

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.М. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук,
І.С. СЕЛЄЗНЬОВ, О.В. КАРТАШОВ*

ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Вступ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) набули широкого застосування в багатьох областях людської діяльності. Вони здатні виконувати великий набір корисних функцій [1 – 3]: доставка вантажів, здійснення аерофотозйомки поверхні, виявлення порушень технічного стану об'єктів, оцінка ступеня вирубки лісових масивів тощо. Військові використовують БПЛА для виконання таких задач, як розвідка місцевості, ретрансляція радіосигналів, постановка перешкод радіозасобам супротивника та ін. В той же час БПЛА можуть нести також значну фізичну або інформаційну загрозу у господарській діяльності, приватному житті людей [2, 4]. Тому задача виявлення безпілотних літальних апаратів і протидії їх несанкціонованим діям є дуже актуальною.

Найчастіше для виявлення безпілотних літальних апаратів використовуються радіолокаційні, акустичні та оптичні методи і засоби [1, 2, 5]. Функціонування пасивних акустичних локаторів – содарів засновано на прийомі звукових коливань пружного середовища, випромінюваних БПЛА у процесі польоту. Основними джерелами акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів є двигуни БПЛА та їх гвинти.

Дослідженням шумових показників БПЛА присвячені роботи [5 – 15]. Як впливає з результатів досліджень, сумарний спектр акустичного випромінювання (АВ) малого БПЛА обумовлений гармонійними та ширококутовими складовими. У шумі силової установки БПЛА, що має поршневий двигун повітряного охолодження, особливо за відсутності в його вихлопному тракті глушника, визначальним джерелом акустичного випромінювання є саме двигун. Експериментальні дослідження шумів БПЛА проводилися в різних умовах: у камері, що немає луни [11], та в реальних умовах при польотах в атмосфері [7, 10, 12, 13]. Значний інтерес мають для практики АВ БПЛА з електричними гвинтомоторними системами, актуальним є також питання вивчення особливостей формування сумарного звукового поля у процесі їхнього польоту.

Рівень акустичного шуму електричних рухових систем значно нижчий, ніж двигунів внутрішнього згоряння. У разі застосування малих БПЛА, що мають малі габаритні розміри та малопотужні електродвигуни і не мають радіоканалу керування, основним напрямом їх виявлення стають акустичні спостереження [16, 17].

Таким чином, в області дослідження АВ БПЛА отримано деякі результати, але вони досить суперечливі. В деяких літературних джерелах стверджується, що АВ безпілотних літальних апаратів є практично ізотропним, а результати експериментів інших авторів показують, що воно є досить спрямованим. Тому потрібне уточнення наявних характеристик АВ БПЛА. Переважна кількість експериментальних результатів у літературі [3 – 16], присвячених цьому питанню, представлені у вигляді двомірних залежностей. У даному дослідженні ставиться завдання з отримання тривимірних залежностей, що дозволить більш наочно представити отримані в експерименті результати вимірювань.

1. Опис експериментальної установки

Спрямованість звукового поля безпілотних літальних апаратів характеризується деякими загальними закономірностями, а, з іншого боку, кожен тип БПЛА має свої певні особливості, які також позначаються в процесі його виявлення та пеленгації. Шум повітряного гвинта утворюється, в основному, внаслідок взаємодії лопатей з навколишнім середовищем у процесі створення тяги та при витісненні повітря з фіксованого обсягу середовища. Генерація

акустичного випромінювання може відбуватися також і при аеродинамічній взаємодії лопатей з турбулентними утвореннями в потоці, що набігає. Відповідно до цього шум малозавантаженого гвинта зазвичай поділяють на шум обертання та широкосмуговий «вихревий» шум.

Об'єктом дослідження в даній роботі виступав БПЛА громадянського типу «Dji Phantom 3», зовнішній вигляд якого представлено на рис. 1 із такими характеристиками:

- тип планера: мультикоптер;
- кількість гвинтів: 4;
- кількість лопатей на гвинтах: 2;
- тип двигунів: електричні;
- маса: 1280 грам;
- максимальний час польоту: 25 хв;
- максимальна швидкість польоту: 58 км/год;
- максимальна висота польоту: 500 м.



Рис. 1. Зовнішній вигляд БПЛА «Dji Phantom 3»

Експеримент з запису АВ БПЛА проводився у «заглушеній» камері з розмірами 3м*3м*2.5 м (ширина*довжина*висота), стіни якої покриті звукопоглинальними панелями із поверхнею спеціальної геометричної форми, що має вигляд пірамід.

Мікрофон розташовувався на металевій жорстко закріпленій штанзі, яка має можливість обертання навколо об'єкту дослідження та фіксації у необхідному положенні (рис. 2). Експериментальна установка включає БПЛА, закріпленій на поворотній штанзі, мікрофон для запису звуку, та поворотну штангу для мікрофону.

Задача з отримання характеристик спрямованості літального апарату виконується наступним чином: БПЛА обертається на поворотному пристрої за азимутом, займаючи деякі фіксовані положення через певні проміжки. В певному секторі та на певній відстані від БПЛА обертається за кутом місця мікрофон, який фіксує рівень акустичного тиску шуму БПЛА. Так, при фіксованому кутовому положенні БПЛА мікрофон обертається від 0 до 180°, фіксуючи в кожному кутовому положенні рівень шуму у просторі навколо БПЛА. За отриманими результатами далі будуються характеристики спрямованості акустичного шумового поля літального апарату.

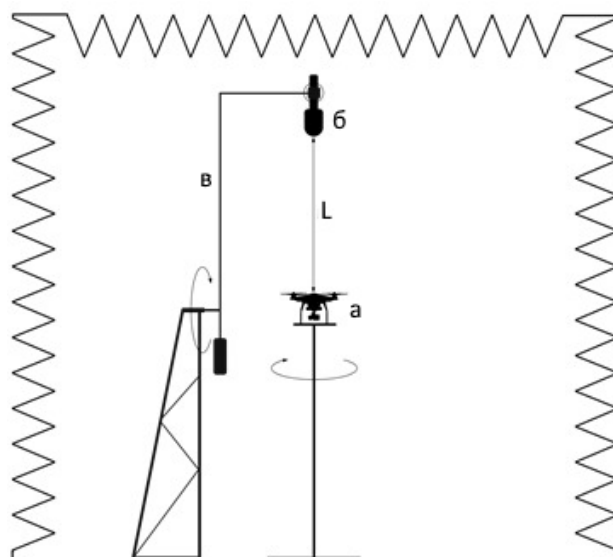


Рис. 2. Схема розташування засобів експериментальної установки для вимірювання характеристик спрямованості акустичного випромінювання БПЛА у вертикальній площині, вид спереду:
 а – об’єкт дослідження; б – мікрофон; в – штанга мікрофону;
 L – відстань від об’єкта вимірювання до мікрофону (1 м)

Акустичне випромінювання об’єкту дослідження записувалось з використанням мікрофону «Suprflux ECM999», якій має такі характеристики:

- тип: конденсаторний;
- характеристика спрямованості: неспрямований;
- частотний діапазон: 20 – 20 кГц;
- динамічний діапазон: 106 дБ;
- сигнал/шум: 70 дБ;
- імпеданс: 200 Ом;
- максимальний звуковий тиск: 132 дБ.

Мікрофон підключався до зовнішньої звукової карти «Behringer U-Phoria UMC404HD» з використанням аудіо-інтерфейсу XLR, якій забезпечує можливість підключення необхідної апаратури при записі акустичного випромінювання (рис. 3).

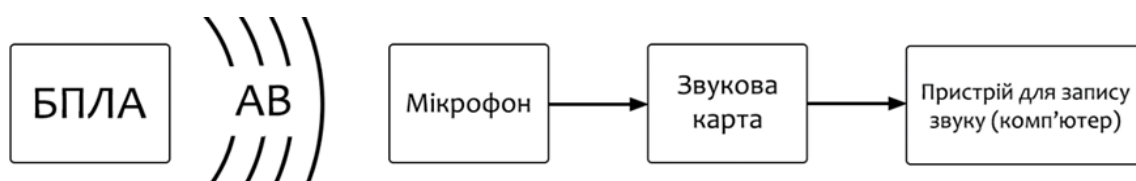


Рис. 3. Функціональна схема з запису акустичного випромінювання БПЛА

Під час тестових замірів було встановлено, що відстані у 1 м достатньо для мінімізації впливу повітряного потоку від лопатей на запис та отримання результатів вимірювання, придатних для подальшої обробки програмними засобами.

Запис АВ БПЛА у вертикальній площині проводився із кроком у 15°, починаючи від 0° до 180°. Точки із вертикальним зміщенням у просторі, у яких проводився запис, позначено на рис. 4, а позначками – в, г, д.

На рис. 2 та 4 літера L позначає відстань від БПЛА до мікрофону, яка дорівнює 1 м.

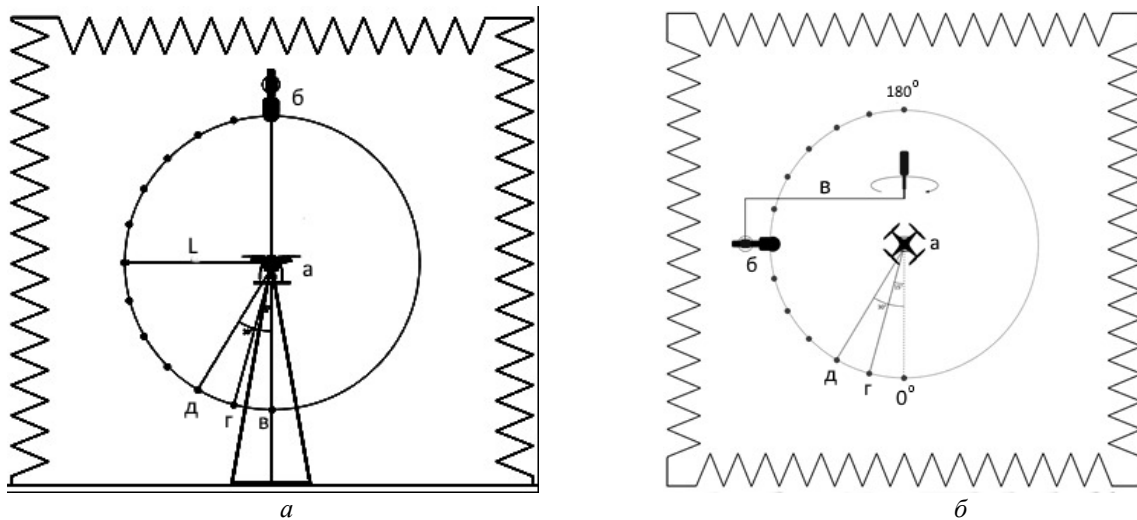


Рис. 4. Схема розташування компонентів експериментальної установки для вимірювання характеристик спрямованості звукового поля БПЛА: *a* – у вертикальній площині, вид збоку, *б* – у горизонтальній площині; *a* – об’єкт дослідження; *б* – мікрофон; *в* – штанга мікрофону; *г*, *д* – точки, у яких проводився запис сигналу

Для того щоб отримати характеристики спрямованості АВ БПЛА у об’ємному вигляді, потрібно мати дані у вертикальній і у горизонтальній площині. Запис АВ БПЛА у горизонтальній площині також проводився із кроком у 15° в діапазоні кутів від 0° до 180° . Точки у просторі, у яких виконувався запис із горизонтальним зміщенням, позначено на рис. 4, *б* позначками – *г*, *д*.

Запис АВ проводився в першому експерименті спочатку при відсутності, а далі при наявності гвинтів, на повній швидкості їх обертання, а у другому експерименті – у режимі статичного польоту БПЛА (планування на місці).

Після того, як акустичне випромінювання об’єкта досліджень було записано єдиною звуковою доріжкою, звуковий ряд було «нарізане» у програмному пакеті Sony Sound Forge на окремі фрагменти, що відповідають точкам у просторі, у яких проводився запис.

2. 2Д подання характеристик звукового поля БПЛА

За допомогою інструментів програмного пакету MathLab було виконано спектральний аналіз акустичного сигналу БПЛА, якій подано на рис. 5, *а*. З рис. 5, *а* видно, що АВ БПЛА представляє собою за структурою ширококутовий сигнал. Найбільшу потужність мають спектральні складові у частотному діапазоні до 500 Гц, де найбільшою за амплітудою є перша гармоніка, а далі має місце зменшення складових спектру до рівня шуму навколишнього середовища.

Звукове поле повітряного гвинта формується при періодичній дії на повітряне середовище лопатей БПЛА [10, 12, 14, 15]. Коливання тиску повітря за рахунок витіснення із середовища обсягу, рівного обсягу лопаті гвинта, при його обертанні, призводять до появи шуму витіснення. Основна частота проходження лопатей повітряного гвинта дорівнює частоті обертання ротора, помноженої на число лопатей. Спектр шуму гвинта має гармонійні складові частоти обертання ротора і гармоніки лопатевої частоти (рис. 5, *а*). Частоти гармонійних складових у спектрі шуму повітряного гвинта визначаються відповідно до виразу $f_b = knN$, де k – номер гармоніки, n – частота обертання ротора (про/с), N – число лопатей.

Крім цього, внаслідок вихору біля лопатей повітряного гвинта виникає так званий «вихровий звук» – ширококутовий шум обтікання лопаті. При обтіканні лопаті повітрям утворюється прикордонний шар, в якому зосереджено дію в’язкості, а стікання з лопаті прикордонного шару призводить до вихроутворення. Інтенсивність вихорів залежить від форми

лопаті і швидкості потоку, що набігає. Спектр шуму вихроутворення є безперервним за частотою (рис. 5, а).

Дискретні складові спектру АВ, пов'язані з шумом обертання та взаємодії, і, як правило, мають на 15 – 20 дБ вищі рівні, ніж широкосмуговий шум обтікання лопаті.

Діаграми спрямованості АВ БПЛА у горизонтальній площині, для випадку обертання усіх гвинтів на максимальній швидкості (позначена цифрою 1), та АВ двигунів без гвинтів (цифра 2) представлені на рис. 5, б.

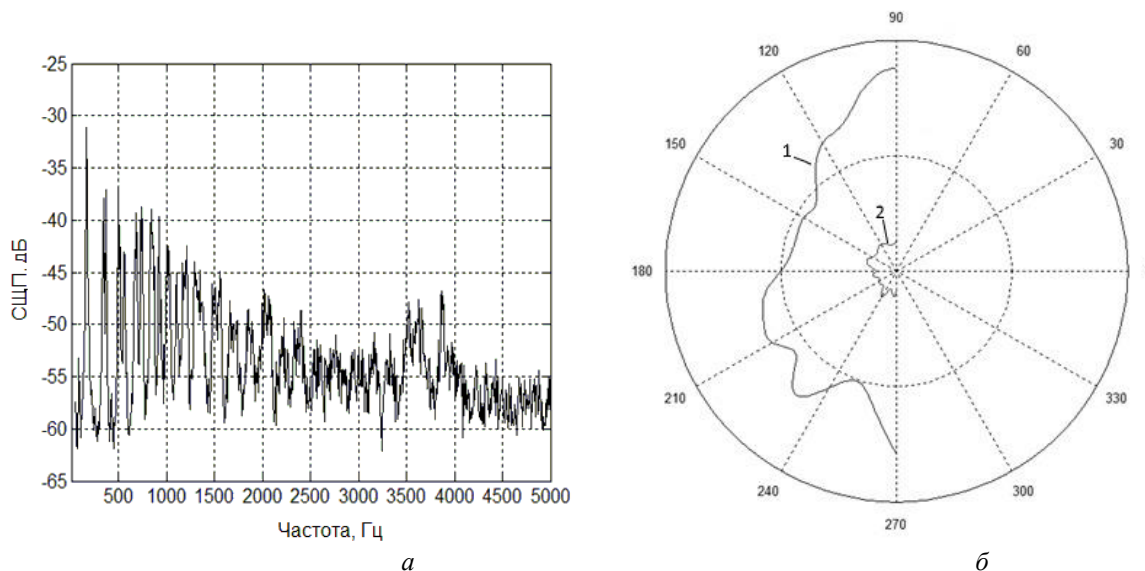


Рис. 5. а – Спектр акустичного випромінювання квадрокоптера «Dji Phantom 3», б – Діаграми спрямованості АВ гвинтів (1) та двигунів БПЛА (2) у вертикальній площині

З рис. 5, б бачимо, що при відсутності гвинтів акустичне випромінювання досліджуваного об'єкта значне слабкіше за рівнем.

На рис. 6 подано діаграми спрямованості перших чотирьох гармонійних складових спектру АВ у горизонтальній площині для випадку присутності гвинтів БПЛА та максимальної швидкості їх обертання. Також слід зазначити, що характеристики, зображені на рис. 5 та 6, були отримані у вільному просторі.

Аналіз спрямованості АВ БПЛА у вертикальній площині у певної смуги частот показує, що з підвищенням номеру гармоніки спостерігаються зміна форми характеристики спрямованості.

Аналіз спрямованості АВ БПЛА у вертикальній площині у певної смуги частот показує, що з підвищенням номеру гармоніки спостерігаються зміна форми характеристики спрямованості.

З отриманих результатів випливає, що залежно від ракурсу спостереження БПЛА, спектральні складові акустичного випромінювання на частотах гармонік, що визначаються характеристиками спрямованості, мають різні рівні.

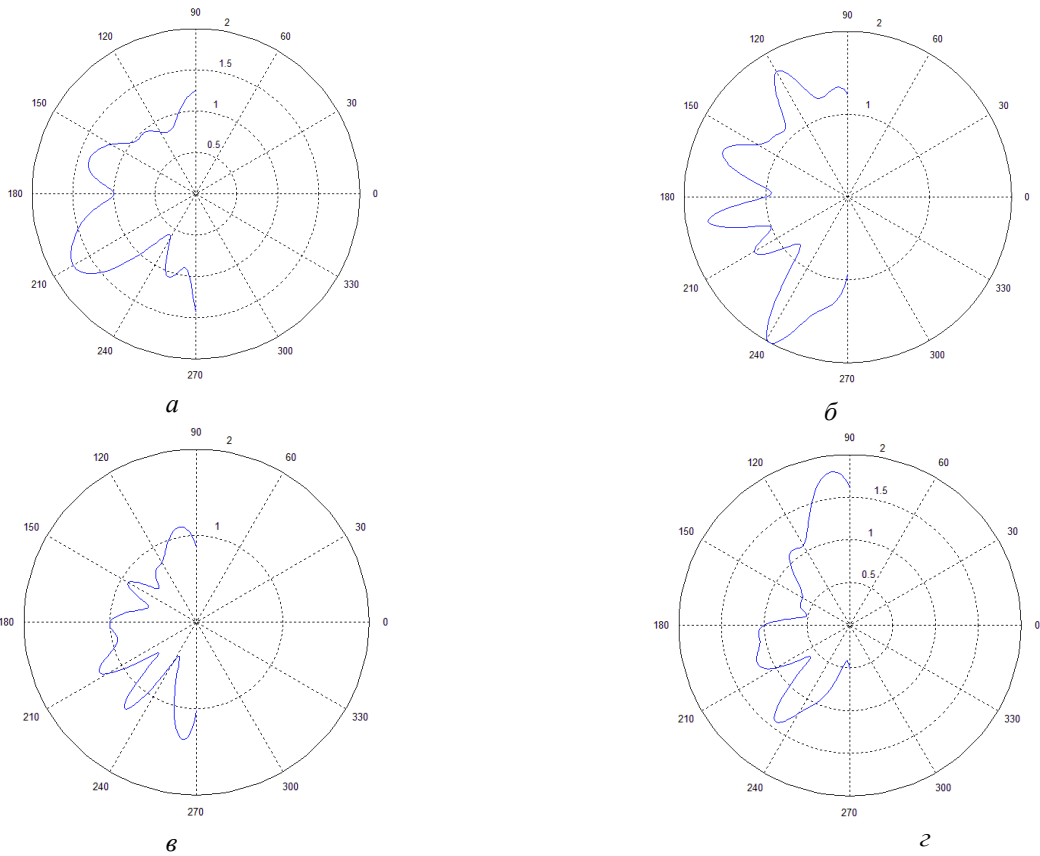


Рис. 6. Діаграми спрямованості гармонік спектру АВ БПЛА у вертикальній площині для випадку максимальної швидкості обертання гвинтів:

а – першая гармоніка; *б* – друга гармоніка; *в* – третя гармоніка; *г* – четверта гармоніка

На рис. 7 – 11 зображено діаграми спрямованості акустичного випромінювання БПЛА у вертикальній площині, отримані при зміні значень азимуту від 0° до 180° , з кроком у 15° . Експеримент проводився у заглушеній камері при невеликій швидкості обертання гвинтів БПЛА, оскільки спостерігався ефект підвищеного шуму при потраплянні набігу повітря від гвинтів на мікрофон. Тривалість запису у кожній точці простору становила 10 с. Також слід зазначити, що при обертанні БПЛА по азимуту під час вимірювання бортова навігаційна система постійно намагається компенсувати положення безпілотної системи у просторі. Оскільки навігаційна система БПЛА орієнтована на підтримання корпусу у заданому положенні (а також за тангажем), спостерігається зміння обертів гвинтів. Як видно з рисунків, кожному значенню азимуту відповідає своя за формою характеристика спрямованості, але слід відзначити, що деякі характеристики частково повторюють одна одну.

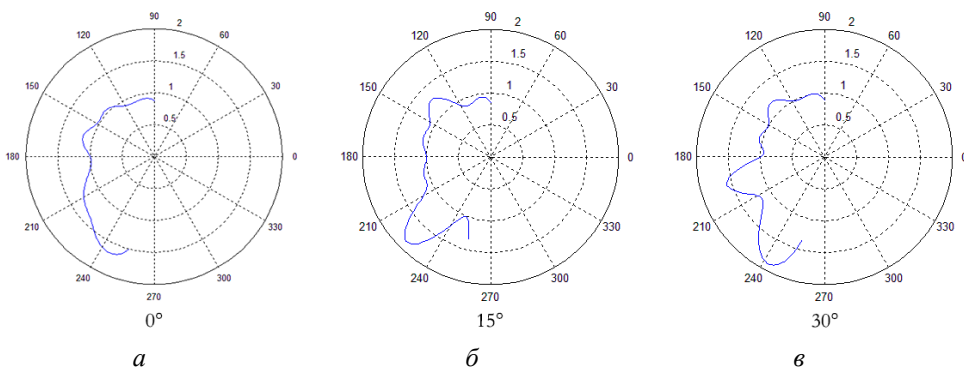


Рис. 7. Діаграми спрямованості АВ БПЛА у вертикальній площині при мінімальній швидкості обертання гвинтів для значень азимуту: *а* – 0° ; *б* – 15° ; *в* – 30°

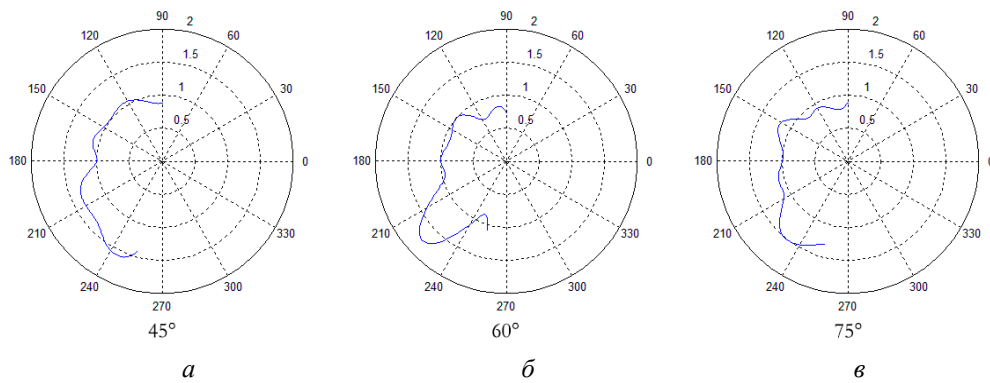


Рис. 8. Діаграми спрямованості АВ БПЛА у вертикальній площині при мінімальній швидкості обертання гвинтів для значень азимуту: *a* – 45°; *б* – 60°; *в* – 75°

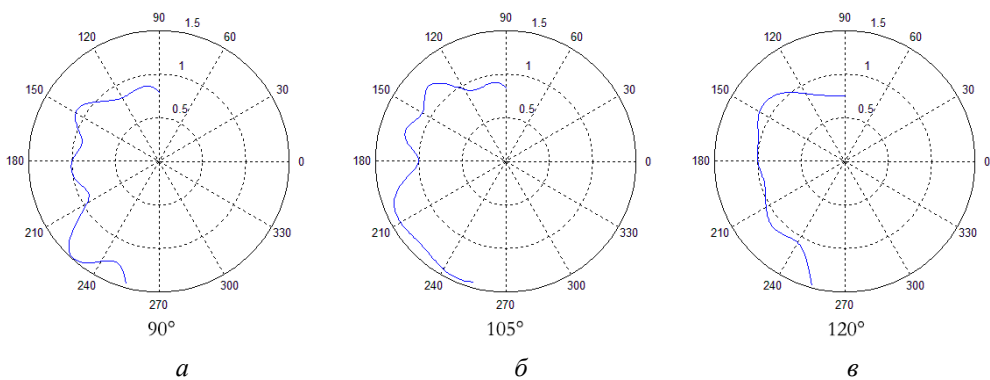


Рис. 9. Діаграми спрямованості АВ БПЛА у вертикальній площині при мінімальній швидкості обертання гвинтів для значень азимуту: *a* – 90°; *б* – 105°; *в* – 120°

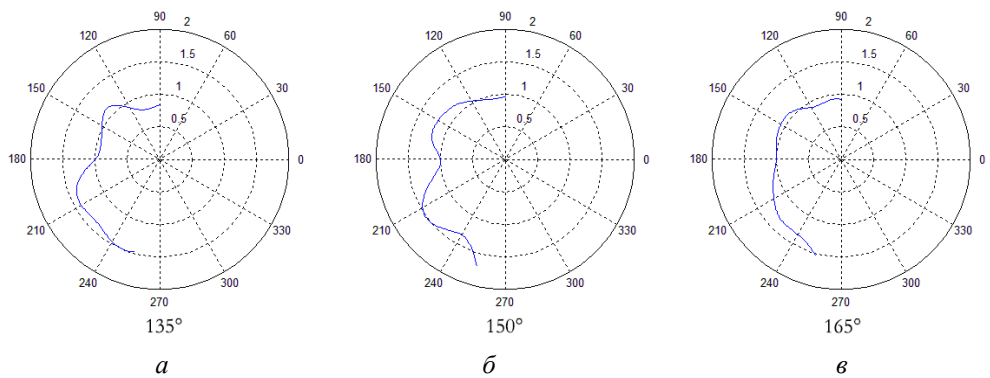


Рис. 10. Діаграми спрямованості АВ БПЛА у вертикальній площині при мінімальній швидкості обертання гвинтів для значень азимуту: *a* – 135°; *б* – 150°; *в* – 165°

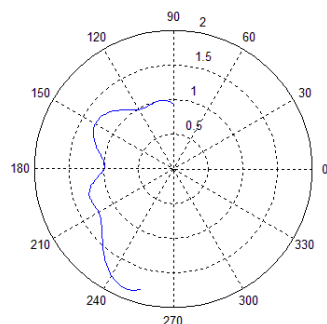


Рис. 11. Діаграма спрямованості АВ БПЛА у вертикальній площині при мінімальній швидкості обертання гвинтів для значення азимуту 180°

3. 3D подання характеристик звукового поля БПЛА

Для побудови 3D характеристик акустичного випромінювання БПЛА використовувались дані, отримані при вимірюванні двомірних діаграм спрямованості у вертикальній площині в тринадцяти перерізах при значеннях азимуту: 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° , 105° , 120° , 135° , 150° , 165° та 180° (рис. 7 – 11).

Програмним пакетом для реалізації тривимірних візуалізацій було обрано пакет Maxon Cinema 4D. Широкий інструментарій по роботі з камерою та наявність великої кількості модифікаторів у цій програмі дозволяють створення анімацій. Є значний набір інструментів для підтримки моделювання, малювання, скульптингу, композитингу, трекінгу, анімації та рендерингу. Cinema 4D є універсальною комплексною програмою для створення та редагування дво- та тривимірних ефектів та об'єктів. Програмування здійснюється чотирма мовами: Python, C++, C.O.F.F.E.E., Xpresso. Текстурування виконується за допомогою середовищ 3ds Max та Maya.

Підготовка з подання результатів експериментальних вимірювань у тривимірному просторі проводилось комбінованим методом. На першому етапі було створено контури моделі за допомогою сплайнів (рис. 12), а на другому – побудована за цими сплайнами полігональна геометрія об'єкту моделювання.

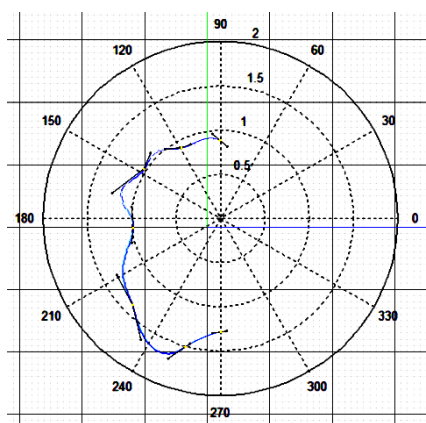


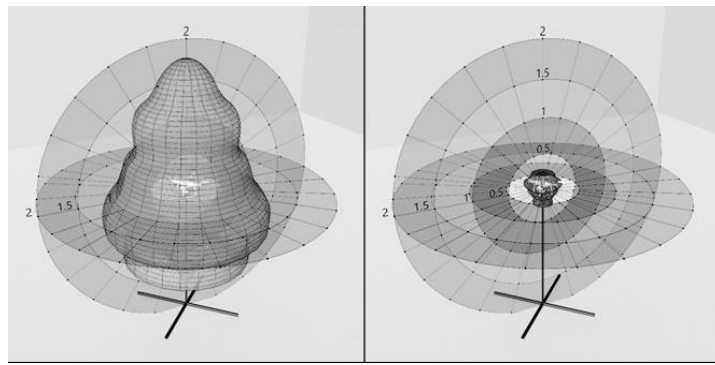
Рис. 12. Контур моделі діаграми спрямованості об'єкта, створений за допомогою сплайну, у вертикальній площині для значення азимуту 0°

На рис. 13 зображено 3D діаграми спрямованості АВ гвинтів та двигунів БПЛА, побудовані за результатами експериментальних досліджень.

Як бачимо на рис. 13, сумарне випромінювання всіх спектральних складових АВ не є ізотропним, воно має виражену просторову спрямованість. Характеристика спрямованості АВ електродвигунів БПЛА суттєво відрізняється від характеристики спрямованості випромінювання гвинтомоторної групи, оскільки має іншу фізичну природу формування сигналу. Для АВ електродвигунів спостерігається ефект екранування у нижній півсфері, обумовлений наявністю пластикового кожуха двигуна.

На рис. 14 зображено 3D діаграми спрямованості АВ БПЛА для чотирьох гармонічних складових з акустичного сигналу. Поверхні отримані за допомогою модифікатора, який за контурами обертання сформованих сплайнів дозволяє отримати тривимірні фігури кожної з діаграм спрямованості.

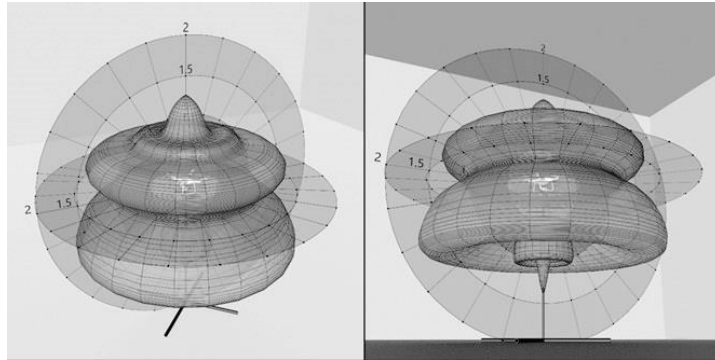
Тривимірні характеристики відображають, що інтенсивність АВ БПЛА приймає найбільші значення у напрямках витиснення повітря гвинтами, а форма просторової діаграми спрямованості відповідає сферичному закону.



a

б

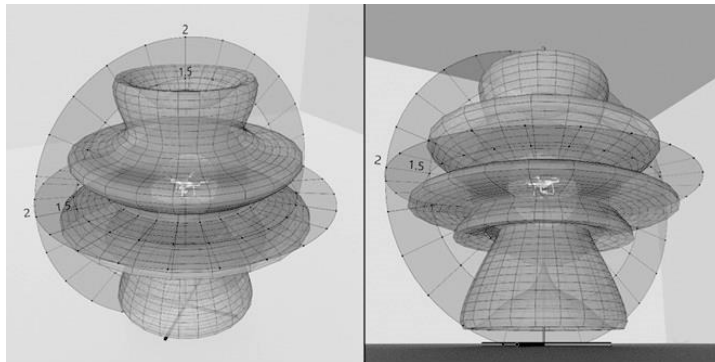
Рис. 13. Тривимірні діаграми спрямованості АВ гвинтів (*a*) та двигунів (*б*) БПЛА



a

б

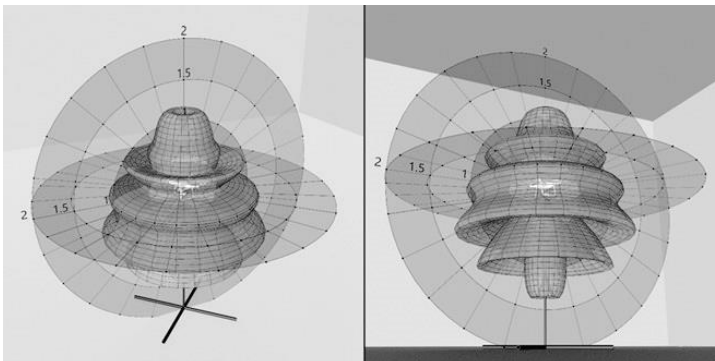
14.1



a

б

14.2



a

б

14.3

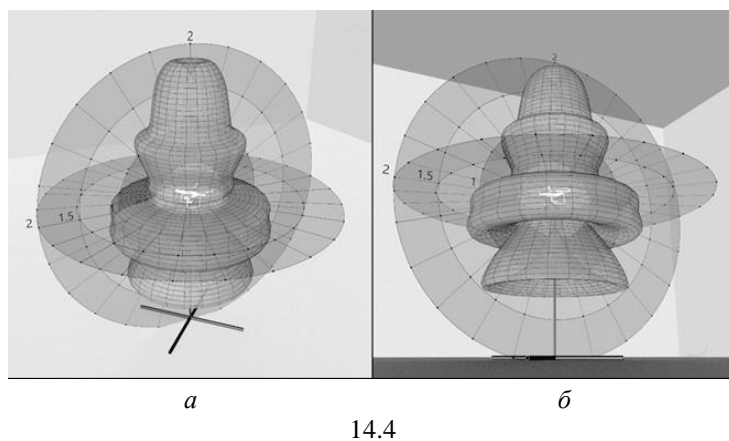


Рис. 14. 3D діаграми спрямованості АВ БПЛА для чотирьох гармонічних складових акустичного сигналу – вид зверху (*a*) та вид знизу (*б*): 14.1 – перша гармоніка; 14.2 – друга гармоніка; 14.3 – третя гармоніка; 14.4 – четверта гармоніка

Як видно з результатів експериментів, АВ поширюється за сферичним законом, але в залежності від гармоніки тривимірна фігура буде різною.

Якщо використовувати усі сплайни, які відповідають перерізам у вертикальній площині, розташованим згідно з замірами у експерименті через крок у 15° по азимуту, то можна створити подобу каркасу для тривимірного об'єкту (рис. 15, *a*).

Наступним кроком є з'єднання отриманої геометричної конструкції полігонами, у результаті чого отримаємо тривимірну діаграму спрямованості у такому вигляді (рис. 15, *б*).

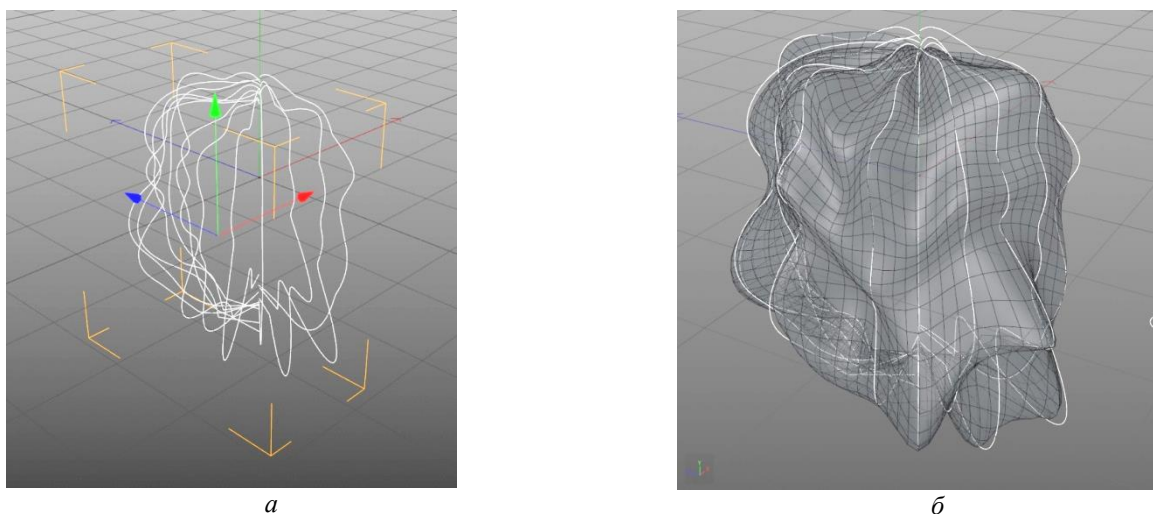


Рис. 15. Побудова тривимірної діаграми спрямованості БПЛА:
a – набір сплайнів для створення 3D моделі діаграми спрямованості;
б – зображення тривимірної діаграми спрямованості у робочому середовищі програми

Задля отримання більш наочного зображення потрібно зробити рендер змодельованих тривимірних діаграм спрямованості АВ БПЛА з накладанням вимірювальних лімбів, після чого характеристики спрямованості будуть мати такий вигляд (рис. 16, 17).

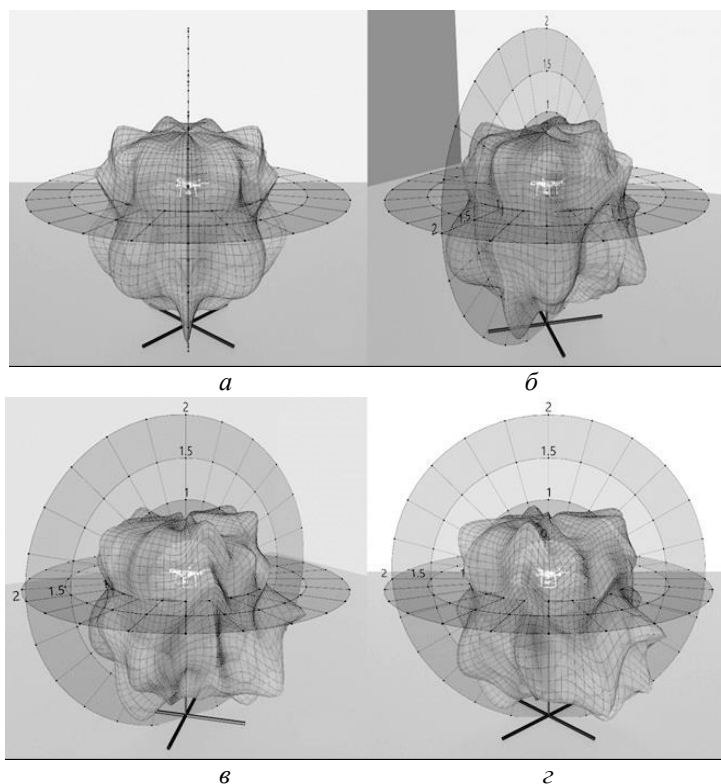


Рис. 16. Тривимірна візуалізація оброблених результатів експерименту по вимірюванню діаграми спрямованості АВ при спостереженні з точок, що відповідають різним значенням азимута: $a - 0^\circ$; $b - 30^\circ$; $v - 60^\circ$; $z - 90^\circ$

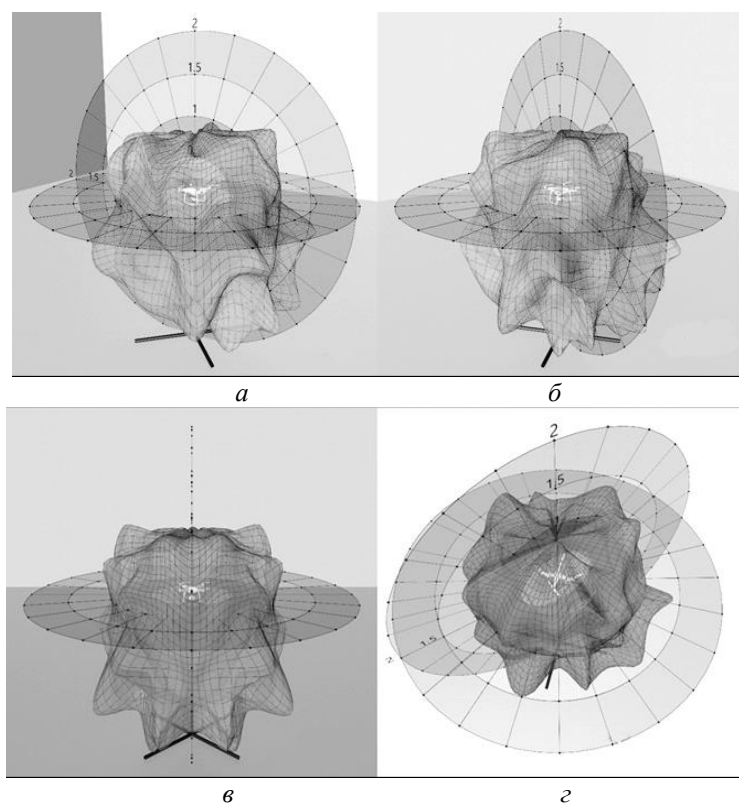


Рис. 17. Тривимірна візуалізація оброблених результатів експерименту по вимірюванню діаграми спрямованості АВ при спостереженні з точок, що відповідають різним значенням азимута: $a - 120^\circ$; $b - 150^\circ$; $v - 180^\circ$; $z - \text{вид зверху}$

Отримані фігури, що характеризують просторовий розподіл акустичної енергії випромінювання БПЛА за кутовими координатами, можна охарактеризувати як псевдовипадкові. З цього висновку випливає, що дальність виявлення і спостереження БПЛА в реальних умовах є величиною статистичної, яка залежить від ракурсу його спостереження.

Висновки

Експериментальні дослідження структури та параметрів звукового поля квадрокоптера показали, що спектри сигналу мають яскраво виражені гармонійні складові із частотами, кратними частоті обертання гвинта. У роботі показано, що найбільшу потужність мають спектральні складові у частотному діапазоні до 500 Гц, де перша гармоніка має найбільшу амплітуду, а далі має місце зменшення складових спектру до рівня шуму навколишнього середовища.

Важливе значення мають діаграми спрямованості випромінювання БПЛА, що характеризують тиск АВ у різних напрямках. У роботі отримано двовимірні та тривимірні діаграми АВ БПЛА з гвинтами та без гвинтів, коли працює тільки двигун літального апарату. Показано, що при відсутності гвинтів акустичне випромінювання значне слабкіше за рівнем. Також було представлено експериментальні дані у вигляді тривимірних діаграм АВ для чотирьох гармонік акустичного сигналу і проаналізовано, які зміни в просторовій спрямованості АВ БПЛА спостерігаються за змінами тривимірної фігури зі зміною частоти гармоніки.

Показано, що просторовий розподіл як повної енергії (у всьому діапазоні частот) акустичного сигналу, так і енергії окремих його спектральних (гармонічних) складових є суттєво анізотропним. З цього висновку випливає, що дальність виявлення і спостереження БПЛА в реальних умовах є величиною статистичною, яка залежить від ракурсу його спостереження. Відповідно, акустична спостережуваність (величина, аналогічна ефективній площі розсіювання в радіолокації) повинна описуватися статистично. Дослідження законів розподілу ймовірностей акустичної спостережуваності БПЛА в залежності від кутів може стати завданням подальших досліджень у цій галузі.

Список літератури:

1. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. Москва : Стратегические приоритеты, 2016. 676 с.
2. Ситник О.В., Карташов В.М. Радиотехнічні системи : навч. посіб. Харків : Компанія СМІТ, 2009. 430 с.
3. Kartashov V., Oleynikov V., Koryttsev I., Zubkov O., Babkin S., Sheiko, S. Processing and Recognition of Small Unmanned Vehicles Sound Signals. International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 – Proceedings 31 January 2019. P. 392 – 396.
4. Oleynikov V., Zubkov O., Kartashov V., Koryttsev I., Sheiko S., Babkin S. Experimental estimation of direction finding to unmanned air vehicles algorithms efficiency by their acoustic emission // 2019 International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications – Science and Technology, PIC S and T. 2019 – Proceeding». 2019. P.175 – 178.
5. Sadasivan S. Acoustis signature of an unmanned air vehicle – exploitation for aircraft localisation and parameter estimation / S. Sadasivan, M. Gurubasavaraj, S.R. Sekar // Eronautical DEF SCI J. 2001. Vol. 51, № 3. P. 279 – 283.
6. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K. Massey, R. Gaeta // Georgia Inst. of Technology / GTRI / ATAS, Atlanta. 16th AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. P. 1 – 16.
7. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. University "La Sapienza", Rome, Italy. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. P. 1 – 14.
8. Pham T. TTCP AG-6: Acousting detection and tracking of UAVs / T.Pham, N.Srour // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. 2004. Vol. 54. P. 24 – 29.
9. Zelnio A.M. Detection of small aircraft using an acoustic array. Thesis. B.S. // Electrical Engineering, Wright State University. 2007. 55 p.
10. G. Sinibaldi, L. Marino. Experimental analysis on the noise of the propellers for small UAV // Applied Acoustics. 74 (2013). P.79 – 88.
11. Nanyaporn Intaratep, W. Nathan Alexander, William J. Devenport, Sheryl M. Grace, Amanda Dropkin. Experimental Study of Quadcopter Acoustics and Performance at Static Thrust Conditions // Aeroacoustics Conferences 30 May – 1 June, 2016, Lyon, France 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. P. 1 – 6.

12. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I.V., Zubkov O.V., Anokhin M.A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika). 2018. Vol. 77 (10). P. 915 – 924.
13. Козерук С.О., Коржик О.В. Виявлення малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням // Visnyk NTUU KPI Series Radiotekhnika Radiobuduvannia. 2019. Iss. 76. P. 15 – 20.
14. Мошков П.М., Самохин В.Ф. Оценка влияния числа лопастей и диаметра на шум воздушного винта // Вестник Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, No 3. С. 25 – 34.
15. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Акустический шум низколетящего квадрокоптера // NOUSE Theory and Practice. 2019. Т.5, № 3. С.21 – 27.
16. Oleynikov V. M., Kartashov V. M., Babkin S. I., Zubkov O. V., Koryttsev I. V., Sheyko S. A., Seleznov I. S. Structure and parameters of propeller unmanned aerial vehicles' sound fields // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, Iss. 17. P. 1539 – 1550.
17. Карташов В. М., Олейников В. Н., Шейко С. А., Бабкин С. И., Корытцев И. В., Зубков О. В. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. Вып. 195. С. 235 – 243.

Надійшла до редколегії 11.09.2022

Відомості про авторів:

Карташов Володимир Михайлович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна; email: volodymyr.kartashov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

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

Селєзньов Іван Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна, email: ivan.seleznov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0731-7540>

Карташов Олександр Володимирович – Харківський національний університет радіоелектроніки, здобувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна, email: mSERVICEKH1@gmail.com