, а перемикання між ними здійснюється відповідно до алгоритму, який базується на аналізі руху супутників за допомогою пілот-тону після їх відстрілу з корабля-носія. Надалі параметри взаємного руху змінюються повільно і можуть вважатися квазістатичними. Такий підхід має на меті забезпечити стійкий

міжсупутниковий зв'язок у сузір'ях піко- та наносупутників на низьких навколоземних орбітах без застосування активної стабілізації орієнтації [4].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТИ

Метою даної роботи є дослідження можливості реалізації міжсупутникового радіозв'язку в сузір'ях піко- та наносупутників без використання системи ADCS шляхом застосування багатогранної антенної конфігурації з комутацією активного елемента. У роботі визначаються вимоги до антенної системи, здатної забезпечити стійкий зв'язок в умовах хаотичного обертання та орбітального дрейфу апаратів, а також проводиться чисельне моделювання характеристик запропонованої антенної структури з урахуванням вимог до її технологічної простоти та можливості масштабування у бюджетних супутникових місіях. Додатково досліджується вплив використання кругової поляризації на втрати в радіолінії при значних кутах відхилення між антенами.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У запропонованій конфігурації супутники одночасно здійснюють власне обертання навколо осі та відносний орбітальний дрейф. Це створює динамічні зміни орієнтації, які потрібно враховувати під час проектування антенної системи.

З метою зниження вартості, спрощення конструкції та забезпечення масштабованості системи, що є критичним для сузір'їв нано- та пікосупутників, реалізація запропонованого рішення базується на стандартизованій платформі CubeSat. Запропонована конфігурація антенної системи використовує шість патч-антен, кожна з яких встановлена на одній грані супутника (Рис 2.). Антени мають почерговий алгоритм комутації, який контролюється пілот-тоном з головного супутника констеляції. Система вмикає один патч у момент передачі/прийому, решта елементів вимкнені. За такого підходу сумарні діаграми не формуються шляхом накладання полів, що спрощує апаратну частину і знижує вимоги до фазової узгодженості. Детальна розробка та оптимізація алгоритму (критерії вибору активної грані, затримки перемикачів, усталеність у присутності перешкод) виходять за межі поточної публікації і плануються до подальшого дослідження.

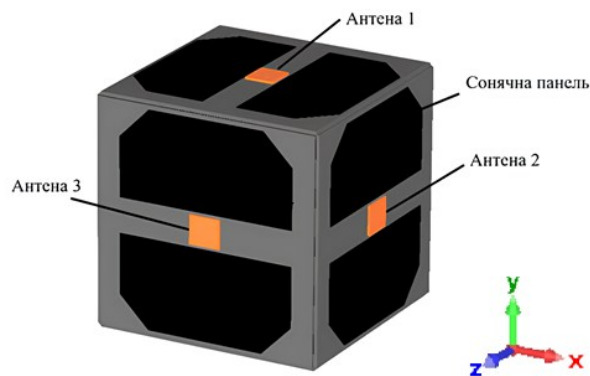


Рис. 2. Загальний вид антенної системи на базі CubeSat

Базуючись на запропонованому алгоритмі були визначені основні вимоги до антенної системи, які включають в себе:

- Коефіцієнт підсилення: Цільові значення знаходяться в діапазоні 6 дБі, що є достатнім для міжсупутникового зв'язку на короткі та середні відстані на частоті 5.8 ГГц, навіть за умов неідеальної орієнтації;
- Ширина променя на половині потужності (HPBW): Головний пелюсток має охоплювати щонайменше 90°, забезпечуючи таким чином квазівсеспрямоване покриття шляхом послідовної активації;
- Коефіцієнт відбиття: цільові значення ≤ -17 дБ для мінімізації відбитої потужності та забезпечення стабільності узгодження в зазначеному діапазоні;
- Поляризація: Вимагається кругова поляризація, з осьовим відношенням (AR) < 6 дБ, при $\theta=[0^\circ; 50^\circ]$, $\varphi=[0^\circ; 360^\circ]$. Такі значення обрані з урахуванням всіх шести антен на супутнику, таким чином антенна система здатна буде охопити сферу в 360°. Таким чином буде досягнуто узгодження поляризації в умовах нестабільної орієнтації та зменшено втрати сигналу при невідповідності поляризацій.

Для попереднього дослідження обрано піддіапазон 5-6 ГГц, оскільки він зберігає можливість мініатюризації патч-елементів ($\lambda \approx 51.7$ мм — одиничний патч $\approx 12 \times 12$ мм) і дозволяє використовувати дешеві COTS RF/SDR-рішення [5]. Надалі результати проекту планується масштабувати на діапазон 10 ГГц [6].

Далі було виконано чисельне моделювання на підкладках з різних матеріалів, які було обрано за сукупністю поставлених вимог до комутаційної системи.

Як базову форму обрано майже квадратний патч, що дозволяє отримати близькі резонансні частоти двох ортогональних мод і реалізувати кругову поляризацію за допомогою оптимального розташування точки

живлення (рис. 3). На Рис. 3 позначено: W_p — ширина патчу, L_p — довжина патчу, L_f — довжина коаксіалу, h — висота підкладки.

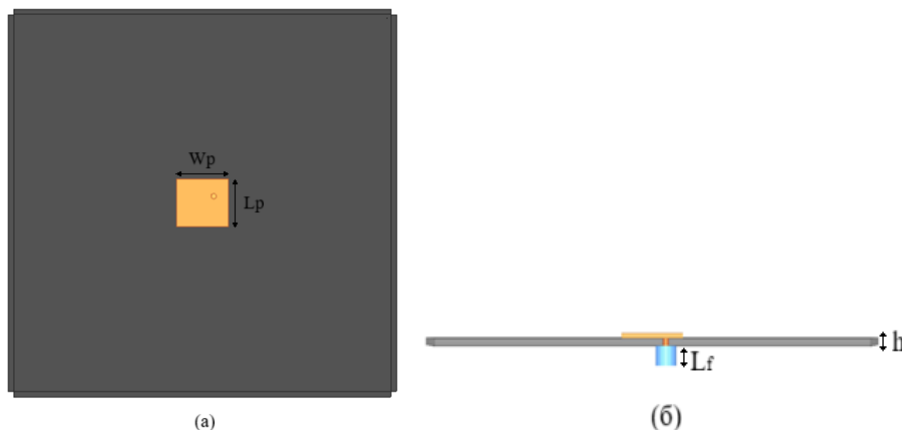


Рис.3. (а) Патч вид зверху. (б) Патч вид збоку.

Для попереднього розрахунку геометрії використовуються аналітичні формули для прямокутного (квадратного) патча [7,8]:

$$W_p = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (1)$$

де c — швидкість світла у вакуумі, f_0 — резонансна частота 5.8 GHz, ϵ_r — діелектрична проникність матеріалу підкладки

Ефективна діелектрична проникність:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W_p}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Ефективна довжина і поправка на краєві ефекти:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left(\frac{W_p}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{W_p}{h} + 0,8\right)} \quad (4)$$

$$L_p = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

Для майже квадратного патча початкові $W_p \approx L_p$ подальша корекція здійснюється під час симуляцій.

Формула для вибору точки коаксіального вводу для узгодження з 50 Ω має наступний вигляд. Вхідний імпеданс резонансного патча на краю:

$$R_{in}(y=0) = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} \quad (6)$$

де G_1 — провідність випромінювання одного випромінюючого щілинного елемента, а G_{12} — взаємна провідність між двома випромінюючими щілинними елементами патч-антени.

Вхідний опір резонансної пластини при $y = y_0$:

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} \left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (7)$$

Отримані попередні розрахункові значення основних геометричних параметрів становлять $W_p = 16,9 \cdot 10^{-3}$ м, $L_p = 11,9 \cdot 10^{-3}$ м, $R_{in}(y = y_0) = 4,7 \cdot 10^{-3}$ м, що забезпечують початкове узгодження робочої частоти й ефективне випромінювання елемента. На наступному етапі ці параметри підлягають уточненню шляхом чисельного тривимірного електромагнітного моделювання, яке дозволяє оптимізувати структуру антени з урахуванням реальних хвильових процесів і взаємодії в межах повної системи.

Рівняння втрат в радіоканалі визначається для GEO та LEO як [9]:

$$T_L = G_T - L_{FS}, \quad (8)$$

де G_T – потужність антени передавача, L_{FS} – втрати у вільному просторі, всі величини вказані в дБ.

Чисельне моделювання проводилось на підкладках трьох типів: PTFE ZYF300CA-P, Rogers RO4350B та FR-408. Згідно з моделюванням, найкращі результати відносно поставлених вимог було отримано на підкладці PTFE ZYF300CA-P. Графічно результати моделювання представлені як 2D- та 3D-діаграми вимірюваних параметрів (рис. 4 – рис. 7). Діаграми спрямованості представлені в сферичних координатах (θ , ϕ), де θ вимірюється від осі антени (вісь z).

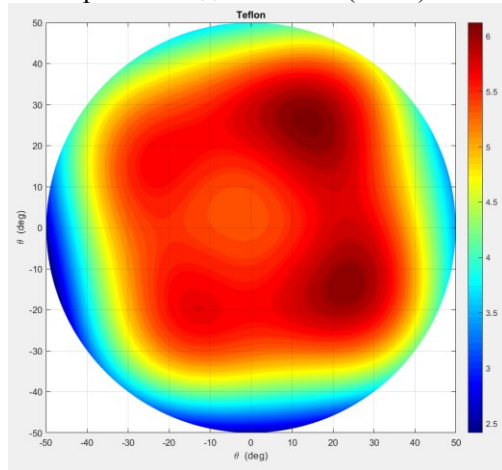


Рис. 4. Діаграма коефіцієнту підсилення

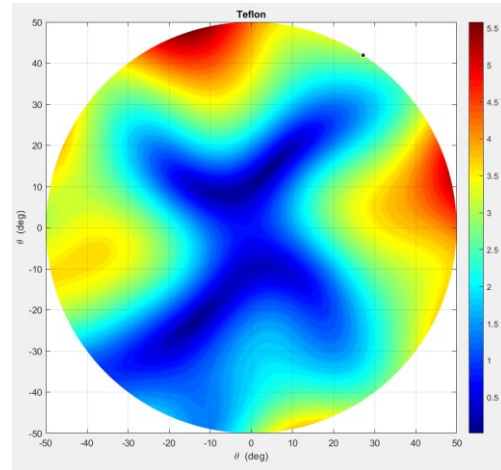


Рис. 5. Діаграма коефіцієнта кругової поляризації

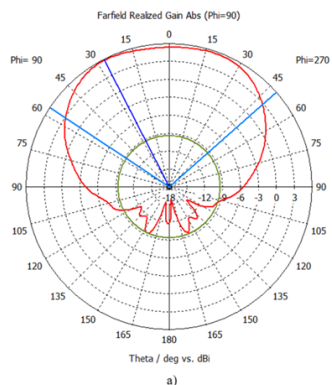


Рис. 6. Графік ширини променя на половині потужності

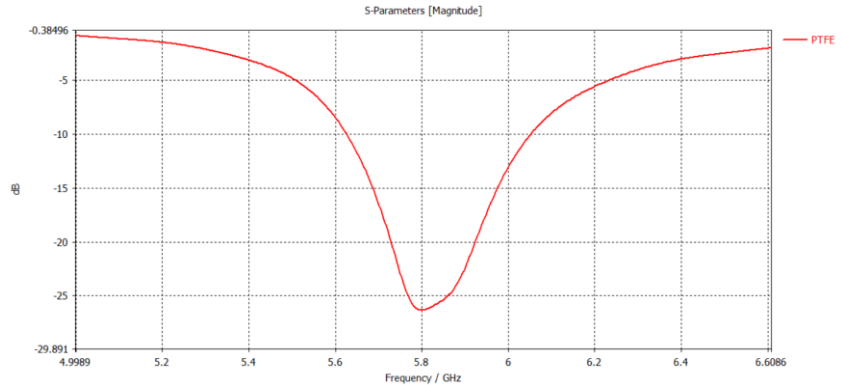


Рис. 7. Графік коефіцієнту відбиття

Наведені у таблиці 1 результати моделювання отримані для кутового сектору діаграм $\theta = [0^\circ; 50^\circ]$ $\phi = [0^\circ; 360^\circ]$. Його обрано з розрахунку, що шість антен, розміщених на гранях CubeSat, забезпечують суцільне покриття навколишнього простору. Таке кутове покриття кожної окремої антени з запасом задовольняє вимогам до створення безперервної зони зв'язку навколо супутника при послідовній комутації антенних елементів.

Таблиця 1

Отримані характеристики моделі на підкладці PTFE ZYF300CA-P

	PTFE ZYF300CA-P
Розмір, мм	13.8 x 12.77
Коефіцієнт відбиття, дБ	>-25
Ширина діаграми спрямованості на рівні половини потужності	>110°
Коефіцієнт підсилення, дБ	[4.1; 6.1]
Коефіцієнт осьового відношення, дБ	< 5.6

У серії симуляцій з інтегрованими сонячними панелями визначено, що їхній вплив на основні параметри: коефіцієнт підсилення, середній AR у робочій зоні та коефіцієнт відбиття — неістотний. Різниця між моделями без панелей і з панелями знаходиться в межах похибки моделювання (частки дБ), тобто практично нульова для прикладних задач зв'язку.

Моделювання повної конфігурації показало, що комбіноване покриття при послідовному вмиканні елементів забезпечує повну просторову апроксимацію у межах діапазону $\theta = [0^\circ; 50^\circ]$ над кожною гранню та

сумарне обертальне перекриття без систематичних «мертвих зон» (рис.8). Локальні деградації в міжелементних областях спостерігаються як зменшення ефективності на кілька дБ у вузьких ділянках кута.

Стабільність поляризаційних характеристик (рис. 9), підтверджує ефективність кругової поляризації для компенсації зміни орієнтації супутника. В межах робочого сектора $\theta = [0^\circ; 50^\circ]$, $\phi = [0^\circ; 360^\circ]$ осьове відношення не перевищує 7 дБ, що забезпечує узгодження поляризацій у більшості просторових напрямків. Це мінімізує поляризаційні втрати та гарантує стабільне приймання сигналу без необхідності активної стабілізації орієнтації апарата.

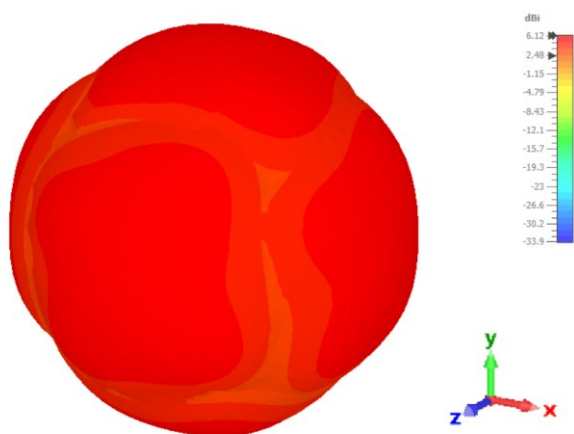


Рис. 8. Коефіцієнт підсилення системи з шести антен

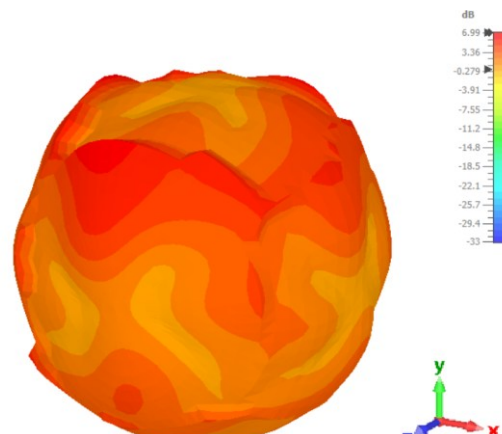


Рис. 9. Коефіцієнт кругової поляризації системи з шести антен

На рисунку 10 показані результати розрахунку втрат передачі в радіоканалі для одного елемента антенної системи на відстані 1500 м за формулою (8). Отримана азимутально-екваторіальна проекція показує втрати в діапазоні (104; 107,5) дБм, що відповідає погіршенню не більше ніж на 4 дБ по краях діаграми. Цей результат підтверджує можливість стабільного з'єднання навіть при зміні орієнтації пристрою.

Ключовим чинником який сприяє цьому є використання кругової поляризації, яка мінімізує поляризаційні втрати та забезпечує ефективну роботу системи у динамічних умовах «space-to-space» зв'язку без застосування стабілізаційних підсистем.

На рисунку 11 показано діапазон втрат у радіолінії на відстані 1500 метрів, отриманий шляхом підсумовування діаграм для чотирьох копланарних патч-елементів.

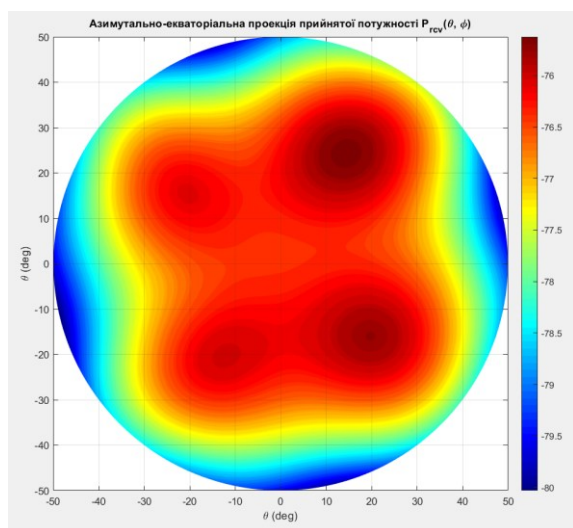


Рис. 10. Втрати в радіолінії

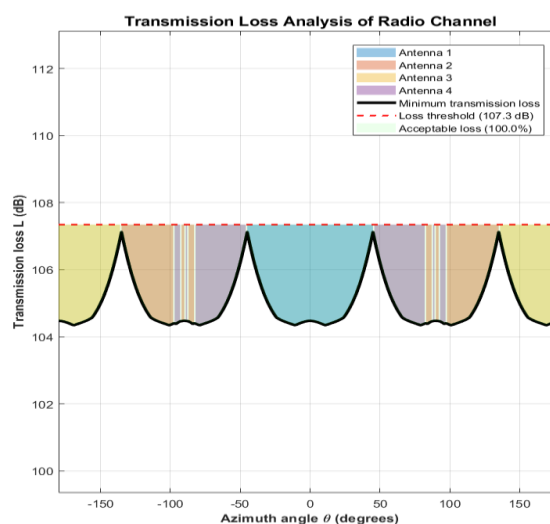


Рис. 11. Сумарна діаграма втрат в радіолінії

Діаграма показує безперервне кутове покриття без систематичних глибоких провалів: на більшій частині діапазону провали становлять ≤ 2 дБ, тоді як лише вузькі кутові сектори демонструють провали до 3 дБ. Така поведінка вказує на те, що перемикання країв ефективно пом'якшує втрати, спричинені обертанням. Отже, згідно з отриманими результатами, ця модель сумісна з запропонованим алгоритмом.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Таким чином, запропонована архітектура на основі шести патч-антен з почерговим перемиканням активних елементів довела свою ефективність для підтримання зв'язку в умовах хаотичного обертання та орбітального дрейфу. Визначено основні технічні вимоги до системи: коефіцієнт посилення в діапазоні 6 дБі, ширина променя половинної потужності (HPBW) не менше 90°, коефіцієнт відбиття ≤ -17 дБ, використання кругової поляризації з осьовим коефіцієнтом (AR) < 6 дБ в робочому секторі $\theta = [0^\circ; 50^\circ]$, $\varphi = [0^\circ; 360^\circ]$.

Чисельне моделювання в діапазоні 5,8 ГГц дозволило оптимізувати геометрію антени та вибрати оптимальний матеріал підкладки, нею виявилась PTFE ZYF300CA-P. Вона продемонструвала повну відповідність поставленим вимогам досягнувши коефіцієнта підсилення 4,1–6,1 дБі, коефіцієнта відбиття -25 дБ та осьового відношення $< 5,6$ дБ при HPBW $> 110^\circ$. Моделювання з урахуванням інтегрованих сонячних панелей підтвердило їх мінімальний вплив на параметри антени (відхилення не перевищує 0,5 дБ), що підкреслює практичність конструкції.

Розрахунок втрат у радіоканалі на відстані 1500 м показав значення в діапазоні (104; 107,5) дБм, що відповідає погіршенню сигналу не більше ніж на 4 дБ на краях діаграми спрямованості окремого елемента. Аналіз огинаючої для чотирьох копланарних елементів показав безперервне просторове покриття без систематичних глибоких провалів: втрати не перевищують 2 дБ для більшості кутів, а збільшення до 3 дБ спостерігається тільки у вузьких секторах.

Кругова поляризація допомогла мінімізувати втрати, спричинені невідповідністю поляризації під час динамічної переорієнтації супутників. Стабільність осьового співвідношення в робочому секторі забезпечує надійне узгодження поляризації та підтримує стабільний рівень сигналу без необхідності активної стабілізації.

Отримані результати підтверджують практичність та ефективність запропонованої системи комутаційної антени для реалізації надійного міжсупутникового зв'язку в сузір'ях нестабілізованих піко- та наносупутників стандарту CubeSat. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою ефективного алгоритму керування антенною системою, здатного адаптуватися до динамічної зміни орієнтації супутника та умов радіоканалу. Окремий напрям становить перенесення запропонованої концепції на нестандартизовані об'єкти, зокрема платформи, геометрія яких відрізняється від формату CubeSat 1U.

References

- [1] R. Hussain, K. Aljaloud, A. S. Rao, A. M. AlGarni, A. H. Alqahtani, A. Aziz, Y. T. Aladadi, S. I. Alhuwaimel, and N. Hussain, "Miniaturized Folded-Slot CubeSat MIMO Antenna Design with Pattern Diversity," *Sensors*, vol. 22, no. 20, p. 7855, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22207855>
- [2] B. Imaz-Lueje, M. Rodríguez Pino, and M. Arrebola, "Deployable Multi-Faceted Reflectarray Antenna in Offset Configuration With Band Enhancement," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 12, pp. 11686–11696, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3209753>
- [3] A. Narbudowicz, R. Borowiec, and S. Chalermwisutkul, "No-Need-To-Deploy UHF Antenna for CubeSat: Design Based on Characteristic Modes," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 597–601, April 2021. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3055418>
- [4] H. V. Parfonov and R. V. Antypenko, "Problems of radio communication in picosatellite constellations," *Radioengineering Problems, Signals, Devices and Systems*, no. 1(15), pp. 42–44, 2024.
- [5] A. Sethi, N. Gajanur, K. S. Sadasivan, V. Thakurta, B. S. Cheela, and R. Hosangadi, "Implementation of COTS components for CubeSat applications," in *2017 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2017*, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943808>
- [6] International Telecommunication Union, *Radio Regulations*. Geneva, Switzerland: ITU, 2023. [Online]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR>. Accessed on: MMM. DD, 2024.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [8] P. C. Sharma and K. C. Gupta, "Analysis and optimized design of single feed circularly polarized microstrip antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 31, no. 6, pp. 949–955, Nov. 1983. <https://doi.org/10.1109/TAP.1983.1143162>
- [9] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.