



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **127007** (13) **C2**  
(51) МПК (2023.01)  
**G01S 13/00**  
**G01S 17/00**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ  
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД**

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2020 04704</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>24.07.2020</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>09.03.2023</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: <b>26.01.2022, Бюл.№ 4</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>08.03.2023, Бюл.№ 10</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Семенець Валерій Васильович (UA), Карташов Володимир Михайлович (UA), Бабкін Станіслав Іванович (UA), Коритцев Ігор Васильович (UA), Олейніков Володимир Миколайович (UA), Зубков Олег Вікторович (UA), Шейко Сергій Олександрович (UA)</b></p> <p>(73) Володілець (володільці): <b>ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ (ХНУРЕ), пр. Науки, 14, м. Харків, 61166 (UA)</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: RU 2534217 C1, 27.11.2014 UA 89342 C2, 11.01.2010 US 10040554 B1, 07.08.2018 CN 109709543 A, 03.05.2019 US 2017192089 A1, 06.07.2017 WO 2019091867 A1, 16.05.2019</p>
--	--

**(54) РАДІОАКУСТИЧНИЙ СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОПОМІТНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

**(57) Реферат:**

Винахід належить до способів безпеки, призначених для запобігання несанкціонованому доступу безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у контрольований повітряний простір і слідування за переміщенням БПЛА у контрольованому просторі з одночасним їх розпізнаванням. Радіоакустичний спосіб виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) полягає у тому, що формують  $K$  пачок радіоімпульсів з однаковою, рівною  $N$ , кількістю радіоімпульсів у кожній пачці, з однаковою тривалістю  $t_i$  кожного радіоімпульсу та однаковим, рівним  $T_i$ , періодом повторення радіоімпульсів. Причому кожна пачка радіоімпульсів має свою відмінну від інших несучу частоту у діапазоні від базової початкової несучої частоти до граничної кінцевої частоти. Підсилюють сформовані радіоімпульси за потужністю і послідовно випромінюють їх у простір за допомогою антенної системи радіолокаційної станції. Послідовно приймають за допомогою антенної системи радіолокаційної станції сформовані у резонансній області розсіювання відбиті сигнали. Переводять їх у цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворювача та записують у оперативний запам'ятовувачий пристрій амплітуди прийнятих відбитих сигналів кожного періоду повторення. Причому період дискретизації аналого-цифрового перетворювача вибирають у 10-30 разів меншим тривалості сигналу, який зондує,  $t_i$ . Розділяють усю сукупність записаних у оперативний запам'ятовувачий пристрій оцифрованих відбитих сигналів у межах кожного періоду повторення на послідовні

UA 127007 C2

строби дальності, що з'єднуються своїми межами, але непересічні та рівні за тривалістю, нумерують строби дальності у межах кожного періоду повторення від 1 до  $M$ , причому тривалість строба вибирають рівною тривалості радіоімпульсу  $t_i$ , який зондує. Детектують усі записані відбиті сигнали за допомогою цифрового фазового детектора для отримання квадратурних складових відбитих сигналів. Переводять прийняті оцифровані відбиті сигнали до комплексної форми, у межах кожного  $m$ -го строба дальності проводять узгоджене оброблення оцифрованих прийнятих сигналів шляхом згортки з оцифрованим комплексно-пов'язаним радіоімпульсом, який зондує, цього ж періоду повторення. Визначають пік відклику відбиттів у кожному стробі дальності за критерієм максимуму його амплітуди та записують у комплексному вигляді значення піків відкликів кожного  $m$ -го періоду повторення кожної  $k$ -тої пачки радіоімпульсів у оперативний запам'ятовуючий пристрій. Формують для кожної  $k$ -тої з  $K$  пачок радіосигналів цифрові масиви піків відкликів відбиттів однакових за номером  $m$  стробів дальності і отримують для кожної  $k$ -тої пачки радіоімпульсів  $M$  масивів з  $N$  елементами у кожному масиві. Проводять з елементами кожного масиву піків відкликів операцію перетворення Фур'є та отримують у результаті для кожного масиву відповідний спектральний масив, у якому формується спектральний відклик БПЛА при реальному знаходженні БПЛА у відповідному стробі дальності. Порівнюють спектральні відклики відбитих сигналів у кожному спектральному масиві з заздалегідь встановленим пороговим значенням  $i$  у випадку перевищення порога фіксують у оперативному запам'ятовуючому пристрої частоту відповідного спектрального відклику  $m$ -го масиву  $k$ -тої пачки радіоімпульсів, яку приймають за доплерівську частоту відповідного БПЛА, та одночасно приймають рішення про виявлення БПЛА на відповідній дальності. Причому радіальну швидкість виявленого при аналізі відбиттів  $k$ -тої пачки радіоімпульсів БПЛА розраховують за значенням доплерівської частоти  $F_d$  відповідного спектрального відклику, що перевищив поріг. Вимірюють температуру повітря у приземному шарі атмосфери. Розраховують та записують швидкість розповсюдження звуку у атмосфері. Несучу частоту радіоімпульсів першої пачки встановлюють рівною 40 МГц, а несучу частоту кожної наступної пачки радіоімпульсів збільшують відносно частоти попередньої пачки на 58 кГц. Причому перебудову несучої частоти проводять до досягнення нею 106 МГц. Приймають електромагнітні хвилі, відбиті від акустичних хвиль, джерелом яких є БПЛА та частота яких є резонансною до частоти електромагнітних хвиль. Розраховують частоту акустичних хвиль, які генерує БПЛА, за значенням якої та значенням радіальної швидкості БПЛА, яку корегують на значення швидкості розповсюдження звуку у атмосфері, ідентифікують тип виявленого малопомітного БПЛА шляхом порівняння з еталонними значеннями частоти акустичних хвиль та радіальної швидкості БПЛА. Технічний результат: забезпечення високої ефективності виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів шляхом підвищення точності, зниження вартості виявлення, спрощення формування сигналів зондування та оброблення відбитих сигналів.

Винахід належить до способів безпеки, призначених для запобігання несанкціонованому доступу безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у контрольований повітряний простір і слідування за переміщенням БПЛА у контрольованому просторі з одночасним їх розпізнаванням, а саме до способів виявлення безпілотних літальних апаратів. Винахід може застосовуватись у складі комплексних систем безпеки.

Відомі акустичні способи виявлення літальних апаратів, що включають приймання акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів, їх оброблення, класифікації та визначення координат джерел акустичних сигналів. Таким є спосіб, що здійснює система виявлення гвинтокрилих безпілотних літальних апаратів [патент US №7957225, МПК G01S 3/80, публ.07.06.2011], в якому приймають акустичний сигнал за допомогою набору акустичних датчиків, класифікують джерело акустичного сигналу на основі спектрального аналізу акустичного сигналу, визначають горизонтальні координати і висоту джерела акустичного сигналу на основі аналізу, щонайменше чотирьох акустичних сигналів, отриманих від чотирьох акустичних датчиків.

Недоліком таких акустичних способів виявлення літальних апаратів є їх низька точність із-за наявності та суттєвого впливу антропогенних та природних шумів на результати виявлення БПЛА [Кажан В.Г., Мошков П.А., Самохин В. Природный фон при проведении акустических испытаний на аэродроме базирования малой авиации. Наука и образование. МГТУ им. Н.Э Баумана. Электронный журнал. 2015. № 07. С. 146-170.]

Відомий спосіб виявлення повітряних об'єктів (ПО), в тому числі і БПЛА, що полягає у випромінюванні в простір за допомогою радіолокаційної станції (РЛС) імпульсних сигналів, які зондують, відбиття їх від ВО, прийомі відбитих сигналів антеною системою РЛС, фільтрації відбитих сигналів по частоті для виділення відбиттів від рухомих ПО на тлі віддзеркалень від нерухомих місцевих предметів, порівняння відфільтрованих відбиттів з порогом і в разі перевищення встановленого порогу - ухваленні рішення про виявлення рухомого ПО [1-3].

Зокрема, відомий спосіб виявлення повітряних об'єктів, у тому числі БПЛА [патент на винахід РФ № 2 622 908, МПК G01S 13/52, публ.21.06.2017, Бюл.№18] згідно з яким з'являється можливість виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів, коли величина ефективної площі розсіювання складає  $\sigma=0,01...0,001$  м. Вказаний результат досягається тим, що у радіолокаційному способі виявлення літальних апаратів зондувальні радіосигнали випромінюють поперемінно з лінійною поляризацією та з квадратурною поляризацією, а кожен випромінений зондувальний радіосигнал з квадратурною поляризацією синхронний по фазі з попереднім зондувальним радіосигналом з лінійною поляризацією. Після порівняння спектрів, які демодульовані, відбитих радіосигналів з лінійною поляризацією і відбитих радіосигналів з квадратурною поляризацією судять про виявлення літального апарата при наявності кратності значень періодів їх амплітудної модуляції.

Недоліком цього способу є недостатня точність і обмежені функціональні можливості визначення типу і параметрів гвинтокрилого БПЛА та інформативність даних про гвинтокрилий БПЛА внаслідок відсутності можливості автоматичного відеоспостереження за гвинтокрилим БПЛА на додаток до методів виявлення БПЛА за допомогою спектрального та часового аналізу акустичного сигналу.

На даний час також існують способи виявлення гвинтокрилих БПЛА, що основані на акустичних, радіочастотних та оптичних датчиках. Такі способи виявлення гвинтокрилих БПЛА з використанням радіочастотних датчиків виявляють джерела радіовипромінювання, якими у гвинтокрилих БПЛА є системи керування або передачі телеінформації, визначають їхні координати за допомогою гоніометричних методів та інших високочотних методів визначення координат.

Відомий винахід - система і спосіб виявлення гвинтокрилих безпілотних літальних апаратів [патент RU № 2 593 439, МПК G01S 17/60, опубл. 10.08.2016, бюл. №22], який належить до області систем безпеки, призначених для запобігання несанкціонованому доступу гвинтокрилих безпілотних літальних апаратів в контрольовану зону і відстеження переміщення гвинтокрилих БПЛА в контрольованій зоні з одночасною їх аутентифікацією. Результатом винаходу є створення способу виявлення гвинтокрилих безпілотних літальних апаратів зі збільшеною точністю визначення типу і параметрів гвинтокрилого БПЛА і збільшеною інформативністю даних про гвинтокрилих БПЛА за рахунок автоматичного відеоспостереження за гвинтокрилими БПЛА на додаток до методів виявлення БПЛА за допомогою спектрального та часового аналізу акустичного сигналу акустичними датчиками.

Недоліком даного способу є необхідність використання додаткових технічних пристроїв для виявлення малопомітних БПЛА, що ускладнює його та підвищує вартість.

Відомими є також способи виявлення БПЛА, які використовують, поряд з релеєвською та квазіоптичною областями розсіювання, і резонансну область, у якій ефективна площа розсіювання суттєво підвищується [4]. На цьому ефекті базується ще один відомий спосіб виявлення БПЛА, які мають малу відбивну здібність. Відповідно до принципів роботи пристроїв, описаних у [5], а також з використанням традиційних методів кореляційно-фільтровою оброблення [1-3] розроблено інший спосіб виявлення БПЛА.

Найбільш близьким за функціональним призначенням та суттєвим ознакам є радіолокаційний спосіб виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів [патент РФ № 2534217, МПК G01S 13/04, опубл. 27.11.2014, Бюл. №33], який полягає у тому, що формують  $K$  пачок радіоімпульсів з однаковою, рівною  $N$  кількістю радіоімпульсів у кожній пачці, з однаковою тривалістю  $\tau_i$  кожного радіоімпульсу та однаковим, рівним  $T_k$ , періодом повторення радіоімпульсів, причому кожна пачка радіоімпульсів має свою, відмінну від інших, несучу частоту, підсилюють сформовані радіоімпульси за потужністю і послідовно випромінюють їх у простір за допомогою антенної системи радіолокаційної станції, послідовно приймають за допомогою антенної системи радіолокаційної станції відбиті сигнали, переводять у цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворювача та записують у оперативний запам'ятовуючий пристрій амплітуди прийнятих відбитих сигналів кожного періоду повторення, причому період дискретизації аналого-цифрового перетворення вибирають у 10-30 разів меншим тривалості сигналу, який зондує,  $\tau_i$ , розділяють усю сукупність записаних у оперативний запам'ятовуючий пристрій оцифрованих відбитих сигналів у межах кожного періоду повторення на послідовні строби дальності, які з'єднуються своїми межами, але не перетинаються і є рівними за тривалістю, нумерують строби дальності у межах кожного періоду повторення від 1 до  $M$ , причому тривалість стробів вибирають рівною тривалості радіоімпульсу  $\tau_i$ , який зондує, детектують усі записані відбиті сигнали за допомогою цифрового фазового детектора для отримання квадратурних складових відбитих сигналів, тобто переводять прийняті оцифровані відбиті сигнали у комплексну форму, у межах кожного  $m$ -го стробу дальності проводять узгоджене оброблення оцифрованих прийнятих сигналів шляхом згортки з оцифрованим комплексно-сполученим радіоімпульсом, який зондує, цього ж періоду повторення, визначають пік відклику відбиттів у кожному стробі за критерієм максимуму його амплітуди та записують у комплексному вигляді значення піків відкликів кожного  $m$ -періоду повторення кожної  $k$ -тої пачки радіоімпульсів у оперативний запам'ятовуючий пристрій, формують для кожної  $k$ -тої пачки радіоімпульсів з  $K$  пачок радіоімпульсів цифрові масиви піків відкликів однакових за номером  $m$  стробів дальності і отримують для кожної  $k$ -тої пачки радіоімпульсів  $M$  масивів з  $N$  елементами у кожному масиві, проводять з елементами кожного масиву піків відклику перетворення Фур'є та отримують у результаті для кожного масиву відповідний спектральний масив, у якому формується спектральний відклик повітряного об'єкта при реальному знаходженні повітряного об'єкта у відповідному стробі дальності, порівнюють спектральні відклики відбитих сигналів у кожному спектральному масиві з заздалегідь встановленим пороговим значенням (рівнем) і у випадку перевищення порогу фіксують у оперативному запам'ятовуючому пристрої частоту відповідного спектрального відклику  $m$ -го масиву  $k$ -тої пачки радіоімпульсів, яку приймають за доплерівську частоту відповідного повітряного об'єкта, та одночасно приймають рішення про виявлення повітряного об'єкта на відповідній дальності, у випадку перевищення порогу спектральним відкликом  $m$ -го масиву за результатами аналізу відбиттів усіх пачок радіоімпульсів вважають виявленим повітряний об'єкт звичним типовим повітряним об'єктом з ефективною площею розсіювання порядку одиниць квадратних метрів, причому радіальну швидкість виявленого при аналізі відбиттів  $k$ -тої пачки радіоімпульсів повітряного об'єкта розраховують за доплерівською частотою  $F_d$  відповідного спектрального відклику, що перевищив поріг, за формулою  $V_T = F_d \lambda_k / 2$ , де  $\lambda_k$  - довжина хвилі сигналу, який зондує, у  $k$ -тої пачки радіоімпульсів, несучу частоти радіоімпульсів першої пачки встановлюють рівною 150 МГц, а несучу частоту кожної наступної пачки підвищують відносно частоти попередньої пачки на 10 МГц, причому перебудову несучої частоти пачок радіоімпульсів проводять до досягнення нею 6 ГГц, у випадку перевищення порогу спектральним відкликом  $m$ -го масиву у результаті аналізу відбиттів тільки однієї окремої пачки радіоімпульсів, тобто на одній з частот зондування, змінюють подальший режим випромінювання на режим випромінювання аналогічних пачок з єдиною несучою частотою  $f_p$ , рівною несучій частоті пачки, по відбиттях якої отримано перевищення спектральним відкликом порогового значення, після оброблення відбитих сигналів, які належать додатково сформованим пачкам радіоімпульсам на несучій частоті  $f_p$ , причому порядок оброблення відбитих радіоімпульсів не змінюють, перевіряють факт перевищення у відповідних їм спектральних масивах отриманими

спектральними відкликами встановленого порогового значення і у випадку збігу номерів спектральних масивів, у яких виявляють перевищення порогового рівня, трьох послідовно прийнятих пачок відбитих на резонансній частоті  $f_p$ , а також при збігу частот цих спектральних відкликів, що перевищили поріг, приймають кінцеве рішення про виявлення на відповідній

5 дальності малопомітного безпілотного літального апарата.

Описаний спосіб виявлення БПЛА є більш ефективним, ніж наведені вище, оскільки забезпечує аналіз усього діапазону частот, на яких сучасні БПЛА відбивають електромагнітні хвилі у резонансній області, а також виключає прийняття випадкових, непідтверджених рішень про виявлення БПЛА. Однак і цей спосіб має деякі недоліки. По-перше, перестроювання несучої частоти сигналу, який зондує, у таких широких межах (від 150 МГц до 6 ГГц), тобто чотири декади при використанні скерованого прийому, потребує створення вельми складної антенно-фідерної системи, яка дорого коштує. По-друге, формування сигналу, який зондує, процес узгодженого прийому та оброблення прийнятих відбитих сигналів потребують достатньо великого часу огляду контролюваного простору.

15 Таким чином, недоліками прототипу є складність реалізації, висока вартість та недостатня точність виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів.

В основу винаходу радіоакустичного способу виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів поставлена задача забезпечення високої ефективності виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів шляхом підвищення точності, зниження вартості виявлення, спрощення формування сигналів зондування і спрощення оброблення відбитих сигналів.

20 Ця задача вирішена наступним чином. У радіоакустичному способі виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів, який полягає у тому, що формують  $K$  пачок радіоімпульсів з однаковою, рівною  $N$ , кількістю радіоімпульсів у кожній пачці, з однаковою тривалістю  $\tau_i$

25 кожного радіоімпульсу та однаковим, рівним  $T_i$ , періодом повторення радіоімпульсів, причому кожна пачка радіоімпульсів має свою відмінну від інших несучу частоту у діапазоні від базової початкової несучої частоти до граничної кінцевої частоти, підсилюють сформовані радіоімпульси за потужністю і послідовно випромінюють їх у простір за допомогою антенної системи радіолокаційної станції, послідовно приймають за допомогою антенної системи радіолокаційної станції сформовані у резонансній області розсіювання відбиті сигнали, переводять їх у цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворювача та записують у оперативний запам'ятовуючий пристрій амплітуди прийнятих відбитих сигналів кожного періоду повторення, причому період дискретизації аналого-цифрового перетворювача вибирають у 10-30 разів меншим тривалості сигналу, який зондує,  $\tau_i$ , розділяють усю сукупність

35 записаних у оперативний запам'ятовуючий пристрій оцифрованих відбитих сигналів у межах кожного періоду повторення на послідовні строби дальності, що з'єднуються своїми межами, але непересічні та рівні за тривалістю, нумерують строби дальності у межах кожного періоду повторення від 1 до  $M$ , причому тривалість стробу вибирають рівною тривалості радіоімпульсу  $\tau_i$ , який зондує, детектують усі записані відбиті сигнали за допомогою цифрового фазового

40 детектора для отримання квадратурних складових відбитих сигналів, тобто переводять прийняті оцифровані відбиті сигнали до комплексної форми, у межах кожного  $m$ -го стробу дальності проводять узгоджене оброблення оцифрованих прийнятих сигналів шляхом згортки з оцифрованим комплексно-пов'язаним радіоімпульсом, який зондує, цього ж періоду повторення, визначають пік відклику відбиттів у кожному стробі дальності за критерієм максимуму його амплітуди та записують у комплексному вигляді значення піків відкликів кожного  $m$ -го періоду повторення кожної  $k$ -тої пачки радіоімпульсів у оперативний запам'ятовуючий пристрій, формують для кожної  $k$ -тої з  $K$  пачок радіосигналів цифрові масиви піків відкликів відбиттів

45 однакових за номером  $m$  стробів дальності і отримують для кожної  $k$ -тої пачки радіоімпульсів  $M$  масивів з  $N$  елементами у кожному масиві, проводять з елементами кожного масиву піків відкликів операцію перетворення Фур'є та отримують у результаті для кожного масиву відповідний спектральний масив, у якому формується спектральний відклик БПЛА при реальному знаходженні БПЛА у відповідному стробі дальності, порівнюють спектральні відклики відбитих сигналів у кожному спектральному масиві з заздалегідь встановленим пороговим значенням (рівнем) і у випадку перевищення порогу фіксують у оперативному

55 запам'ятовуючому пристрої частоту відповідного спектрального відклику  $m$ -го масиву  $k$ -тої пачки радіоімпульсів, яку приймають за доплерівську частоту відповідного БПЛА, та одночасно приймають рішення про виявлення БПЛА на відповідній дальності, причому радіальну швидкість виявленого при аналізі відбиттів  $k$ -тої пачки радіоімпульсів БПЛА розраховують за значенням доплерівської частоти  $F_d$  відповідного спектрального відклику, що перевищив поріг,

згідно з винаходом, вимірюють температуру повітря у приземному шарі атмосфери, розраховують та записують швидкість розповсюдження звуку у атмосфері, несучу частоту радіоімпульсів першої пачки встановлюють рівною 40 МГц, а несучу частоту кожної наступної пачки радіоімпульсів збільшують відносно частоти попередньої пачки на 58 кГц, причому

5 перебудову несучої частоти проводять до досягнення нею 106 МГц, а також тим, що приймають електромагнітні хвилі, відбиті від акустичних хвиль, джерелом яких є БПЛА та частота яких є резонансною до частоти електромагнітних хвиль, і розраховують частоту акустичних хвиль, які генерує БПЛА, за значенням якої та значенням радіальної швидкості БПЛА, яку корегують на значення швидкості розповсюдження звуку у атмосфері, ідентифікують тип виявленого

10 малопомітного БПЛА шляхом порівняння з еталонними значеннями частоти акустичних хвиль та радіальної швидкості БПЛА.

Розглянемо більш докладніше запропонований спосіб.

Оскільки під час польоту БПЛА у атмосфері створюються акустичні хвилі, джерелом яких є саме БПЛА, пропонується використати ці хвилі як штучні відбивачі електромагнітних хвиль, що генеруються РЛС спостереження за повітряним простором, який контролюється, для раннього виявлення, визначення швидкості руху і розпізнавання з підвищеною точністю типу малопомітних БПЛА.

На даний час відомий спосіб дистанційної реєстрації вертикального профілю температури повітря радіоакустичним зондуванням атмосфери [патент України на винахід № 89342 МПК G01S 13/95 (2009.01) від 11.01.2010, бюл. №1]. Для реалізації такого способу дистанційної реєстрації параметрів атмосфери використовують резонансну область розсіювання. Цей спосіб полягає у тому, що випромінюють вертикально угору акустичний імпульс з синусоїдальним заповненням, опромінюють акустичний імпульс електромагнітними коливаннями з довжиною хвилі удвоє більшою довжини хвилі частоти синусоїдального заповнення акустичного імпульсу, приймають електромагнітні коливання, відбиті від акустичних імпульсів, виділяють сигнали з частотою доплерівського зсуву відбитих акустичними імпульсами електромагнітних коливань, визначають частоти доплерівського зсуву для кожної точки траси зондування. В основу цього способу покладено вимогу додержання умови Брега, коли максимальне відбиття електромагнітних хвиль від періодичної неоднорідності у атмосфері, яка виникає під дією штучного акустичного випромінювання, існує відношення між довжиною електромагнітної хвилі і довжиною акустичної хвилі у вигляді  $\lambda_e - 2\lambda = 0$  де  $\lambda_e$  - довжина електромагнітної хвилі,  $\lambda$  - довжина хвилі акустичного імпульсу [6]. Метою авторів є розвиток та модернізація відомого способу резонансного виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів, який забезпечує огляд усього діапазону частот (перебудову) усіх значень довжин електромагнітних хвиль, що відповідають виразу (1) відносно довжин акустичних хвиль від БПЛА.

Як відомо, частоти акустичних хвиль, які генеруються малопомітними та малорозмірними БПЛА у повітряному просторі, знаходяться у діапазоні 90...240 Гц [7]. Тому, використовуючи вираз (1), знаходимо, що діапазон перебудови частот електромагнітних хвиль РЛС має бути у діапазоні 40...106 МГц. Швидкість розповсюдження акустичних хвиль, які генеруються БПЛА, є сумою швидкості розповсюдження акустичних хвиль у повітрі та швидкості власне БПЛА. Оскільки швидкість розповсюдження акустичних хвиль у повітрі залежить від його температури [8], то для розрахунку швидкості БПЛА необхідно вимірювати температуру повітря у місці розташування РЛС, розраховувати швидкість розповсюдження акустичних хвиль у повітрі при існуючій температурі та знаходити швидкість БПЛА шляхом виключення з сумарної швидкості її частини, яка обумовлена лише температурою повітря

45  $V_6 = \pm \left[ \frac{F_{ca} \cdot \lambda_e}{2} - C_{зв} \right]$ , за допомогою якого має розраховуватись швидкість БПЛА, має вигляд

частота, яка відповідає швидкості розповсюдження акустичних хвиль, які генеруються БПЛА;  $C_{зв}$  - швидкість розповсюдження акустичних хвиль у повітрі при існуючій температурі повітря, яку розраховують за відомою формулою  $C_{зв} = 20\sqrt{T}$  де  $T \cdot ^0K$  - абсолютна температура приземного шару повітря. Оскільки стають відомими  $\lambda_e$  (несуча частота, на якій виникає максимум прийнятого сигналу),  $\lambda$  (з використанням виразу (1)) і  $C_{зв}$ , то надалі розраховують частоту акустичних хвиль за виразом  $F_a = \frac{C_{зв}}{\lambda}$ , які генерує БПЛА, за значенням якої та значенням  $V_6$  ідентифікують тип малопомітного БПЛА.

Таким чином, спосіб виявлення та розпізнавання малопомітних БПЛА, що пропонується, має складатись з наступних послідовних операцій, які виконуються.

1. Вимірюють температуру повітря у приземному шарі атмосфери, розраховують швидкість розповсюдження звуку у повітрі  $C_{зв}$  та записують її значення у оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП).

2. Послідовно формують пачки радіоімпульсів тривалістю  $\tau_i$  з періодом повторення  $T_i$ , причому кількість радіоімпульсів у кожній пачці дорівнює  $N$  (для використання у подальшому швидкого перетворення Фур'є число  $N$  доцільно вибрати рівним  $2^s$ , де  $S=8,9,10$ ), несучу частоту радіоімпульсів першої пачки встановлюють рівною 40 МГц (довжина хвилі 7,5 м), а несучу частоту кожної наступної чергової пачки підвищують на  $\Delta f = 58$  кГц, перебудову несучої частоти радіоімпульсів проводять до досягнення нею значення 106 МГц (довжина хвилі 2,83 м).

3. Підсилюють сформовані радіоімпульси за потужністю та послідовно випромінюють їх у простір за допомогою антенної системи РЛС.

4. Послідовно приймають за допомогою антенної системи відбиті сигнали, переводять їх до цифрової форми за допомогою аналого-цифрового перетворювача та записують у оперативний запам'ятовуючий пристрій амплітуди прийнятих відбитих сигналів кожного періоду повторення, причому період дискретизації аналого-цифрового перетворювача вибирають у 10-30 разів меншим, ніж тривалість сигналу  $\tau_i$ , який зондує.

5. Розділяють усю сукупність відбитих сигналів, які перетворені у цифрову форму та записані в ОЗП, у межах кожного періоду повторення на послідовні, з суміжними, але такі, що не перехрещуються, межами, рівними за тривалістю строби дальності, нумерують строби дальності у межах кожного з періодів повторення від 1 до  $M$ , причому тривалість стробів вибирають рівною тривалості радіоімпульсу  $\tau_i$ , який зондує.

6. Детектують усі записані відбиті сигнали за допомогою цифрового фазового детектора для отримання квадратурних складових відбитих сигналів, тобто переводять прийняті відбиті сигнали, які оцифровані, у комплексну форму.

7. В межах кожного  $m$ -го стробу дальності проводять узгоджене оброблення прийнятих сигналів, які оцифровані, шляхом згортки з комплексно-пов'язаним радіоімпульсом, який зондує, цього ж періоду повторення.

8. Визначають пік відклику відбиттів у кожному стробі дальності за критерієм максимуму його амплітуди та записують у комплексному вигляді значення піків відкликів кожного  $m$ -го стробу періоду повторення кожної  $k$ -ї пачки радіоімпульсів у ОЗП.

9. Формують для кожної  $k$ -ї з  $K$  пачок радіоімпульсів цифрові масиви піків відкликів відбиттів однакових за номером  $m$  стробів дальності та отримують для кожної  $k$ -ї пачки радіоімпульсів  $M$  масивів з  $N$  елементами у кожному масиві.

10. Проводять з елементами кожного масиву піків відкликів операцію перетворення Фур'є (швидкого перетворення Фур'є) та отримують у результаті для кожного масиву відповідний спектральний масив, у якому формується спектральний відклик БПЛА при реальному знаходженні БПЛА у відповідному стробі дальності (якщо у  $m$ -му стробі дальності знаходився БПЛА, то у відповідному  $m$ -му спектральному масиві з'являється його спектральна складова - спектральний відклик).

11. Порівнюють спектральні відклики відбитих сигналів у кожному спектральному масиві з раніше встановленим пороговим значенням (рівнем) і у випадку перевищення порогу фіксують у ОЗП частоту відповідного спектрального відклику  $m$ -го масиву  $k$ -тої пачки радіоімпульсів, яку приймання за доплерівську частоту відповідного БПЛА, та одночасно приймають рішення про виявлення на відповідній дальності БПЛА.

12. Радіальну швидкість виявленого під час аналізу відбиттів  $k$ -тої пачки радіоімпульсів БПЛА розраховують за значенням доплерівської частоти  $F_{da}$  відповідного спектрального відклику, який перевищив поріг, за формулою  $V_0 = \pm \left[ \frac{F_{da}}{2} - C_{зв} \right]$ , де  $\lambda_{ек}$  - довжина хвилі

сигналу, який зондує, у  $k$ -тій пачці радіоімпульсів.

13. За значеннями  $\lambda_e$ ,  $\lambda$  і  $C_{зв}$  розраховують частоту акустичних хвиль  $F_a$ , які генерує БПЛА, за значенням якої та значенням радіальної швидкості, яку корегують на швидкість розповсюдження звуку у атмосфері, ідентифікують тип малопомітного БПЛА, який виявлено, шляхом порівняння з еталонними значеннями частоти акустичних хвиль і радіальної швидкості БПЛА.

З опису та суті способу видно, що він дійсно вільний від недоліків, які є у прототипу. Спосіб забезпечує аналіз усього діапазону частот, на яких акустичні хвилі, джерелом яких є сучасні БПЛА, відбивають електромагнітні хвилі у резонансній області розсіювання. Окрім того, суттєво зменшений діапазон перебудови частот РЛС, внаслідок чого спрощено формування сигналу,

що зондує, а також спрощено процес узгодженого прийому та оброблення прийнятих відбитих сигналів, які суттєво зменшують необхідний час огляду контрольованого простору, що забезпечує раннє виявлення БПЛА. Наявність інформації про частоту акустичних хвиль, що генеруються БПЛА, та значення про його швидкість дозволяють підвищити якість ідентифікації виявленого БПЛА.

Таким чином, авторами вирішена задача забезпечення високої ефективності виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів шляхом підвищення точності, зниження вартості виявлення, спрощення формування сигналів зондування та оброблення відбитих сигналів.

Джерела інформації:

1. Справочник по радиолокации/ Под ред. М.И.Сколника. М.: Сов. Радио, 1967. Том 1. Основы радиолокации. 456 с.

2. Теоретические основы радиолокации/ Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970.-560 с.

3. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Часть 1. Основы радиолокации. М.: Воениздат, 1983.- 456 с.

4. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов/ Под ред. Л.Т.Тучкова. М: Радио и связь, 1985. 236 с.6, с. 15-30

5. Небабин В.Г., Сергеев В.В. Методы и техника радиолокационного распознавания. М.: Радио и связь, 1984, с. 74-82

6. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы, -М: Наука, 195 с.

7. Олейников В.Н., Зубков О.В, Карташов В.М., Корытцев И.В., Бабкин СИ., Шейко С.А. Исследование эффективности обнаружения и распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению. Радиотехника. Всеукр. науч.- техн. сб. Вып.195. 2018, с. 209-217.

8. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Гл. ред. И.П. Голямина. - М.: Советская энциклопедия, 1979. - 400 с.

#### ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Радіоакустичний спосіб виявлення малопомітних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), який полягає у тому, що формують  $K$  пачок радіоімпульсів з однаковою, рівною  $N$ , кількістю радіоімпульсів у кожній пачці, з однаковою тривалістю  $t_i$  кожного радіоімпульсу та однаковим, рівним  $T_i$ , періодом повторення радіоімпульсів, причому кожна пачка радіоімпульсів має свою відмінну від інших несучу частоту у діапазоні від базової початкової несучої частоти до граничної кінцевої частоти, підсилюють сформовані радіоімпульси за потужністю і послідовно випромінюють їх у простір за допомогою антенної системи радіолокаційної станції, послідовно приймають за допомогою антенної системи радіолокаційної станції сформовані у резонансній області розсіювання відбиті сигнали, переводять їх у цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворювача та записують у оперативний запам'ятовуючий пристрій амплітуди прийнятих відбитих сигналів кожного періоду повторення, причому період дискретизації аналого-цифрового перетворювача вибирають у 10-30 разів меншим тривалості сигналу, який зондує,  $t_i$ , розділяють усю сукупність записаних у оперативний запам'ятовуючий пристрій оцифрованих відбитих сигналів у межах кожного періоду повторення на послідовні строби дальності, що з'єднуються своїми межами, але непересічні та рівні за тривалістю, нумерують строби дальності у межах кожного періоду повторення від 1 до  $M$ , причому тривалість строба вибирають рівною тривалості радіоімпульсу  $t_i$ , який зондує, детектують усі записані відбиті сигнали за допомогою цифрового фазового детектора для отримання квадратурних складових відбитих сигналів, переводять прийняті оцифровані відбиті сигнали до комплексної форми, у межах кожного  $m$ -го строба дальності проводять узгоджене оброблення оцифрованих прийнятих сигналів шляхом згортки з оцифрованим комплексно-пов'язаним радіоімпульсом, який зондує, цього ж періоду повторення, визначають пік відклику відбиттів у кожному стробі дальності за критерієм максимуму його амплітуди та записують у комплексному вигляді значення піків відкликів кожного  $m$ -го періоду повторення кожної  $k$ -тої пачки радіоімпульсів у оперативний запам'ятовуючий пристрій, формують для кожної  $k$ -тої з  $K$  пачок радіосигналів цифрові масиви піків відкликів відбиттів однакових за номером  $m$  стробів дальності і отримують для кожної  $k$ -тої пачки радіоімпульсів  $M$  масивів з  $N$  елементами у кожному масиві, проводять з елементами кожного масиву піків відкликів операцію перетворення Фур'є та отримують у результаті для кожного масиву відповідний спектральний масив, у якому формується спектральний відклик БПЛА при реальному знаходженні БПЛА у відповідному стробі дальності,

порівнюють спектральні відклики відбитих сигналів у кожному спектральному масиві з заздалегідь встановленим пороговим значенням і у випадку перевищення порога фіксують у оперативному запам'ятовуючому пристрої частоту відповідного спектрального відклику  $m$ -го масиву  $k$ -тої пачки радіоімпульсів, яку приймають за доплерівську частоту відповідного БПЛА, та одночасно приймають рішення про виявлення БПЛА на відповідній дальності, причому радіальну швидкість виявленого при аналізі відбиттів  $k$ -тої пачки радіоімпульсів БПЛА розраховують за значенням доплерівської частоти  $F_d$  відповідного спектрального відклику, що перевищив поріг, який **відрізняється** тим, що вимірюють температуру повітря у приземному шарі атмосфери, розраховують та записують швидкість розповсюдження звуку у атмосфері, несучу частоту радіоімпульсів першої пачки встановлюють рівною 40 МГц, а несучу частоту кожної наступної пачки радіоімпульсів збільшують відносно частоти попередньої пачки на 58 кГц, причому перебудову несучої частоти проводять до досягнення нею 106 МГц, приймають електромагнітні хвилі, відбиті від акустичних хвиль, джерелом яких є БПЛА та частота яких є резонансною до частоти електромагнітних хвиль, і розраховують частоту акустичних хвиль, які генерує БПЛА, за значенням якої та значенням радіальної швидкості БПЛА, яку корегують на значення швидкості розповсюдження звуку у атмосфері, ідентифікують тип виявленого малопомітного БПЛА шляхом порівняння з еталонними значеннями частоти акустичних хвиль та радіальної швидкості БПЛА.