

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-26>

УДК 621.396.96:004.942:629.78

ТЕРЕЩЕНКО Дмитро

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

<https://orcid.org/0009-0008-6582-6918>

decckster@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

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЕННЯ СИГНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ МІКРОДОПЛЕРІВСЬКИХ ОЗНАК У КОСМІЧНИХ АПАРАТАХ

У статті представлено модель формування мікродоплерівських підписів некооперованих космічних апаратів, адаптовану до умов космічного простору на основі ефекту мікродоплера. Підхід поєднує кінематику жорсткого тіла з локальними мікрорухами конструктивних елементів і багатоточкове розсіювання, відтворюючи безперервні та імпульсоподібні компоненти підпису. Описано налаштування обчислювального експерименту та параметри часо-частотного аналізу; показано узгодженість спектральних характеристик із теорією й чутливість до параметрів мікроруху та тривалості спостереження. Модель призначена для генерації синтетичних даних і попередньої оцінки інформативності мікродоплерівських ознак у космічних апаратах.

Ключові слова: мікродоплерівські підписи; ефект мікродоплера; моделювання сигналів; ідентифікація цілей; некооперовані космічні апарати.

TERESHCHENKO Dmytro, ANTYPENKO Ruslan

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

SIMULATION AND PROCESSING OF SIGNALS WITH MICRO-DOPPLER SIGNATURES FOR SPACECRAFT

The article proposes an advanced model for forming micro-Doppler signatures of non-cooperative spacecraft, specifically adapted to the conditions of the space environment and grounded in the physical principles of the micro-Doppler effect. The model integrates classical rigid-body kinematics of the spacecraft with superimposed local micro-motions of individual structural elements, such as rotating panels or vibrating components, while also accounting for multipoint electromagnetic scattering from complex geometries. This combination makes it possible to reproduce both continuous spectral components associated with regular rotational motions and impulse-like features caused by intermittent or transient micro-motions.

The configuration of the computational experiment is described in detail, including assumptions regarding spacecraft geometry, motion parameters, radar observation conditions, and signal acquisition. Particular attention is given to the selection of time-frequency analysis techniques and processing parameters, which are shown to play a critical role in resolving and interpreting micro-Doppler features. The obtained time-frequency representations demonstrate good consistency with theoretical expectations and previously reported analytical results.

A sensitivity analysis is conducted to assess the influence of micro-motion characteristics, such as angular velocity, vibration amplitude, and observation duration, on the resulting micro-Doppler signatures. The results confirm that even small variations in these parameters can lead to noticeable changes in spectral structure, highlighting the potential of micro-Doppler features for spacecraft characterization.

The proposed model is primarily intended for generating high-fidelity synthetic datasets and for the preliminary assessment of the informativeness and robustness of micro-Doppler features in the context of spacecraft observation, identification, and classification under non-cooperative conditions.

Keywords: micro-Doppler signatures; micro-Doppler effect; signal modeling; target identification; non-cooperative spacecraft.

Стаття надійшла до редакції / Received 30.09.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.10.2025

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

В останнє десятиліття кількість супутників на навколоземній орбіті значно зросла. Все більше країн та незалежних компаній виводять свої супутники на орбіту. Оскільки на теперішній момент немає одного узгодженого стандарту інтерфейсів для супутників, а обслуговування стає більш доцільним, ніж заміна супутника, з'являється необхідність у некооперованих сервісних апаратах.

У випадку некооперованих апаратів головними індикаторами "аномальної" поведінки залишаються мікродоплерівські модуляції: вони виникають тоді, коли частини цілі (пластини сонячних батарей, пропелери, уламки) здійснюють обертання чи вібрацію із частотами, на порядок вищими за базовий доплерівський зсув, гармонічний мікрорух породжує характерну гребінку бокових ліній $f_0 \pm n\Omega/2\pi$, з якої можна безпосередньо зчитувати амплітуду та частоту коливань [1].

Суттєвий прогрес досягнуто завдяки наземним високочастотним комплексам, що дозволили фіксувати мікродоплерівські підписи великих нестационарних супутників навіть при відносно низькому співвідношенні сигнал/шум [2]. Паралельно розвивалися компактні системи, які використовують частотну модуляцію безперервної хвилі НВЧ діапазону для ближчих рубежів охорони та бортових БПЛА, де сантиметрова довжина хвилі забезпечує чутливість до міліметрових мікроколивань [3]. Для об'єктів із яскраво вираженим ротором (гелікоптери, мультикоптери) було запропоновано багатоточкові аналітичні моделі, що відтворюють короткі імпульсні «спалахи» у спектрограмі [4].

Незважаючи на успіхи, дві ключові проблеми залишаються відкритими. Перша – великі витрати часу на повнохвильові симуляції, потрібні для поповнення тренувальних баз глибоких мереж; друга – нестійкість класів згорткових нейромереж до деградації сигналу при співвідношенні сигнал/шум < 0 дБ [5]. Отже, актуальним є пошук компромісного підходу, який поєднає швидкість аналітичних моделей із правильністю розрахунків та дозволить інтегрувати фізичні пріори у сучасні архітектури глибинного навчання.

У цій роботі на основі досліджень наявних математичних моделей мається на меті створення математичної моделі, яка симулює рух куба, а також випромінювання та відбиття променів від антен, після чого проводяться обчислення отриманого сигналу (визначення дальності, лінійної швидкості, кутової швидкості). У даній статті описані основні обчислення для моделі із обертовим рухом. Варіантність цільового апарата, а також інші види руху розглядаються як напрям подальших досліджень.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У класичній постановці кожен елемент цілі, що здійснює періодичний мікрорух, подається точковим розсіювачем з миттєвою дальністю

$$R_p(t) = R_0 + l \cos(\Omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

де R_0 – середня дальність до точки без урахування мікрорухів, l – амплітуда періодичного мікроруху цієї точки вздовж лінії прямого бачення, Ω – кутова частота мікроруху (рад/с), φ_0 – початкова фаза мікроруху; фазою ехо

$$\Phi_p(t) = \frac{4\pi}{\lambda} R_p(t), \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання сигналу;

і базовим сигналом (комплексна огинаюча відбитого сигналу)

$$S_p(t) = \alpha_p \exp\{j(2\pi f_0 t + \Phi_p(t))\} \quad (3)$$

де α_p – ваговий коефіцієнт, f_0 – носійна частота радару.

Така фазова ЧМ-модуляція породжує «гребінку» бокових ліній у спектрі на частотах з $f_0 \pm n\Omega/2\pi$ вагами $J_n(\frac{4\pi l}{\lambda})$ (функції Бесселя) [2]. Миттєвий частотний зсув розпадається на макрокомпонент і мікрокомпонент:

$$f_D(t) = \frac{2}{\lambda} v_r(t) + \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_p(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} v_r(t) - \frac{2l\Omega}{\lambda} \sin(\Omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

де $v_r(t)$ – радіальна швидкість жорсткого тіла відносно радару, $\frac{2}{\lambda} v_r(t)$ – доплерівська компонента (макро), $\frac{2l\Omega}{\lambda} \sin(\Omega t + \varphi_0)$ – мікрокомпонента Доплера. Цей рівень дає закрити форму для мікродоплерівських смуг і є основою усієї подальшої побудови [2].

Для цілі візьмемо за основу жорстке тіло з центром $c(t) = c_0 + v_{lin}t$ та кутовою швидкістю $\Omega = \Omega \hat{u}$. Для фіксованої точки тіла з радіус-вектором $r_i^{(0)}$ у тілі маємо її положення у системі координат:

$$r_i(t) = c(t) + R(t)r_i^{(0)}, \quad \dot{r}_i(t) = v_{lin} + \Omega \times (R(t)r_i^{(0)}), \quad (5)$$

де $R(t)$ – матриця обертання навколо $\hat{u}$, $c(t)$ – вектор положення центра мас цілі, v_{lin} – лінійна швидкість центра мас, $\dot{r}_i(t)$ – повна швидкість точки.

Для антени в точці а миттєва дальність і радіальна швидкість цієї точки:

$$R_i(t) = ||r_i - a||, \quad v_{r,i}(t) = \hat{R}_i(t) \cdot \dot{r}_i(t), \quad \hat{R}_i(t) = \frac{r_i(t) - a}{||r_i(t) - a||} \quad (6)$$

де a – вектор положення антени, $\hat{R}_i(t)$ – одиничний вектор від антени до точки вимірювання, $v_{r,i}(t)$ – радіальна швидкість точки.

Ця макромоделю відповідає звичайному ефекту Доплера жорсткого тіла і забезпечує геометрично коректне проєктування руху на лінію прямої видимості. Вона сумісна з ядром (1-4) через додавання $f_m(t)$ до $2v_{r,i}/\lambda$.

Рух сонячних панелей на супутниках можна порівняти із лопотями гелікоптера через характерне розташування сонячних панелей чи інших елементів конструкції. Для опису подібних об'єктів, кожний виступаючий елемент подають набором точок на однаковому радіусі l зі зсувами фази $\frac{2\pi k}{N}$ між елементами (де N – кількість елементів). Сумарний прийнятий сигнал:

$$s(t) = \sum_{b=0}^{N-1} \sum_{i \in P_b} \alpha_{b,i}(t) \exp\{j \frac{4\pi}{\lambda} R_{b,i}(t)\}, \quad (7)$$

де P_b — набір точок на b -тому елементі, $R_{b,i}(t)$ — їхні дальності з урахуванням макро- та мікроруху, а $\alpha_{b,i}(t)$ — ваговий коефіцієнт амплітуди / ефективна поверхня розсіювання, N — кількість елементів, що обертаються.

Така композиція відтворює короткі імпульсні спалахи у спектрограмі з періодом проходження елементу й характерні гармоніки проходження виступаючих елементів [3]. У данній моделі для куба роль P виконують чотири центри граней; для кожної точки використано формули описані вище (1-7).

Для швидких симуляцій вагових коефіцієнтів, $\alpha_i(t)$ часто беруть у вигляді простого кутового фактору (напр., $\alpha_i \propto |\cos\theta_i|$, де θ_i — кут падіння на грань), іноді з дальнішим згасанням $1/R_i^2$. Якщо потрібно врахувати взаємне затінення і складну геометрію, амплітуди можна коригувати методом відбитих хвиль, що добре зарекомендувався у міліметровому діапазоні для малих БПЛА [4]. У данній моделі цей показник не представлений, адже опційним уточненням амплітудних коефіцієнтів.

У радарі із синтезованою апертурою мікродоплерівські модуляції проявляються як нестационарна азимутна фаза; їх відновлюють за допомогою часо-частотного трекінгу та методом виправлення міграції за дальністю фазової історії [6]. Хоч у цій роботі використано моностаціонарну геометрію частотно модульованої безперервної хвилі, аналітичні рівняння (1-7) описують аналогічний фізичний підхід: зміна дальності $\rightarrow$ зміна фази $\rightarrow$ спектральні бокові смуги. Це забезпечує методологічну узгодженість з відомими результатами:

- 1) дальнє поле $R_0 \gg$ характерних розмірів цілі;
- 2) одноразове відбиття (без мультипроходів);
- 3) вузькосмугова носійна f_0 або узгоджений мікшер із частотною модуляцією;
- 4) повільна еволюція геометрії в межах вікна STFT;
- 5) малий параметр модуляції $\frac{4\pi l}{\lambda}$ для застосування Бесселевої розкладки [2], [3], [5].

У сукупності ці п'ять підмоделей формують робочу аналітичну схему: макро-кінематика жорсткого тіла $\rightarrow$ додавання локальних мікродоплерівських модульовань $\rightarrow$ багатоточкова сума з простим амплітудним зважуванням. Саме ця схема лягає в основу даного генератора сигналів і подальшої обробки, а також узгоджується з відомими підходами [2]–[5].

Мішень моделюється як жорсткий куб із ребром $a=1$ м та центром $c_0 = (0,0,1000)$ м. Орієнтація змінюється обертанням навколо осі $\hat{y}$ зі сталою кутовою швидкістю $\Omega = 30^\circ/\text{с} = 0.5236$ рад/с ; матриця обертання $R(t) = Rot_{\hat{y}}(\Omega t)$. Поступальна швидкість відсутня: $v_{lin} = 0$. Для моделювання відбиття обрано чотири ефективні розсіювачі — центри бокових граней, задані у тіло-координатах $p_k^{(0)}$ (граням $\pm X, \pm Y$). Приклад моделі, що розраховується показано на рисунку 1.

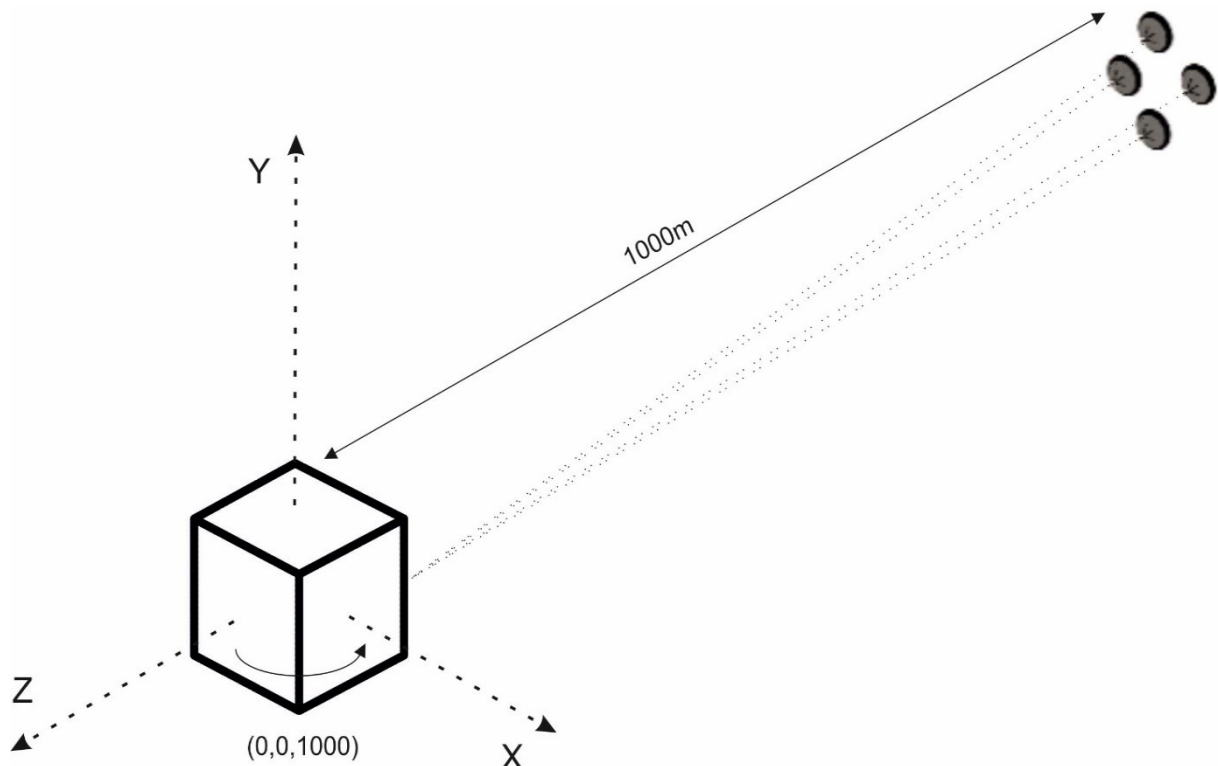


Рис. 1. Візуалізація моделі для розрахунку

Обчислення координат (положення k -тої точки на поверхні):

$$r_k(t) = c_0 + R(t)p_k^{(0)}, \quad k \in \{\pm X, \pm Y\}. \quad (8)$$

де c_0 – положення центра мас, $p_k^{(0)}$ – фіксований вектор положення точки у системі координат.

Антенний блок — чотири прийнятно-передавальні елементи у площині $z = 0$: $(\pm 5, 0, 0)$ і $(0, \pm 5, 0)$

м. Для антени з координатами a визначаємо напрямок лінії прямої видимості:

$$\hat{R}_{k,a}(t) = \frac{r_k(t) - a}{\|r_k(t) - a\|}, \quad R_{k,a}(t) = \|r_k(t) - a\|. \quad (9)$$

Миттєва швидкість точки $r_k(t)$:

$$\dot{r}_k(t) = v_{lin} + \Omega \times (r_k(t) - c_0), \quad \Omega = \Omega \hat{y}. \quad (10)$$

Радіальна (макро) швидкість відносно антени:

$$v_{r,k,a}^{macro}(t) = \hat{R}_{k,a}(t) \cdot \dot{r}_k(t). \quad (11)$$

Кожний ефективний розсіювач додатково здійснює гармонічний мікрорух уздовж ліній прямої видимості із амплітудою $l_p = 0.5$ м і тією самою частотою Ω [2]:

$$R_{k,a}^{micro}(t) = l_p(\cos \Omega t + \varphi_0), \quad v_{k,a}^{micro}(t) = \frac{d}{dt} R_{k,a}^{micro}(t) = -l_p \Omega \sin(\Omega t + \varphi_0). \quad (12, 13)$$

Сумарна радіальна швидкість та монопозиційний доплерівський зсув відносно лінії бачення:

$$v_{r,k,a}(t) = v_{r,k,a}^{macro}(t) + v_{r,k,a}^{micro}(t), \quad \Delta f_{k,a}(t) = \frac{2}{\lambda} v_{r,k,a}(t), \quad (14, 15)$$

де $\lambda = c/f_0$, $f_0 = 10$ ГГц, $\Delta f_{k,a}(t)$ – миттєвий доплерівський зсув.

Щоб урахувати напрямну чутливість граней без повнохвильового розрахунку, вводимо простий кутовий множник

$$\alpha_{k,a}(t) = \alpha_0 |n_k(t) \cdot \hat{R}_{k,a}(t)|_+, \quad (16)$$

де $n_k(t)$ — нормаль до k -тої грані. Дальнісне затухання $1/R^2$ не застосовувалося (при $R \approx 1$ км воно лише вирівнює амплітуди й не впливає на частотні оцінки). Ефекти затінення/мультипроходів у цій роботі не моделювалися.

Носійна $\cos(2\pi f_0 t)$ модулюється сумарною фазою, пропорційною дворазовій дальності. Для кожної антени обираємо домінуючий розсіювач (із мінімальною $R_{k,a}$) як джерело основного внеску (наближення «переважаючого дзеркального відбиття»):

$$s_a(t) = \alpha_{k,a}(t) \cos\left(2\pi[f_0 + \Delta f_{k,a}(t)] + \frac{4\pi}{\lambda}[R_{k,a}(t) + R_{k,a}^{micro}(t)]\right). \quad (17)$$

- Дальність-проксі: $\hat{R}_a(t) = R_{k,a}(t) + R_{k,a}^{micro}(t)$.
- Кут спостереження (до осі Z): $\theta_a(t) = \arccos(\hat{R}_{k,a}(t) \cdot \hat{z})$.
- Макро- та мікро-швидкості подаються окремими кривими $v_{r,k,a}^{macro}(t)$ і $v_{k,a}^{micro}(t)$.
- «Видима» кутова швидкість точки (кінематичний показник геометрії):

$$\omega_a^{app}(t) = \frac{\|\Omega \times (r_k(t) - c_0)\|}{R_{k,a}(t)} \approx \frac{l_{eff}}{R_0} \Omega, \quad (18)$$

де l_{eff} — поточне плече точки відносно центру, $r_k(t) - c_0$ – плече від осі обертання до точки k .

Часова сітка: $dt = 0.01$ с, $T = 20$ с. Додатково розраховується спектр (FFT) і спектрограма (STFT) кожного $S_a(t)$ з параметрами: вікно $N_w = 256$ відліків, перекриття 250 відліків, $N_{FFT} = 256$ відліків, частота дискретизації $f_s = 1/dt$. Це узгоджено з практикою застосування STFT у мікродоплерівському аналізі для виділення гармонік $n\Omega/2\pi$.

Для кожної з чотирьох антен згенеровано відбитий сигнал $s_a(t)$ за 20 с при $dt = 0.01$ с. Хвильові форми демонструють повільну фазову модуляцію, обумовлену мікродоплером, на тлі сталої носійної. Пара антен, розташованих уздовж осі X (A1, A2), дає майже дзеркальні осциляції; те саме спостерігається для пари уздовж Y (A3, A4). Вибір «домінуючого» розсіювача (центр найближчої грані) усуває стрибки фази, що можуть виникати при переключенні між вершинами (рис.2).

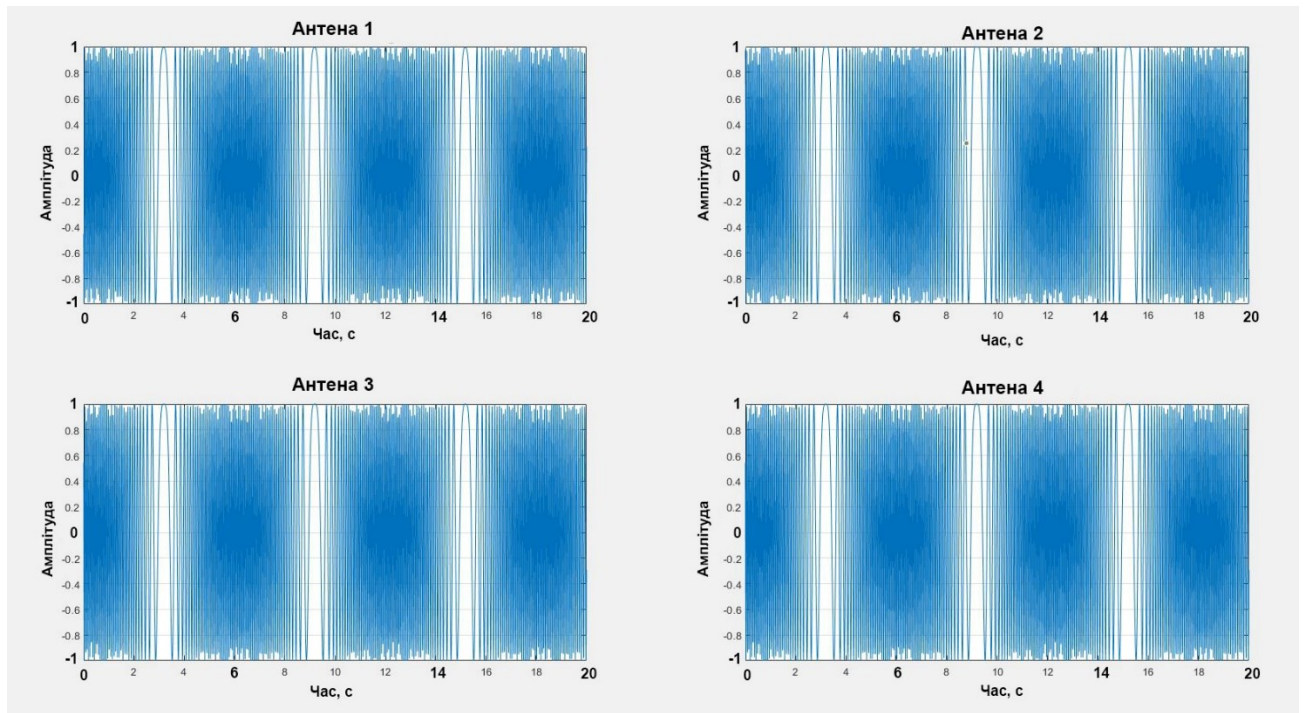


Рис. 2. Фрагмент відбитого сигналу для усіх антен

Однобічний $s_a(t)$ спектр утворює «гребінку» бокових ліній із кроком $f_m = \Omega/2\pi \approx 0.083$ Гц [1], а максимальний доплерівський розкид визначається $\Delta f_{max} = \frac{2}{\lambda} l_p \Omega (\approx 17.5$ Гц), що показано на рисунку 3.

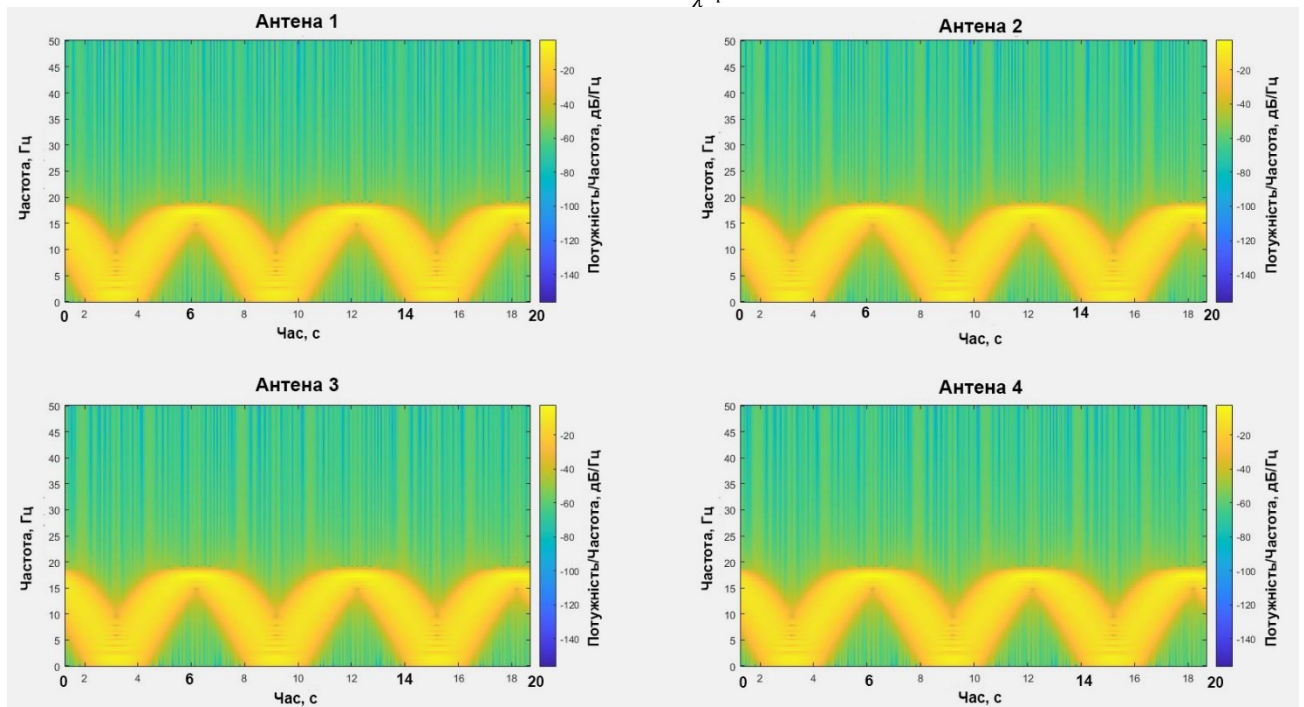


Рис. 3. Спектрограми для антен A1–A4

Моделна оцінка дальності $\hat{R}_a(t) \approx R_{k,a}(t) + l_p \cos(\Omega t + \varphi_0)$ коливається навколо ≈ 1000 м з амплітудою ± 0.5 м. Через відносно велику базову дальність ($R_0 = 1$ км) розміру бази антен (5 м) середні рівні у всіх каналах майже збігаються.

У режимі безперервної хвилі абсолютна R_0 неідентифікована; у даному випадку подано модельну $R_a(t)$, що відтворює мікро-модуляцію та геометрію (рис.4).

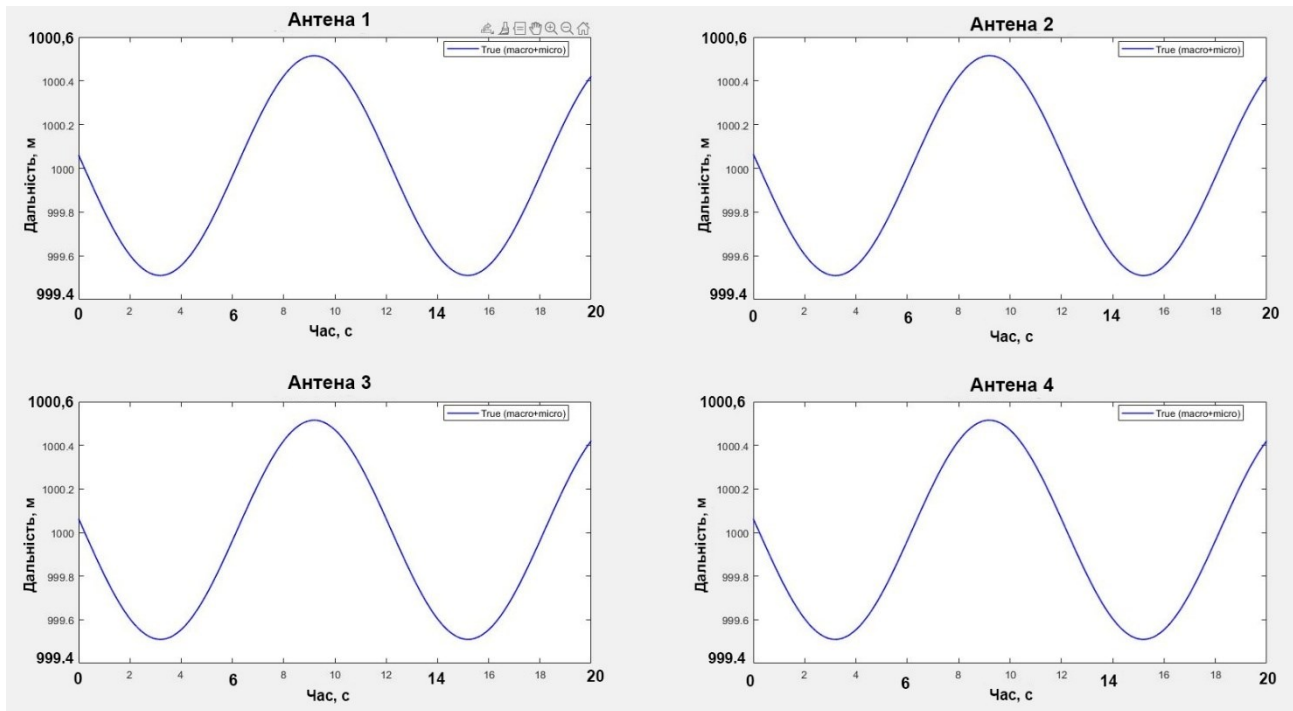


Рис. 4. Модельна оцінка дальності для А1–А4

Поступальна складова швидкості дорівнює нулю, а макро-радіальна швидкість від обертання (для жорсткого тіла) має синусоїдальну форму з амплітудою порядку Ωa та проєкцією на лінію прямої видимості[1].

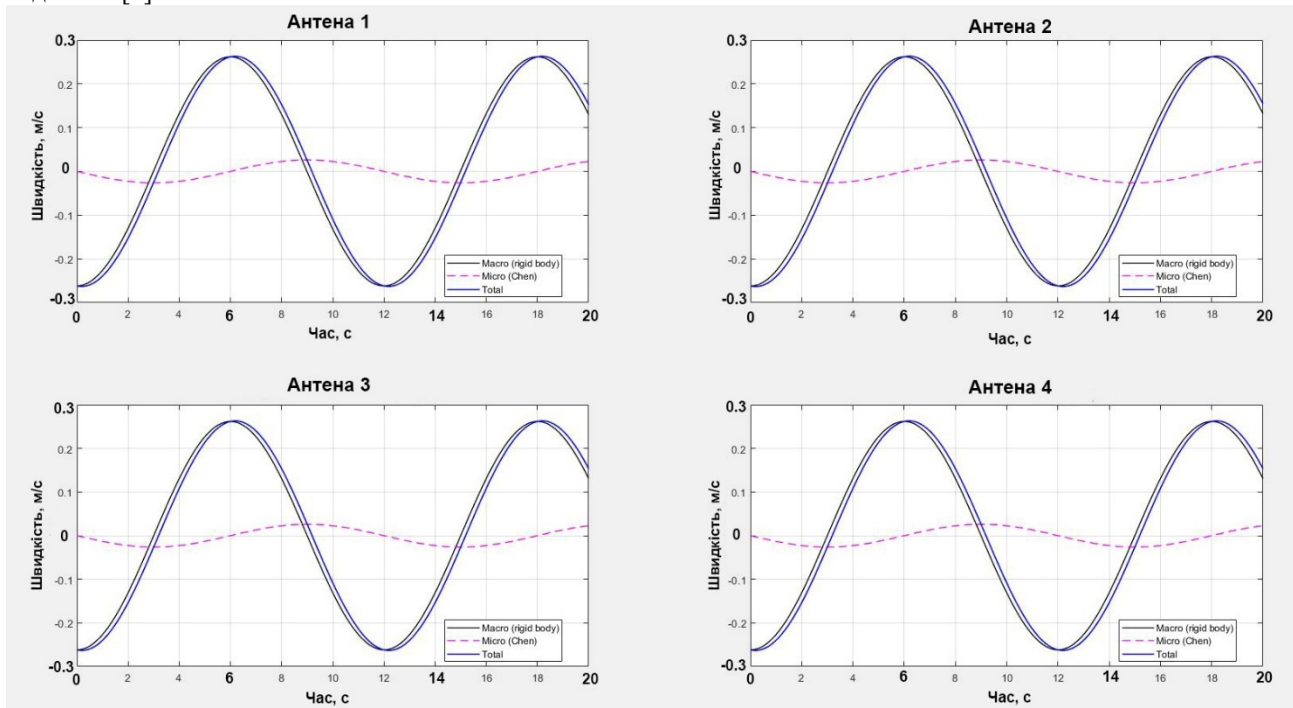


Рис. 5. Графіки $v_r^{\text{macro}}(t)$ та $v_r^{\text{micro}}(t)$

Кут між лінією прямої видимості і віссю Z , $\theta_a = \arccos(\hat{R} \cdot \hat{z})$, змінюється приблизно $\approx 0.286^\circ$ із малою періодичною модуляцією. Це очікувано: за $R_0 \gg a$ сантиметрово-дециметрові поперечні зсуви майже не змінюють промінь(рис.6).

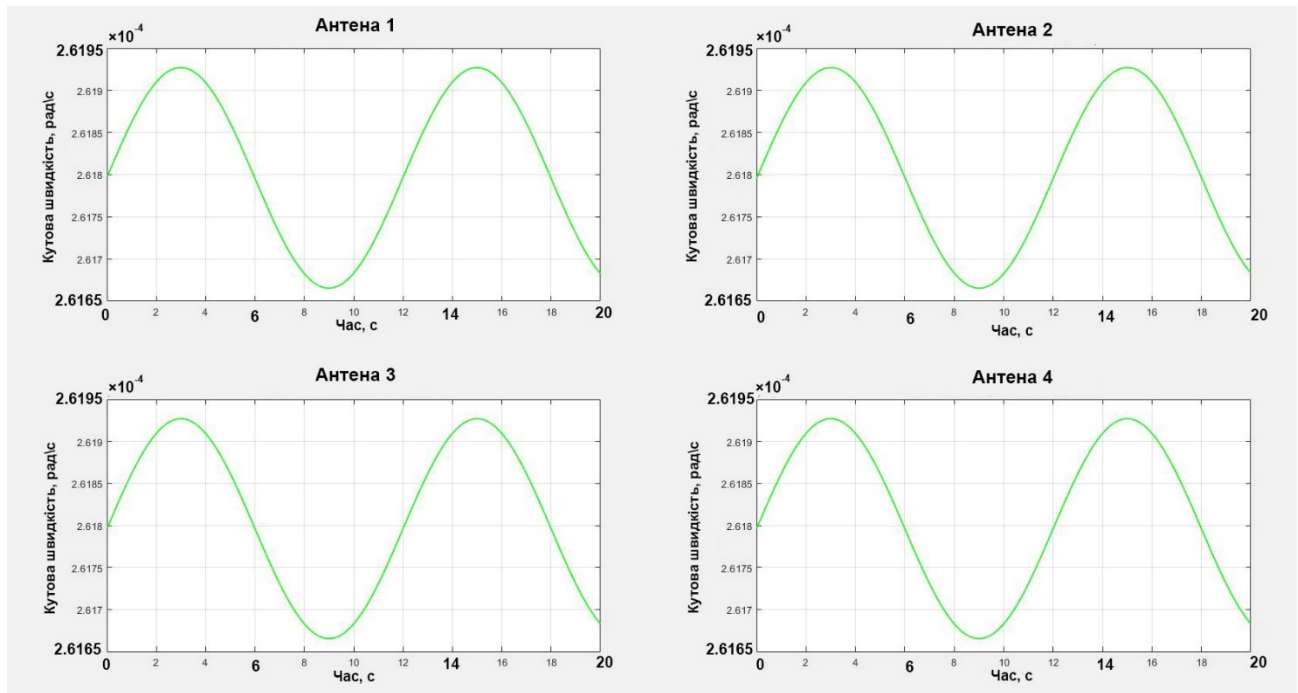


Рис. 6. Куттова швидкість отримана на А1–А4

Видима куттова швидкість $\omega_a^{app}(t) = (l_{eff}/R_0)$ має рівень $\sim 2.6 \times 10^{-4}$ рад/с ($\approx 0.015^\circ/\text{с}$), що узгоджується з оцінкою $(0.5/1000) \cdot 0.5236$.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Створено математичну модель, розроблену в середовищі matlab, яка симулює рух куба, а також випромінювання та відбиття променів від антен, після чого проводяться обчислення отриманого сигналу (спектр, визначення дальності, лінійної швидкості, кутової швидкості).

Отримані результати за допомогою моделювання відповідають аналітичним прогнозам: 1) частотний крок мікродоплерівської гребінки дорівнює $f_m = \Omega/2\pi$; 2) доплерівський розкид встановлюється амплітудою мікрошвидкості $v_m^{max} = l_p \Omega$ через $\Delta f_{max} = \frac{2}{\lambda} v_m^{max}$; 3) кутові показники є малими при $R_0 \gg a$ і масштабуються як a/R_0 .

Результати демонструють що антени чутливі до: 1) амплітуди мікроруку l_p (лінійно масштабує Δf); 2) часу спостереження T і параметрів STFT (визначають роздільність по частоті для малих f_m); 3) вибору моделі амплітуди $\alpha_{a,k}(t)$. Отже, обрана методика моделювання та обчислення дозволяє визначати характеристики руху об'єкту. Подальші дослідження будуть направлені на моделювання більш складних цілей, а також ускладнення траєкторій руху цілі. Запропонована модель може бути використана для генерації синтетичних датасетів.

Література

- [1] Chen V. C., Li F., Ho S.-S., Wechsler H. Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1), 2–21. DOI: 10.1109/TAES.2006.1603402.
- [2] Heading D., et al. ESA EO4Security Micro-Doppler Project. *Remote Sensing*, 2024, 16:1354.
- [3] Passafiume M., et al. Micro-Doppler-Based Classification of Small UAVs Using 77-GHz FMCW Radar. *Sensors*, 2021.
- [4] Duan H., et al. Simulating Micro-Doppler Effects of Helicopter Rotors. *Proc. IEEE ITNEC*, 2024.
- [5] Jung K., Lee J.-I., Kim N., Oh S., Seo D.-W. Classification of Space Objects by Using Deep Learning with Micro-Doppler Signature Images. *Sensors*, 2021, 21(13):4365. DOI: 10.3390/s21134365.
- [6] Anghel A., et al. Micro-Doppler Reconstruction in Spaceborne SAR Images Using Azimuth Time–Frequency Tracking of the Phase History. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015.