

В.М. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ МЕТОДОМ РАДІОАКУСТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ

Вступ

Малорозмірні безпілотні літальні апарати (МБПЛА) завдяки своїй багатофункціональності знаходять широке застосування в різних сферах людської діяльності. Вони ефективно використовуються у цивільному секторі, а також стали невід'ємною складовою збройних конфліктів останнього часу [1].

Сучасні МБПЛА характеризуються високою маневреністю, низькою помітністю та здатністю функціонувати в складних умовах експлуатації, включаючи несприятливі зовнішні впливи. Їх виявлення становить надзвичайно складну задачу, що обумовлена компактними габаритами, зниженою радіолокаційною, оптичною, інфрачервоною та акустичною помітністю, а також високою швидкістю і маневреністю. Особливу складність становлять МБПЛА з оптоволоконними каналами зв'язку та МБПЛА з автономним управлінням на базі штучного інтелекту, у яких відсутні активні випромінювання бортового обладнання [2].

Для виявлення, ідентифікації та визначення координат МБПЛА використовуються радіолокаційні, оптичні, інфрачервоні та акустичні методи [3–7]. Однак у складних заводових умовах або на значних відстанях засоби, створені на основі зазначених методів, часто не забезпечують належної оперативності та достовірності виявлення МБПЛА, що свідчить про обмеженість традиційних технологій і потребу в розробці нових підходів до вирішення цієї проблеми.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності виявлення малопомітних МБПЛА є використання явища розсіювання електромагнітних хвиль на акустичних збуреннях, які створюються цими апаратами в навколишньому повітряному середовищі [8–11].

Метою роботи є розгляд структурних та просторових особливостей акустичного випромінювання МБПЛА, а також визначення методом імітаційного моделювання умов формування розсіяного сигналу, що виникає внаслідок дифракції електромагнітних хвиль на неоднорідностях діелектричної проникності атмосфери, спричинених поширенням акустичних хвиль від МБПЛА.

Радіоакустичний метод зондування атмосфери

Можливість відбиття електромагнітних хвиль (ЕМХ) від періодичної структури, утвореної звуковою хвилею в атмосфері була передбачена теоретично, а потім це явище було продемонстровано в експерименті з дифракції світла на ультразвукових хвилях у рідинах та кристалах [12].

В атмосфері відбиття радіохвиль може походити від об'ємних неоднорідностей діелектричної проникності середовища розміром $l = \lambda/2$. Значне збільшення рівня відбитого сигналу відбувається при відбитті радіохвиль від дифракційної решітки, утвореної періодичними неоднорідностями середовища, яке створюють штучно. При радіоакустичному методі зондування (РАЗ) в атмосферу випромінюються короткі звукові імпульси, створюють періодичну зміну діелектричної проникності газів атмосфери. У разі виконання умови Брегга забезпечується когерентне складання розсіяних ЕМХ. Умова Брегга [13, 14] полягає у виконанні наступного співвідношення:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_a} = 2 \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

де λ_e – довжина ЕМХ; λ_a – довжина звукової хвилі; θ – кут розсіювання ЕМХ.

На основі теорії поширення хвиль у шаристонеоднорідних середовищах, для випадку радіоакустичного зондування атмосфери [15], отримано розрахункове співвідношення для коефіцієнта відбиття ЕМХ від звукової посилки:

$$K_{\text{в}}^2 = \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{пер}}} = B \frac{N^2}{R^2} \left[\frac{\sin N\pi(\frac{2\lambda_a}{\lambda_e}-1)}{\sin N\pi(\frac{2\lambda_a}{\lambda_e}-1)} \right]^2 \exp \left[- \int_0^{R_{\text{max}}} \alpha(R) dR \right], \quad (2)$$

де N – число довжин хвиль в акустичному пакеті; $P_{\text{пер}}$ – потужність випромінюваного передавачем радіосигналу; $P_{\text{пр}}$ – потужність радіосигналу, що приймається; R – висота зондування; B – коефіцієнт, що враховує втрати в тракті прийому та обробки; α – коефіцієнт поглинання звуку атмосфери.

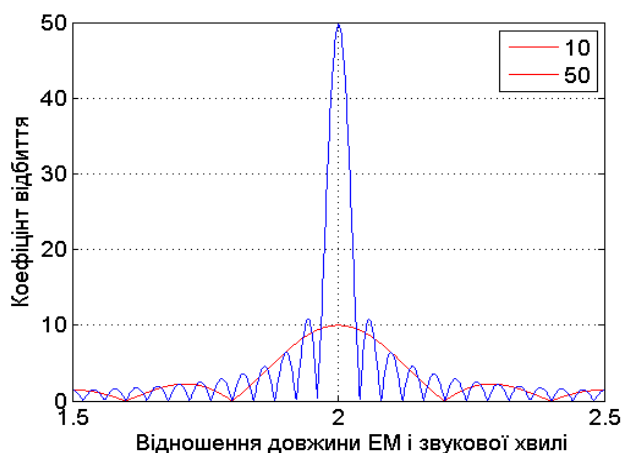


Рис. 1. Залежність коефіцієнта відбиття від співвідношення довжин звукових та ЕМХ при довжині акустичного пакета $N=10$ і $N=50$

Під час зміни частоти акустичних коливань потужність розсіяного електромагнітного випромінювання, а отже й коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від звукового імпульсу змінюються відповідно до функції $(\sin x / x)^2$.

Залежність коефіцієнта відбиття має пелюстковий характер і періодичну структуру. На рис. 1 наведено залежність коефіцієнта відбиття від співвідношення довжин звукових та ЕМХ при довжині акустичного пакета $N=10$ і $N=50$. Відбивна здатність звукової посилки пропорційна квадрату довжини акустичного пакета. Вважається, що оптимальна довжина акустичного пакета лежить у межах 35–50.

Особливості акустичного поля малорозмірного безпілотного літального апарата

ЕМ поле розсіяне на неоднорідностях атмосфери, обумовлене акустичним випромінюванням (АВ) МБПЛА, цілком визначається характеристиками його акустичного поля. АВ МБПЛА має ряд характерних особливостей, які необхідно враховувати при розробці системи радіоакустичної локації. Спектр АВ гвинтомоторної групи МБПЛА має гармонійні складові частоти обертання ротора та гармоніки лопатевої частоти [16, 17]. При обертанні повітряного гвинта виникають коливання тиску повітря, що відбуваються за рахунок витіснення повітря, об'єм якого дорівнює об'єму лопаті повітряного гвинта. Це призводить до появи шуму витіснення. Амплітуди гармонік АВ МБПЛА зменшуються зі збільшенням частоти. Дискретні складові спектру АВ, пов'язані з шумом обертання та взаємодії, як правило, мають на 15–20 дБ вищі рівні ніж широкосмуговий шум обтікання лопаті, кількість гармонік лопатевої частоти до декількох десятків. Частота проходження лопатей сучасних МБПЛА в залежності від режиму роботи і моделі знаходиться у межах від 75 до 1000 Гц.

Для МБПЛА мультироторного типу спектральні лінії гармонік АВ окремих гвинтів згруповані в широкі багатошпикові ділянки спектральної щільності. При збільшенні кількості гвинтів до шести і більше спектр мультироторного сигналу МБПЛА стає шумоподібним.

Формування акустичного поля залежить від характеристик спрямованості випромінювання гвинтомоторної групи МБПЛА. Характеристика спрямованості АВ МБПЛА визначає розподіл випромінюваної акустичної енергії у просторі. На рис. 2 представлено характеристики спрямованості окремих гармонічних складових АВ гвинтомоторної групи квадрокоптера DJI Phantom 3, отримані в натурному експерименті.

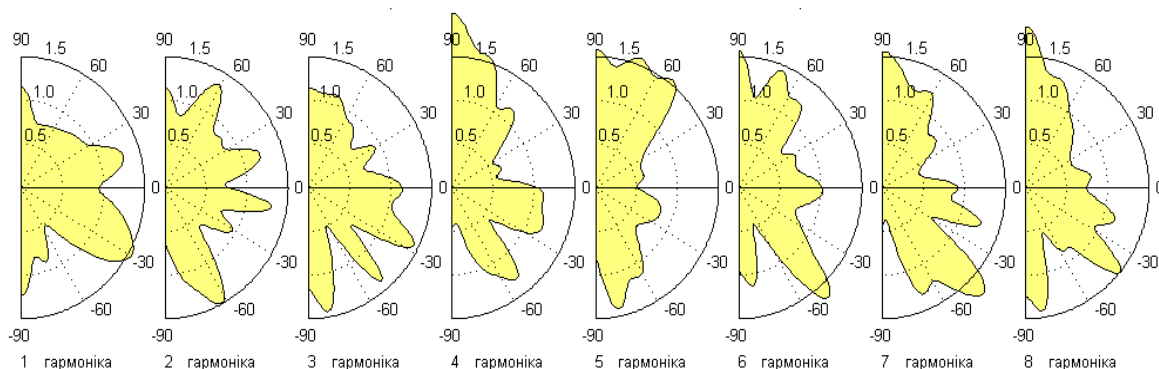


Рис. 2. Переріз 3D характеристики спрямованості окремих гармонійних складових АВ гвинтомоторної групи квадрокоптера DJI Phantom 3

АВ гвинтомоторної групи має складну залежність просторової спрямованості. З підвищенням номера гармоніки АВ спостерігається ускладнення форми характеристики спрямованості – вона стає більш порізаною, з великою глибиною провалів, ширина пелюстків зменшується, відбувається зміна напрямку домінуючої пелюстки АВ. При маневруванні МБПЛА змінюється орієнтація щодо точки спостереження та спрямованість АВ окремих гармонік, що призводить до зміни інтенсивності акустичного поля у точці прийому і форми його спектру.

У процесі польоту МБПЛА положення спектральних ліній АВ на частотній осі є нестабільними та постійно змінюються. Це зумовлено тим, що польотний контролер постійно регулює швидкість обертання кожного двигуна з метою балансування апарата і підтримання стабільного польоту. При цьому частота обертання кожного двигуна змінюється незалежно. Процес регулювання обертів двигунів супроводжується модифікацією спектру АВ у часі, відносна зміна частоти основного тону АВ протягом одиниць секунд може становить десятки відсотків.

Умови отримання розсіяного сигналу при радіоакустичній локації АВ МБПЛА

Порівняймо особливості реалізації радіоакустичного зондування (РАЗ) атмосфери та радіоакустичної локації АВ МБПЛА. Обидві технології ґрунтуються на явищі дифракції електромагнітних хвиль на неоднорідностях діелектричної проникності атмосфери, спричинених поширенням акустичних хвиль.

На рис. 3 наведено геометричну схему просторового розподілу неоднорідностей діелектричної проникності повітря, зумовлених впливом акустичних хвиль: для системи РАЗ – рис. 3, а та для умов радіоакустичної локації МБПЛА – рис. 3, б, в. Також на рисунках показано орієнтацію діаграми спрямованості антен РЛС.

У моностатичному варіанті реалізації системи РАЗ хвильові поверхні окремих періодів АВ майже повністю збігаються з хвильовими поверхнями електромагнітного випромінювання. Це сприяє фокусуванню електромагнітного сигналу та синфазному додаванню електромагнітних коливань, відбитих від окремих хвильових поверхонь акустичного пакета.

Коли антена РЛС орієнтована на джерело АВ, яким є МБПЛА, спостерігається розфокусування ЕМ-хвиль на опуклих і увігнутих сферичних поверхнях акустичної хвилі. Оскільки радіуси кривизни акустичних і електромагнітних хвиль не збігаються, синфазне складання розсіяних ЕМ-хвиль можливе лише для обмежених ділянок хвильової поверхні в межах діаграми спрямованості антени РЛС, вісь якої орієнтована на МБПЛА. У такому випадку в межах діаграми спрямованості можна виокремити дві зони хвильових поверхонь (рис. 3, б): перед МБПЛА – у напрямку до РЛС, і позаду МБПЛА – у напрямку від РЛС. Взаємодія електромагнітних полів, відбитих від акустичних хвиль, що рухаються у протилежних напрямках, призводить до виникнення сигналу, параметри огибаючої якого залежать від швидкості звуку та частоти АВ. Глибина модуляції сигналу на вході приймача РЛС, що виникає внаслідок

док інтерференції, визначається співвідношенням потужностей сигналів, сформованих ділянками, розташованими до і після МБПЛА в межах діаграми спрямованості антени.

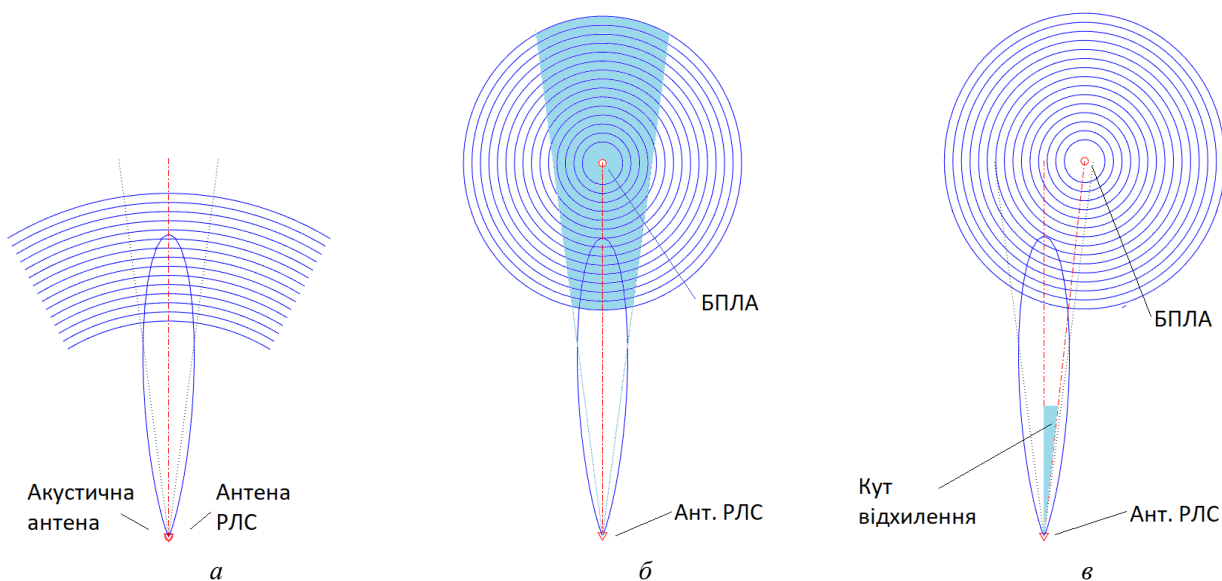


Рис. 3. Орієнтація антен РЛС і геометрична схема просторової структури неоднорідностей діелектричної проникності повітря, що виникає під впливом акустичних хвиль для умов системи РАЗ (а) та умов радіоакустичної локації МБПЛА (б, в)

Для виявлення сигналів, розсіяних на акустичному випромінюванні МБПЛА, важливу роль відіграють його енергетичні характеристики та параметри спектральних складових АВ. На рис. 4 представлено графік залежності частки середньої потужності АВ квадрокоптера DJI Phantom 3 [17] від ширини смуги використаної ділянки спектра сигналу, частота першої

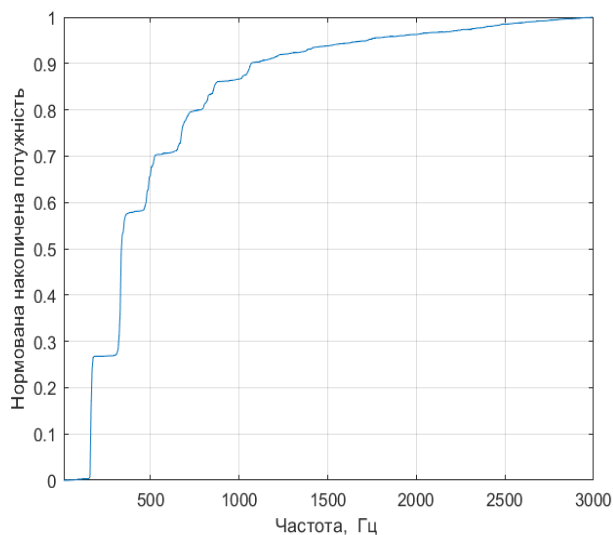


Рис. 4. Частка повної середньої потужності АВ квадрокоптера DJI Phantom 3 в залежності від смуги спектра сигналу, що використовується

МБПЛА є незначною і становить близько 1 %. Відповідно, рівень відбитих електромагнітних хвиль від таких неоднорідностей буде низьким.

лопатевої гармоніки становить $f_a=170$ Гц. Домінуючими за внеском в загальний енергетичний баланс є три перші гармоніки – загалом до 70 % (28, 30 і 12 % відповідно). Частота електромагнітних коливань РЛС, що відповідає умові Брега для частоти першої лопатевої гармоніки, дорівнює $f_e=75$ МГц. Спрямована антена РЛС метрового діапазону хвиль має досить великі габаритні розміри. Для практичного застосування доцільніше використовувати РЛС з вищою робочою частотою, що дозволяє зменшити габаритні розміри антен. Наприклад, на частоті 1,2 ГГц умова Брега виконується для 16-ї лопатевої гармоніки ($f_a=2,72$ кГц) АВ квадрокоптера DJI Phantom 3. Частка акустичної потужності цієї гармоніки в загальному спектрі випромінювання

Виконання умови Брегга можливе і тоді, коли період неоднорідності, утворений акустичною хвилею, дорівнює кратному числу напівхвиль електромагнітного коливання:

$$\lambda_a = m \cdot \lambda_e / 2, \quad (3)$$

де m – порядок дифракції.

При цьому необхідно, щоб вектори акустичної та електромагнітної хвиль збігалися або мали протилежний напрямок. В такому випадку на частоті зондуючого сигналу можливе відбиття, зумовлене дифракцією вищого порядку від перших, найпотужніших лопатевих гармонік АВ МБПЛА (для робочої частоти РЛС 1,2 ГГц частота другої лопатевої гармоніки АВ квадрокоптера DJI Phantom 3 становить $f_a = 340$ Гц, порядок дифракції $m=8$).

При прийомі відбитого від періодичної акустичної неоднорідності спектральна щільність потужності прийнятого сигналу $S_v(f)$ являє собою згортку спектра сигналу АВ МБПЛА $S(f)$ та залежності коефіцієнта відбиття $K_e(f)$:

$$S_v(f) = S(f) \cdot K_e(f). \quad (4)$$

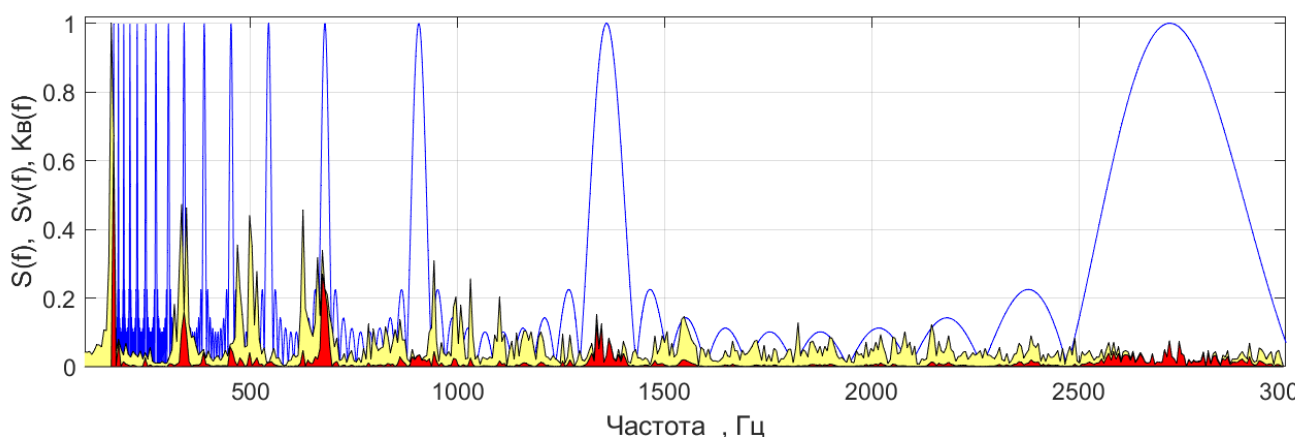


Рис. 5. Спектральна щільність потужності прийнятого сигналу $S_v(f)$ – червоний колір лінії та заливки, спектр сигналу АВ МБПЛА $S(f)$ – жовтий колір лінії та заливки, частотна характеристика коефіцієнта відбиття $K_e(f)$ – синій колір лінії

Як видно з рис. 5, у разі радіоакустичної локації з використанням дифракції вищого порядку резонансне відбиття спостерігається лише на окремих ділянках спектра АВ МБПЛА. Максимальне значення спектральної щільності потужності прийнятого сигналу $S_v(f)$ досягається за умови збігу частот домінуючих спектральних компонентів АВ МБПЛА з частотами пелюсток залежності коефіцієнта відбиття $K_e(f)$, яка має періодичну структуру.

Для забезпечення умов резонансного відбиття від спектральних складових звукового сигналу необхідно змінювати частоту зондувального електромагнітного сигналу, тобто реалізувати адаптацію локаційної системи до зміни умови Брегга. Це дає змогу аналізувати повний частотний діапазон, у якому акустичні хвилі, які формуються сучасними МБПЛА, ефективно відбивають електромагнітні хвилі в резонансному режимі розсіювання [13, 14].

Результати моделювання

У середовищі MATLAB розроблено імітаційну модель процесу формування сигналу при відбитті електромагнітної хвилі від неоднорідностей, зумовлених акустичним випромінюванням МБПЛА. У моделі задаються координати, діаграми спрямованості та орієнтації передавальної й приймальної електромагнітних антен, а також положення МБПЛА у просторі. Основні фактори, що впливають на параметри сигналу: зміна кута між напрямком діаграм спрямованості антен і напрямком на центр АВ МБПЛА, варіації залежності коефіцієнта відбиття та інтенсивності електромагнітного поля, а також зміна відстані.

Неоднорідності діелектричної проникності, зумовлені акустичним випромінюванням МБПЛА, моделювались у вигляді набору блискучих точок (БТ), розташованих на концентричних сферах – хвильових поверхнях акустичних хвиль, які формуються з кроком, що відповідає довжинам хвиль відповідної лопатевої гармоніки випромінювання МБПЛА. З часом радіус окремих сфер збільшується відповідно до швидкості звуку в повітрі.

Для спрощення розрахунків далі розглядається двовимірна просторова модель. У ній акустичні випромінювання МБПЛА подані у вигляді набору БТ, розташованих на концентричних колах з кроком, що відповідає довжинам акустичних хвиль.

У процесі моделювання розраховуються затримки електромагнітного сигналу для кожної БТ на хвильових поверхнях, визначається довжина променів падаючих і відбитих хвиль. Фаза сигналу визначається за зміною відстані. Також задається необхідне співвідношення сигнал/шум для сигналів, що обробляються.

Рівень розсіяного електромагнітного сигналу на вході приймального пристрою визначається шляхом геометричного складання векторів напруженості поля БТ, рівномірно розподілених на хвильових фронтах кожного періоду АВ з урахуванням згасання електромагнітних та акустичних сигналів, коефіцієнта відбиття, форми діаграм спрямованості електромагнітних передавальної та приймальної антен, а також форми діаграми спрямованості АВ МБПЛА.

Годограф напруженості електричного поля розсіяного сигналу, побудований на комплексній площині, дозволяє візуалізувати зміни фази, амплітуди сигналу, оцінити ступінь синфазності. При моделюванні БТ окремих періодів акустичного коливання формують хвилі, що приходять у приймальну антену. При зменшенні інтервалу, на якому розташовані БТ в межах одного періоду АВ, фази сигналів сусідніх БТ змінюються плавно і ламана лінія годографа напруженості електричного поля звертається в плавну криву.

Заумов Брега амплітуди векторів напруженості електричного поля, створюваних окремими хвильовими поверхнями, мало відрізняються між собою. Фаза результуючого вектора, сформованого окремою хвильовою поверхнею, залежить від взаємного розташування БТ, а також від положення передавальної і приймальної антен. Вектори результуючих напруженостей поля, створених сусідніми хвильовими поверхнями, за умови дотримання умови Брега спрямовані в один бік, тобто їхні фази збігаються, а амплітуди визначаються коефіцієнтом відбиття K_v .

На рис. 6 подано годографи напруженості електричного поля розсіяного сигналу у системі РАЗ від однієї хвильової поверхні (а) і від усіх хвильових поверхонь пакета (б).

На кінцях годографа сигналу від однієї хвильової спостерігається зниження рівня сигналу, зумовлене впливом діаграми спрямованості антени. З урахуванням незначного ослаблення акустичного сигналу, внаслідок збільшення відстані (рис. 6, б), для годографа від усіх хвильових поверхонь пакета фіксується векторне складання синфазних складових, що свідчить про сприятливі умови для формування відбитого сигналу.

Розглянемо особливості формування розсіяного сигналу в умовах дифракції електромагнітних хвиль на звукових коливаннях АВ МБПЛА. Будемо вважати, що частота другої лопатевої гармоніки АВ МБПЛА становить $f_a=340$ Гц, робоча частота РЛС 1,2 ГГц, порядок дифракції $m=8$, ширина діаграми спрямованості антени 6° та відстань до МБПЛА 100 м. За умови орієнтації антени РЛС у напрямку на МБПЛА, на рис. 7 представлено годографи напруженості електричного поля розсіяного сигналу від однієї хвильової поверхні (а) і від усіх хвильових поверхонь АВ (б).

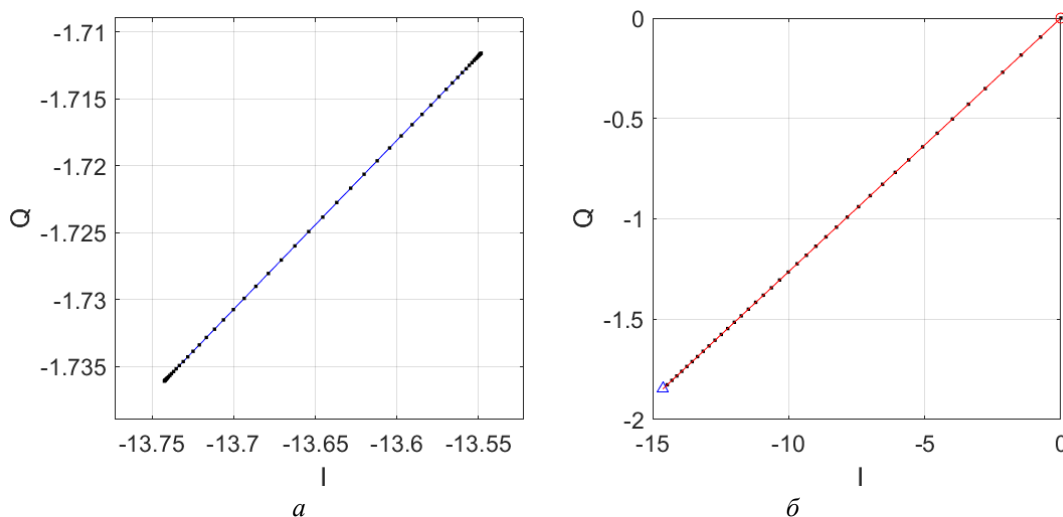


Рис. 6. Годографи відбитого сигналу у системі РАЗ від однієї хвильової поверхні (а) і від усіх хвильових поверхонь пакета (б)

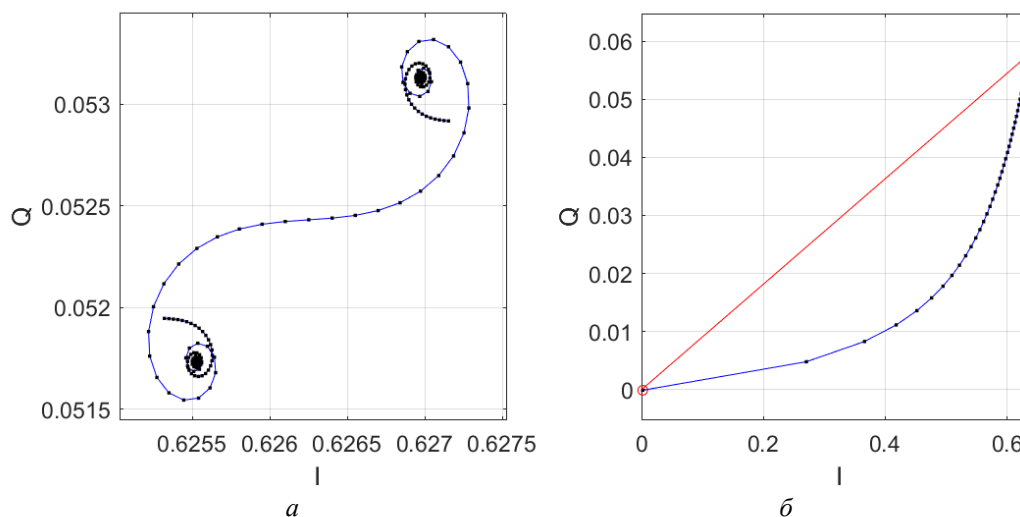


Рис. 7. Годографи відбитого сигналу за умов орієнтації антени РЛС на МБПЛА від однієї хвильової поверхні (а) і від усіх хвильових поверхонь АВ (б)

Основний внесок у результуюче поле дають БТ, розташовані на хвильовій поверхні, в межах якої різниця ходу променів не перевищує половини довжини хвилі тобто, першої зони Френеля. Поля, створювані БТ на краях хвильових поверхонь, де фаза не відповідає умовам синфазності, взаємно компенсуються, на годографі напруженості електричного поля взаємодія цих складових представлена спіралями, що закручуються.

За розглянутих умов формування розсіяного сигналу основна частина енергії прийнятого електромагнітного сигналу формується внаслідок розсіювання на перших 20 періодах акустичних коливань. Подальші коливання мають значно менший вплив на рівень сигналу. На відміну від системи РАЗ, у випадку радіоакустичної локації зростання напруженості електромагнітного поля не є пропорційним кількості хвильових поверхонь, оскільки внесок наступних хвильових поверхонь суттєво зменшується через згасання рівня акустичного сигналу.

На рис. 8 показано годографи напруженості електричного поля розсіяного сигналу у випадку відхилення антени РЛС від напрямку на МБПЛА.

Для оцінки ефективності сумування окремих складових поля розсіяного сигналу введемо нормований коефіцієнт відбиття:

$$K_{\text{вн}} = L_c / L_{\text{св}},$$

де L_c – довжина сумарного вектора, яку одержали у модельному експерименті; L_{cc} – довжина сумарного вектора, за умови повної синфазності окремих складових поля розсіяного сигналу.

За умови орієнтації антени РЛС у напрямку на МБПЛА було проведено дослідження залежності нормованого коефіцієнта відбиття $K_{\text{вн}}$ від ширини діаграми спрямованості антени РЛС для кількох фіксованих відстаней до МБПЛА (75, 150, 225 м). Високі значення коефіцієнта відбиття $K_{\text{вн}}$ досягаються лише за використання високоспрямованих антен із шириною діаграми спрямованості менше ніж 4–6°, що зумовлено необхідністю забезпечення просторової селекції синфазно відбивних ділянок хвильових поверхонь АВ МБПЛА.

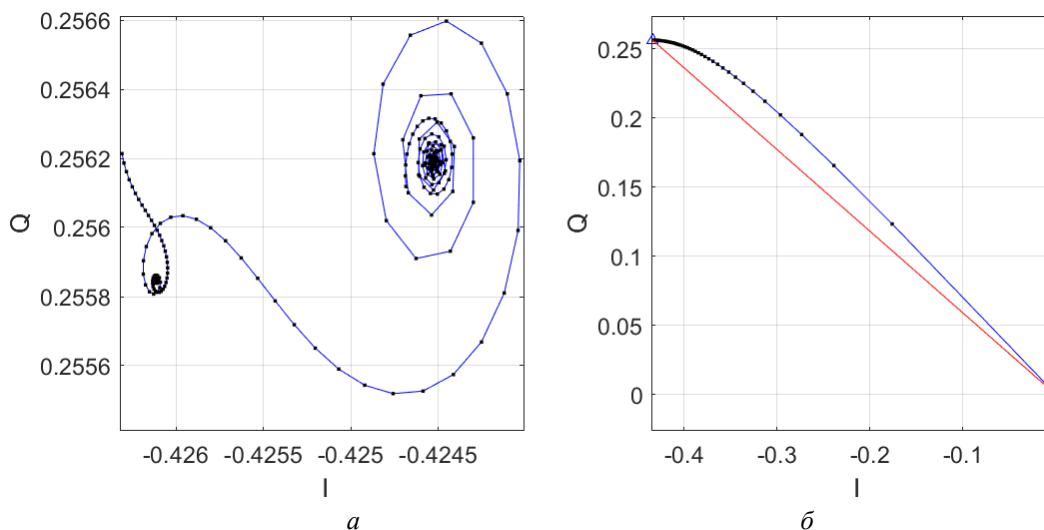


Рис. 8. Годографи відбитого сигналу за умов відхилення антени від напрямку на МБПЛА від однієї хвильової поверхні (а) і від усіх хвильових поверхонь АВ (б)

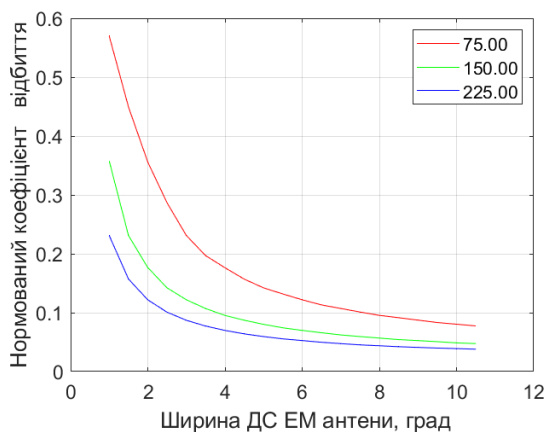


Рис. 9. Залежність нормованого коефіцієнта відбиття від ширини діаграми спрямованості антени при різних відстанях (75, 150, 225 м)

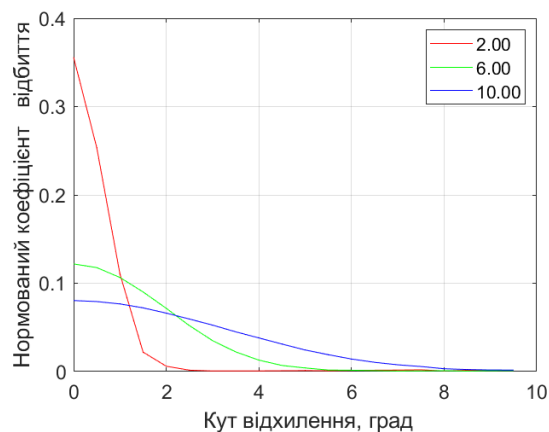


Рис. 10. Залежність нормованого коефіцієнта відбиття від кута відхилення антени від МБПЛА при різних ширині діаграми спрямованості (2°, 6°, 10°)

На рис. 10 показано залежність нормованого коефіцієнта відбиття від кута відхилення антени від МБПЛА за різної ширини діаграми спрямованості (2°, 6°, 10°) у випадку відхилення антени РЛС від напрямку на МБПЛА. Відхилення антени РЛС від напрямку на МБПЛА руйнує умови, за яких забезпечується синфазне складання розсіяних сигналів від хвильових поверхонь акустичного поля МБПЛА.

Висновки

1. Визначається, що сучасні технічні засоби виявлення малопомітних МБПЛА у деяких випадках не забезпечують належної оперативності та достовірності їх виявлення. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності виявлення малопомітних МБПЛА є використання явища розсіювання електромагнітних хвиль на акустичних збуреннях, які створюються цими апаратами в навколишньому повітряному середовищі

2. Спектр акустичного випромінювання МБПЛА містить гармонійні складові частоти обертання ротора та гармоніки лопатевої частоти. Його просторова спрямованість є складною і під час маневрування впливає на інтенсивність і форму спектра прийнятого сигналу.

3. У разі радіоакустичної локації МБПЛА сигнал на вході приймача є результатом інтерференції електромагнітних хвиль, відбитих від акустичних хвиль, що рухаються у протилежних напрямках. Параметри огинаючої цього сигналу залежать від швидкості звуку, частоти акустичного випромінювання, а також від співвідношення потужностей сигналів, сформованих ділянками до і після МБПЛА в межах діаграми спрямованості антени.

4. Робоча смуга частот локаційної системи повинна охоплювати діапазон, у якому забезпечується ефективне резонансне відбиття електромагнітних хвиль. Для зменшення габаритів високоспрямованих антен слід обирати робочу частоту РЛС таким чином, щоб забезпечувалося виконання умов Брегга з використанням дифракції вищих порядків.

5. Методом імітаційного моделювання досліджено особливості дифракції вищих порядків електромагнітних хвиль на акустичному випромінюванні МБПЛА. Встановлено, що основна частина енергії розсіяного сигналу формується на акустичних коливаннях у безпосередній близькості до МБПЛА, тоді як внесок коливань на великих відстанях є незначним через їх згасання.

6. Під час радіоакустичної локації акустичного випромінювання МБПЛА високі значення коефіцієнта відбиття досягаються лише за використання вузькоспрямованих антен із шириною діаграми спрямованості менше ніж $4-6^\circ$, що пов'язано з необхідністю просторової селекції ділянок хвильових поверхонь акустичного випромінювання МБПЛА, що забезпечують синфазне складання розсіяних сигналів.

7. Відхилення антени РЛС від напрямку на МБПЛА руйнує умови, за яких забезпечується синфазне складання розсіяних сигналів від хвильових поверхонь акустичного поля МБПЛА.

Список літератури:

1. Медведєв, В.К., Коренівська, І.С., Хажанець, Ю.А., Салов, А.О. Безпілотні літальні апарати та їхній вплив на перебіг російсько-української війни // Наука і оборона. 2023. №2. С. 52–59.
2. Чому оптоволоконні безпілотники можуть схилити шальки терезів у війні між Україною та Росією. URL: https://vgi.com.ua/en/ukraine-russian-war-fiber-optics/?utm_source=chatgpt.com.
3. Kartashov V.M., Oleynikov V.N., Sheyko S.A., Koryttsev I.V., Babkin S.I., Zubkov O.V. Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition // Telecommunications and Radio Engineering. New York. 2019. Vol. 78, Issue 9. P. 771–781.
4. Олейников В.М., Зубков О.В., Карташов В.М., Коритцев І.В., Бабкін С.І., Шейко С.О. Дослідження ефективності виявлення і розпізнавання малорозмірних безпілотних літальних апаратів по їх акустичному випромінюванню // Радіотехніка. 2018. Вип. 195. С. 209–217.
5. Карташов В.М., Олейников В.Н., Рябуха В.П., Бабкін С.І., Воронін В.В., Капуста А.І., Селезнев І.С. Методи комплексної обробки та інтерпретації радіолокаційних, акустичних, оптичних і інфрачервоних сигналів безпілотних літальних апаратів // Радіотехніка. 2020. Вип. 202. С. 173–182.
6. Карташов В.М., Олейников В.М., Шейко С.О., Бабкін С.І., Коритцев І.В., Зубков О.В. Особливості виявлення та розпізнавання малих безпілотних літальних апаратів // Радіотехніка. 2018. Вип. 195. С. 235–243.
7. Карташов В.М., Посошенко В.О., Воронін В.В., Колесник В.І., Капуста А.І., Рибников М.В., Першин Є.В. Методи виявлення-розпізнавання радіолокаційних, акустичних, оптичних і інфрачервоних сигналів безпілотних літальних апаратів // Радіотехніка. 2021. Вип. 205. С. 138–153.
8. Пат. 127007 Україна, МПК G 01 S 13/00 G 01 S 17/00. Радіоакустичний спосіб виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів / В.В. Семенець та ін. № а 202004704 ; заявл. 24.07.2020 ; опубл. 08.03.2023 ; Бюл. № 10. 9 с.

9. Карташов В.М., Харченко О.І., Посошенко В.О., Колісник В.І., Єгоров А.Б., Тимошенко Л.П., Капуста А.І. Виявлення безпілотних літальних апаратів з використанням розсіювання радіохвиль на акустичних об'єктах середовища, що створюються літальними апаратами // Радіотехніка. 2021. Вип. 206. С. 122–130.
10. Карташов В.М., Посошенко В.О., Колісник В.І. та ін. Виявлення радіолокаційних сигналів, розсіяних на акустичних збудженнях, створюваних БПЛА // Радіотехніка. 2021. Вип. 207. С. 113–122.
11. Карташов В.М., Посошенко В.О., Колісник К.В., Колісник В.І., Бобнів Р.О., Капуста А.І. Алгоритм оцінювання розподілу енергії радіолокаційних сигналів, які розсіюються на акустичних збудженнях, створених МБПЛА // Радіотехніка. 2022. Вип. 211. С. 16–25.
12. Борн М., Вольф Е. Основы оптики. 1973. 719 с.
13. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. 1985. 196 с.
14. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Б.Л. Канцева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. Разд. 2. Радиоакустическое зондирование пограничного слоя атмосферы. Харьков : Коллегиум, 2002. С. 44–98.
15. Прошкин Б. Г. Определение основных метеорологических величин в пограничном слое атмосферы методом радиоакустического зондирования // Радиотехника. 1996. Вип. 100. С. 196–204.
16. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В., Анохин М.А. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2017. Вип. 191. С. 181–187.
17. Oleynikov V.N., Kartashov, V.M., Babkin, S. I., Zubkov, O.V., Korytsev I.V., Sheiko, S.A., Seleznev I.S. Structure and Parameter Unmanned Aerial Vehicles Sound Fields // Telecommunications and Radio Engineering. New York. 2020. Vol. 79, №17. P.1539–1550.

Надійшла до редколегії 28.05.2025

Відомості про автора:

Олейников Владимир Миколайович – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Україна; e-mail: vladimir.oleinikov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3358-5987>