

**ВПЛИВ СТРУКТУРИ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ БПЛА
НА УМОВИ ПРИЙМАННЯ РОЗСІЯНИХ РАДІОСИГНАЛІВ
У СИСТЕМАХ РАДІОАКУСТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ**

Курта Є. В.

e-mail: yelyzaveta.kurta@nure.ua

Науковий керівник – проф. Олейніков В.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС
м. Харків, Україна

The paper analyzes the structural and dynamic characteristics of UAV acoustic emission and their influence on the conditions of electromagnetic wave scattering in radioacoustic location systems. It is shown that the first three blade harmonics contribute up to 70% of the total acoustic power, determining the Bragg condition for resonant scattering. The non-stationary nature of the acoustic spectrum caused by flight controller operation and maneuvering is identified as a key factor affecting scattered signal reception. The necessity of adaptive frequency tuning of the probing signal to maintain resonant scattering conditions is substantiated.

Малорозмірні безпілотні літальні апарати (МБПЛА) відіграють ключову роль у сучасних конфліктах. Існуючі методи виявлення - радарні, оптичні, радіопеленгаторні - в умовах міської забудови, малих висот і низької ефективної площини розсіювання ($0,001\text{--}0,01\text{ м}^2$) демонструють суттєві обмеження: недостатню роздільність і підвищений рівень хибних спрацьовувань. Акустичний метод забезпечує приховане виявлення на гранично малих висотах, проте втрачає ефективність на значних відстанях. Перспективним вирішенням цієї суперечності є радіоакустична локація - розсіювання електромагнітних хвиль на акустичних збуреннях, що генеруються МБПЛА у навколишньому середовищі. Реалізація умов резонансного розсіювання електромагнітних хвиль ускладнюються необхідністю узгодження їх параметрів із характеристиками акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів.

Акустичне випромінювання (АВ) МБПЛА формується поєднанням широкопasmового шуму обтікання лопатей та тональних гармонік (75–1000 Гц), зумовлених ефектом витіснення повітря гвинтами. Домінуючий внесок у загальний енергетичний баланс припадає на перші лопатеві гармоніки. Саме ці гармоніки визначають умови формування розсіяного радіосигналу: виконання умови Брегга для низькочастотних компонент АВ (наприклад, $f_a = 170\text{ Гц}$) вимагає РЛС метрового діапазону з громіздкими антенами, тоді як компактні високочастотні системи (1,2 ГГц) взаємодіють лише зі слабкими вищими гармоніками (~1% потужності), що різко знижує ймовірність виявлення. Таким чином, вибір робочої частоти РЛС є ключовим компромісом між масогабаритними характеристиками системи та енерге-

тичною ефективністю виявлення.

Основою спектральної структури АВ є лопатева частота (ВРФ), яка визначається як добуток номера гармоніки, кількості лопатей гвинта та частоти його обертання у герцах, тобто числа обертів за хвилину, переведеного у оберти за секунду. Дискретні складові спектру АВ, пов'язані з шумом обертання та витіснення, як правило, перевищують рівень широкосмугового шуму на 15–20 дБ [1].

Просторова спрямованість АВ МБПЛА є складною і суттєво залежить від номера гармоніки. З підвищенням номера гармоніки форма характеристики спрямованості ускладнюється: ширина пелюсток зменшується, глибина провалів зростає, а напрямок домінуючої пелюстки змінюється [1].

Динаміка АВ у процесі польоту визначається безперервною роботою польотного контролера, який незалежно регулює оберти кожного двигуна для підтримання стабільності апарата. При маневруванні характер змін стає ще більш вираженим: дві різні ВРФ, що характеризують МБПЛА у режимі зависання через дисбаланс між переднім та заднім двигунами, зближуються та розходяться під час фаз прискорення і уповільнення у горизонтальному польоті [2].

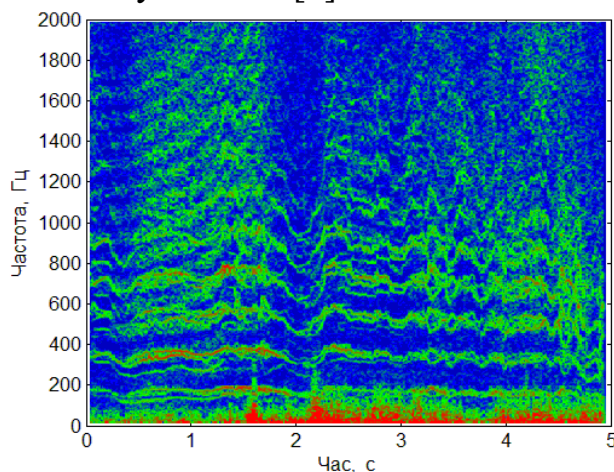


Рис.1 – Спектрограма АВ МБПЛА при маневруванні

На спектрограмі (рис. 1) простежується гребінчаста структура спектра акустичного випромінювання МБПЛА. У діапазоні 0–600 Гц виділяються траєкторії перших лопатевих гармонік з найвищою інтенсивністю. У часовому інтервалі $t \approx 1,6\text{--}2,3$ с спостерігається викривлення траєкторій гармонік – відповідає маневру МБПЛА та перерозподілу обертів між двигунами під дією польотного контролера. Після $t \approx 2,3$ с спектр повертається до квазі-

стаціонарного стану.

Таким чином, динаміка АВ МБПЛА безпосередньо визначає ефективність радіоакустичної локації. Нестационарність спектру, обумовлена роботою польотного контролера, просторова мінливість діаграми спрямованості при маневруванні та залежність інтенсивності випромінювання від режиму польоту - все це формує змінні умови взаємодії електромагнітних хвиль з акустичними збуреннями. Спектральна щільність потужності сигналу на вході приймача РЛС, рис. 2, визначається добутком двох складових: спектра акустичного випромінювання МБПЛА $S(f)$ (жовтий колір ліній), що відображає розподіл енергії АВ за частотою, та коефіцієнта відбиття $K_v(f)$ (синій колір), який характеризує здатність акустичних неоднорідностей відбивати звукові хвилі.

рідностей атмосфери розсіювати електромагнітні хвилі на конкретній частоті. Фізичний зміст цього співвідношення полягає в тому, що РЛС реєструє лише ті частотні складові АВ, для яких одночасно виконуються дві умови: достатня акустична потужність у спектрі МБПЛА та резонансне відбиття електромагнітних хвиль відповідно до умови Брегга (графік червоного кольору).

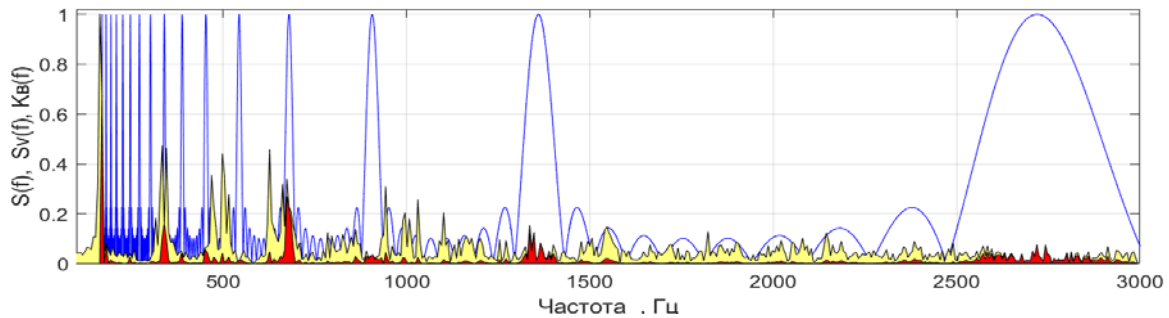


Рис.2 – Спектральна щільність потужності прийнятого сигналу $S_v(f)$, спектр сигналу АВ МБПЛА $S(f)$, частотна характеристика коефіцієнта відбиття $K_v(f)$

Резонансне відбиття при радіоакустичній локації з використанням дифракції вищого порядку спостерігається лише на окремих ділянках спектра АВ МБПЛА. Максимальний рівень прийнятого сигналу досягається тоді, коли частоти домінуючих спектральних компонентів АВ збігаються з частотами пелюсток коефіцієнта відбиття $K_v(f)$, що має періодичну структуру. При цьому навіть незначне відхилення від цих частот призводить до суттєвого зниження рівня розсіяного сигналу.

Отже, для стабільного забезпечення умов резонансного відбиття необхідна адаптація локаційної системи – динамічна зміна частоти зондувального електромагнітного сигналу відповідно до поточних значень умови Брегга.

Список використаних джерел :

1. Oleynikov V. Peculiarities of detecting small-size unmanned aerial vehicles using the radioacoustic location method // Radiotekhnika. 2025. № 222. С. 97–103.
2. Alkmim M., Golliard J., Sijtsma P., Snellen M. Acoustic emission characterization of multirotor UAVs // Journal of the Acoustical Society of America. 2022. Vol. 152, No. 5. – P. 2735–2745.