

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.2.4>

УДК 534.6

КОЗАК А. В., КОРЖИК О. В.

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

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ШУМОПЕЛЕНГУВАННЯ БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕКТОРНО-ФАЗОВИХ МЕТОДІВ ТА НАДНАПРАВЛЕНОСТІ

Мета. Підвищення дальності виявлення систем шумопеленгування за рахунок надання акустичній антені властивостей щодо забезпечення реєстрації як скалярних, так і векторних характеристик акустичного поля.

Методика. Застосування векторно-фазових методів, які забезпечують формування характеристики направленості в області нижніх частот.

Результати. Визначено, що застосування векторно-фазових приймачів призводить до формування характеристики направленості дискретних інтерференційних антен в області нижніх частот та дає можливість отримати однонаправлену антену без зміни конструкції. При цьому визначено, що основними характеристиками акустичного поля, що формує антена, є: тиск та коливальна швидкість. Визначено теоретичні засади побудови систем шумопеленгування. Розроблено мультикомпонентну векторну акустичну антену пристроїв виявлення та пеленгування.

Наукова новизна. Встановлено можливість удосконалення систем повітряного та гідроакустичного шумопеленгування за рахунок використання ефектів наднаправленості та векторно-фазових методів. Запропоновано мультикомпонентну векторну акустичну антену пристроїв виявлення та пеленгування. Визначено, що впровадження векторно-фазових методів призводить до того, що антена зберігає або покращує відношення сигнал/шум у задачах прийому акустичних сигналів у повітрі. Таким чином забезпечується поєднання дискретних інтерференційних антен, які реєструють не тільки поле тиску, але й поле коливальної швидкості.

Практична значимість. Запропоновані теоретичні положення можуть бути використанні для розробки шумопеленгаторних акустичних комплексів як повітряного, так і гідроакустичного призначення. Запропонована мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування, що реалізує повний комплекс заходів щодо виявлення та визначення кутових координат цілі та може застосовуватись у шумопеленгаторних акустичних комплексах.

Ключові слова: акустичне поле; векторно-фазові методи; наднаправленість; акустична антена; БПЛА; пеленгування; акустичні шуми.

Вступ. В реаліях сьогоdnішнього дня проблема повітряного шумопеленгування обумовлена масовим використанням і швидкими темпами розвитку парку безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Це змінює систему охорони і безпеки будь-якого об'єкта, у зв'язку з чим і зростає потреба у розробці та удосконаленні систем акустичного шумопеленгування БПЛА.

Аналіз стану існуючих рішень щодо акустичних засобів шумопеленгування. На даний час, існують різні системи шумопеленгування, серед них відома позиційна шумопеленгаторна станція [1], що має у складі гідроакустичний модуль, який містить комбінований акустичний приймач у вигляді поєднання приймача тиску p та приймачів складової v_x і складової v_y коливальної швидкості. Недоліком є те, що за відсутності приймача складової v_z коливальної швидкості виявляється неможливим точне вимірювання інтенсивності акустичного поля, створеного ціллю, що призводить до значної похибки її виявлення.

Також є трьох координатний крос-дипольний акустичний масив [2], що містить три лінійні дискретні акустичні антени, які складаються з приймачів тиску, розміщені взаємно ортогонально, мають однакові розміри баз і спільний фазовий центр, у якому встановлено

приймач тиску. До недоліків акустичного масиву відноситься обмеження у використанні лише одного способу пеленгування, що знижує функціональність пристрою та потребує введення у склад акустичних комплексів, де він використовується, додаткового пристрою для визначення присутності цілі.

Сучасна тенденція технічної акустики щодо поширення робочих частотних діапазонів на область нижніх частот та розробки нових підходів та методів обробки гідроакустичної інформації в першу чергу поширюється на методики виявлення повітряних або підводних автономних апаратів. Основними характеристиками таких об'єктів є: тиск p , градієнт тиску $grad p$, коливальна швидкість v і інтенсивність звуку J , визначення яких велось традиційними інтерференційними методами. Проте, сьогодні виникає необхідність появи пристроїв перетворення звукової енергії з високими показниками коефіцієнтів концентрації та одночасно високих – направлених якостей. Відповідають таким вимогам в достатній степені – так звані датчики векторно-фазової природи.

Відповідно до робіт [3, 4], векторно-фазові методи вважають такими, що дозволяють розв'язання рівнянь акустики з метою відновлення акустичного поля в точці робочого простору по результатах одночасної реєстрації в ній скалярних (тиску p) і векторних (коливальної швидкості v) з врахуванням фазових співвідношень між ними.

При цьому, перехід від традиційних методів реєстрації тиску до векторної структури може відбуватися в наступних випадках:

- присутні деякі обмеження розмірів робочої області простору або габаритів пристрою;
- значна невідповідність відновлення акустичного поля за результатами реєстрації лише значення звукового тиску в точці;
- не виконується умова про наявність вихорових складових повного поля інтенсивності.

При цьому в сучасній гідроакустиці коливальні системи перетворювачів в основному виконуються з п'єзокераміки та представлені пластинами (дисками) [5], циліндрами [6, 7] та сферами [8]. Зауважимо також, що в деяких приймачах, орієнтованих на інфразвуковий та низькочастотний звуковий діапазон (5–150) Гц.

Прийнято вважати [9], що можлива багатоканальність одиночних комбінованих приймальних векторних пристроїв має недолік, пов'язаний із взаємодією модових складових окремих приймачів. Подібний ефект, безумовно, небажаний, а його прояв у вигляді не ідентичності амплітудно- та фазо-частотних залежностей каналів пеленгування обумовлений як пов'язаністю форм коливань перетворювачів приймача, так і особливостями побудови типових приймальних трактів. У розглянутих джерелах за векторно-фазовими методами не виявлено моделей робочих режимів та алгоритмів, що дозволяють описати ступінь можливого впливу каналів з допомогою пов'язаності коливань. Сучасне застосування методів наднаправленості в акустиці представлено в роботах [10–12].

Таким чином, доцільно розглянути типові ситуації можливості одночасного поліпшення просторово енергетичних характеристик перетворювачів із використанням положень векторних і скалярних методів.

Постановка завдання. Удосконалення систем шумопеленгування пов'язано з підвищенням дальності виявлення за рахунок надання акустичній антені властивостей щодо забезпечення реєстрації як скалярних, так і векторних характеристик акустичного поля. Сьогодні виникає необхідність появи пристроїв перетворення звукової енергії з високими показниками коефіцієнтів концентрації та одночасно високих направлених якостей. Відповідають таким вимогам – так звані датчики векторно-фазової природи. При цьому концепція векторно-фазових методів спирається на необхідність одночасної реєстрації

звукового тиску та хоча б ще однієї векторної характеристики акустичного поля. Тому використанням векторно-фазових методів може забезпечувати вирішення задач пеленгування.

Мета: підвищення дальності виявлення систем шумопеленгування за рахунок надання акустичній антені властивостей щодо забезпечення реєстрації як скалярних, так і векторних характеристик акустичного поля.

Отже, завданнями статті є:

- визначити, що застосування векторно-фазових приймачів призводить до формування характеристики направленості дискретних інтерференційних антен в області нижніх частот та дає можливість отримати однонаправлену антену без зміни конструкції;

- визначити теоретичні засади побудови систем шумопеленгування;

- створити структурну схему трактів виявлення, пеленгування, та вимірювання енергетичних характеристик акустичного поля.

- розробити мультикомпонентну векторну акустичну антену пристроїв виявлення та пеленгування.

- впровадити, в подальшому, методології створення просторової вибірковості дискретних антен в практику розробки і моделювання акустичних каналів пристроїв повітряного шумопеленгування.

Основні результати досліджень.

Векторно-фазові методи. Використовуючи положення роботи [3] відзначимо, що відновлення поля з використанням векторно-фазових методів забезпечує також вирішення задач пеленгування. При цьому концепція векторно-фазових методів спирається на необхідність одночасної реєстрації звукового тиску та хоча б ще однієї векторної характеристики акустичного поля. Визначення векторної характеристики може відбуватися шляхом вимірювання звукового тиску у взаємно рознесених точках. Визначення коливальної швидкості при цьому може відбуватися відповідно до співвідношення: $v = \frac{i}{\omega\rho} \nabla p$, де v –

компонента коливальної швидкості; ω – кругова частота; $\nabla p = \frac{p_1 - p_2}{d} = \text{grad}(p)$ – градієнт тиску, а p_1, p_2 – значення амплітуд тисків, що виміряні в точках простору, рознесених на відстань d .

Таким чином, зазначений вище напрямок передбачає створення перетворюючих пристроїв або їх систем, що реагують на зміну скалярного та векторних параметрів акустичного поля: акустичного тиску $p(r,t)$, градієнту тиску $\text{grad } p(r,t)$, коливальної швидкості $v(r,t)$, прискорення $a(r,t)$, зміщення $\xi(r,t)$ (r – радіус вектор; t – час), а також на зміну комбінації вказаних параметрів (комбіновані приймачі) [16].

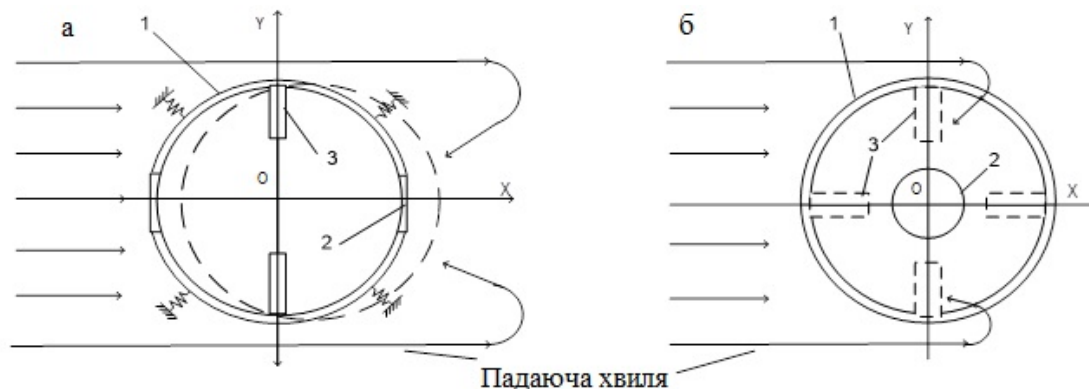
В основу ідеології реєстрації векторних характеристик акустичного поля у робочому середовищі покладено вимогу про повторюваність механічною системою реєструючого перетворюючого пристрою коливальних рухів часток середовища. Досягається це:

- Створенням датчиків певної фізичної природи, які переважно реагують на певний параметр акустичного поля [17].

- Створенням умов руху приймача як єдиного цілого з частинками середовища (приймачі інерційного типу, рис. 1а).

- Створенням умов співколивань частинок середовища та елементів приймача (приймачі силового типу, рис. 1б). При цьому розглянута сила зумовлює коливання елементів і викликається дифракцією звукової хвилі на приймачі. Розмір зазначеної сили залежить від характеру фронту акустичної хвилі та хвильових розмірів приймача, а діапазон зміни сили під

час роботи в полі сферичної хвилі складає [8] до 0–20 дБ та 0–15 дБ при роботі в полі циліндричної хвилі.



Примітки: 1 – корпус приймача; 2 – перетворювач скалярної характеристики поля; 3 – перетворювач векторної характеристики поля.

Рис. 1. Загальні конструктивні схеми виконання комбінованих приймачів:
(а) – інерційного типу, (б) – силового типу

У цьому випадку електричні сигнали на виході перетворювача пропорційні зміні градієнта тиску $\text{grad } p(r, t)$ і в ідеальній ситуації (за умови падіння на приймач лише плоскої хвилі) зсунуті по фазі 90° по відношенню до сигналів з виходу перетворення перетворювача тиску $p(r, t)$. Перетворення акустичної енергії при цьому відповідно до роботи [9], відбувається в два етапи:

- Акусто-механічне перетворення – перетворення характеристик акустичного поля в рух механічної коливальної системи перетворювача.
- Механо-електричне перетворення-перетворення енергії механічної коливальної системи в електричну.

Реєстрація векторної характеристики, може виконана як на першому, так і на другому етапі. Це забезпечується або створенням механічної системи перетворювача, що реагує на певну характеристику акустичного поля, або шляхом виконання адитивних операцій з виходу приймача на етапі механо-електричного перетворення.

Таким чином, основними принципами побудови комбінованих приймачів, які забезпечують принаймні часткове вирішення проблеми просторової вибірковості є:

- малогабаритність, багатоканальність приймача (три координати) та автономність каналів;
- наявність опорного ненаправленого каналу, тобто каналу вимірювання звукового тиску $p(r, t)$ та єдиного фазового центру для всіх каналів;
- мінімізація амплітудно-фазових відмінностей та взаємовпливу каналів перетворювача один на одного;
- облік багатомодовості перетворюючих приймальних коливальних систем.

Зауважимо, що формування характеристики направленості акустичної інтерференційної антени на основі таких приймачів вимагає вибору фазового центру з урахуванням загальних підходів до синтезу акустичних антен [4, 18]. При цьому відновлення поля в дальній області відбувається найбільш повно при побудові своєрідної дискретної системи, в якій приймачі розміщують на відстані інтервалу Нейквіста один від одного, а вибір відстані між приймачами набагато меншим λ , дозволяє заповнити втрати інформації, обумовлені використанням лише даних про скалярні характеристики поля [3]. При цьому, як

відомо [4], розміщення елементів системи з інтервалом Нейквіста дозволяє уникнути помилковості пеленга за рахунок виключення одиничних максимумів у класичній звукопрозорій прямолінійній дискретній антені.

Просторова вибірковість комбінованих приймачів забезпечується вимогами щодо хвильових співвідношень, заданих у вигляді нерівності: $D/\lambda \leq 0,3-0,4$, де D – максимальний габарит приймача; λ – довжина хвилі в середовищі. Збудження приймача відбувається за рахунок всебічного динамічного обтискання (нульова форма), і з допомогою виникнення середнього градієнта тиску на габариті перетворювача, відповідному його діаметру (перша форма). При цьому можливі типи електродування та способи комутації електродів перетворювачів повинні забезпечити максимізацію електричних сигналів відповідної форми коливань електричних виходах приймача. В даний час використовується комбінація ненаправленої характеристики виду $R(\varphi) = 1$ та направлених виду $R(\varphi) = \cos(\varphi)$, $R(\varphi) = \sin(\varphi)$ (рис. 2), для яких сигнал пропорційний $1 + \cos(\varphi)$. Якщо приймач багатоканальний, а перетворювачі виконані у вигляді єдиної коливальної системи силового типу (рис. 1б), то для забезпечення одночасного формування всіх просторових каналів необхідно використовувати розв'язані по входу електричних приймальних трактів.

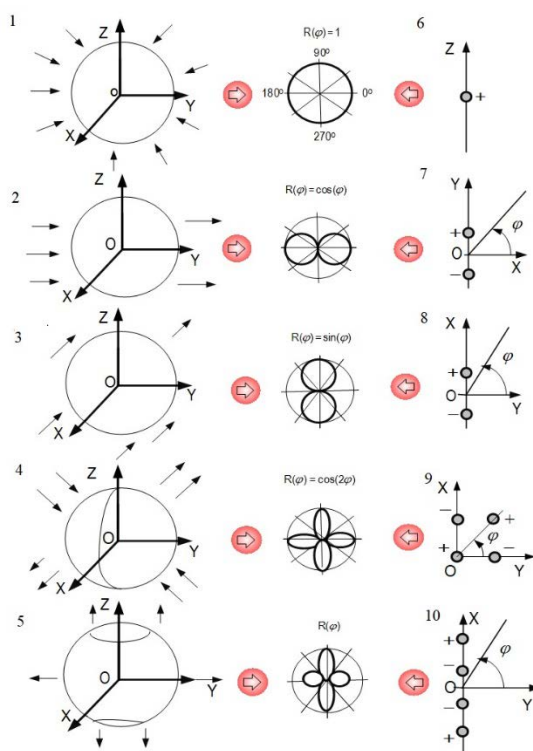


Рис. 2. Спрощені просторові характеристики приймачів, реалізованих за схемою силового типу (1–5) та на основі асинфазних монополів (6–10)

Наднаправленість в задачах акустики. Як зазначалося вище, проблема забезпечення просторової вибірковості антенних систем під час роботи у широких частотних діапазонах пов'язується із підвищенням ефективності малогабаритних антен. Нині можливості такого підвищення дуже обмежені. Пряме відношення до вирішення зазначеної проблеми має так звана «наднаправленість».

Термінологічно поняття «наднаправленість» запозичене акустиками з теорії синтезу радіоантен [17], а залучення ідеології класичної наднаправленості до завдань акустики

ставиться до 50–60-х років минулого століття, наприклад, роботі Р. Причарда [20]. Зауважимо, що широкого застосування в акустиці методологія класичної наднаправленості так і не отримала [19]. Пов'язано це з тим, що наднаправленості притаманні такі численні недоліки, що сам термін пов'язувався з неможливістю створення акустичних антен з такими властивостями. Однак, як зазначалося в роботі [20], суттєві складнощі виникають лише для антен, що володіють високим ступенем наднаправленості. Невисока ж ступінь наднаправленості (так звана «помірна наднаправленість») виявляється цілком технічно реалізованою.

Відомо [18], що серед задач синтезу акустичних антенних систем найбільший інтерес становлять:

- завдання синтезу антен із характеристиками направленості заданої форми;
- завдання керування зміненням параметрів отриманої характеристики направленості;
- завдання максимізації коефіцієнта концентрації при малих заданих розмірах антенного пристрою.

При вирішенні зазначених завдань може бути використаний термін «наднаправлені антени» – стосовно антени, що мають здатність мати більш високі направлені якості в порівнянні зі звичайними антенами (синфазними з рівномірним амплітудним розподілом чутливості) в умовах зниження частоти при незмінності габаритів та робочих частот. Надбання звичайними антенами наднаправлених якостей у частині: збільшення коефіцієнта концентрації, загострення головного максимуму, зниження рівня бічних пелюсток, виключення одиничних пелюсток і зменшення ореолу характеристики направленості може бути досягнуто шляхом введення амплітудно-фазових розподілів чутливості елементів, зміни інтервалу між перетворювачами та оптимізації напрямку огляду. Зазначимо, що важлива можливість концентрації енергії в скільки завгодно малому тілесному куті навіть під час роботи точкового джерела було відзначено ще 1922 року Озеном [22].

Відомо [23], що характеристика направленості умовно може бути представлена щодо потужності $P(\theta)$, створюваної антеною системою з N елементів в деякому напрямку θ у

вигляді:
$$p(\theta) = \sum_{m=-(N-1)}^{m=(N-1)} (N-1)p_m \delta(\theta - \theta_m),$$
 де $\delta(\theta - \theta_m) = 0, \theta \neq \theta_m$. Такий запис формалізує

уявлення про мінімізацію бічного поля антени та може бути віднесена до умов синтезу оптимальних антен.

Безперервне і монотонне збільшення значення коефіцієнта концентрації може бути досягнуто шляхом виключення одиничних максимумів [4], що забезпечується вибором відстані між елементами антени, меншим ніж інтервал Нейквіста $d = \lambda/2$. При цьому вважають, що антена, яка реалізує найбільший коефіцієнт концентрації, є в цьому сенсі оптимальною і має наднаправленість.

Ілюстрацією оптимізації характеристик направленості в гідроакустиці слід вважати широке застосування Дольф-Чебишевських антен [4], в яких мінімізується розкрив головного максимуму при заданому однаковому рівні бічних максимумів характеристики направленості. Можлива також зворотна ситуація мінімізації рівня бічних максимумів за заданої ширини головного. Решітки Дольфа в цьому сенсі дуже чутливі до незначних неточностей розподілу чутливості [18]. Зауважимо також, що критерій оптимальності, введений Дольфом [24], не єдиний. Так, наприклад, може бути використаний критерій В.Г. Ямпольського [25], пов'язаний з мінімізацією розкриття головного максимуму при фіксованому середньому або середньоквадратичному рівні бічних пелюсток.

Таким чином, наднаправленість пов'язується з точністю реалізації коефіцієнтів амплітудно-фазових розподілів чутливості перетворювачів (елементів) антенної системи, як

для режиму прийому, так і для режиму випромінювання. При цьому причини, з яких технічна реалізація подібних антен ускладнена, наступні:

- Антена чутлива до невідповідності розрахункових і реально введених амплітудно-фазових розподілів, що може призводити до практично повної втрати направленості [26];
- Зростання рівня шумів на виході антени у порівнянні з одиночним перетворювачем [26, 27].
- Зниження значення ККД антени порівняно з ККД одиночного перетворювача [28].
- Зростання добротності та відповідно звуження смуги пропускання антени.
- Значний вплив взаємодії елементів антени акустичного поля на результуючу характеристику направленості.

Реалізація помірної наднаправленості в акустиці може проводитись різними способами. Насамперед це пов'язують із необхідністю виконання адитивних операцій в електричних трактах приймальних (випромінюючих) антен. Так, відповідно до робіт [18, 26, 28], для режиму випромінювання в умовах детермінованості сигналів вираз для звукового поля може бути наведений у вигляді:

$$p(u) = \sum_{q=1}^N p_q(u) = \sum_{q=1}^N A_q p_q(u) = \sum_{q=1}^N \alpha_q \frac{1}{r_q} e^{i(r_q - \alpha_q)},$$

де $p_q(u)$ тиск, що розвинуто q -м елементом решітки;

$n = 1; 2; \dots; q; \dots; N$ – число елементів решітки;

r_q, r – відстані від фазових центрів елементів решітки до точки спостереження;

$|A_q|$ – номінальний коефіцієнт амплітудного збудження елементів антени;

α_q – номінальний коефіцієнт фазового збудження.

Зважимо, що внесення амплітудно-фазового розподілу збудження елементів антени забезпечується автономна для кожного із q каналів пристроями амплітудно-фазового розподілу. Також слід зазначити, що зі зростанням ступеня наднаправленості зменшується коефіцієнт корисної дії. Тому ефективність випромінюючих наднаправлених антен невелика.

Крім того, положення про звукопрозорість антенних решіток і модельні уявлення акустичних полів при прийомі звуку [4, 18] використовують припущення про малість (і навіть про відсутність) взаємодії елементів антен по акустичному полю. Такі припущення можуть призводити до значної невідповідності між розрахунковими та експериментальними даними. Така розбіжність тим істотніша, чим ближче досліджувана частотна область до резонансної області перетворювачів системи. Таким чином, випромінюючі антени ще більш ніж приймальні критичні до ситуації взаємодії елементів між собою. У зв'язку з необхідністю використання широких частотних діапазонів роботи наднаправлених антен питання акустичної взаємодії в частині вивчення взаємних опорів випромінювання перетворювачів, або взаємовпливу по полю тиску повинні бути забезпечені сучасними модельними постановками. Не варто нехтувати й загальними спрощеними ситуаціями та рекомендаціями. Зважаючи на те, що при побудові приймальних решіток часто прагнуть до частотної області, що лежить набагато нижче резонансної. Повний власний опір приймачів для таких ситуацій стає досить великим у порівнянні з взаємним опором випромінювання, який можна не враховувати навіть тоді, коли антена є наднаправленою.

При роботі перетворювачів на резонансі зміна характеристики направленості за рахунок співставлення повних опорів перетворювачів і взаємних опорів випромінювання – може бути значним. Таким чином, проєктування випромінюючих систем вимагає

поглибленого вивчення процесів формування акустичних полів в режимах випромінювання та прийому для правильної оцінки та обліку характеру взаємодії елементів решітки по акустичному полю. Зауважимо (робота [20]), що ефективність малогабаритних наднаправлених антен в режимі випромінювання мала навіть частоті резонансу.

Додамо, що збільшення наднаправлених якостей дискретних антен призводить до звуження частотного діапазону, в якому ці якості виявляються. Проте, ще М.І. Карновським у 1940 р. у роботі [29] зазначено, що зі створенням частотно незалежних амплітудно-фазових розподілів можна розширити частотний діапазон наднаправленої антени.

Таким чином, подвійність ситуації у вигляді спірного виграшу в направлених якостях, широкосмуговості та очікуваного програшу в енергетичних характеристиках, – змушує шукати компроміс у частині отримання "помірної наднаправленості" та максимізації коефіцієнта концентрації в заданих умовах.

Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування. Впровадження векторно-фазових методів в акустику дає можливість використовувати спрямовані властивості антени. Таким чином забезпечується поєднання дискретних інтерференційних антен, які реєструють не тільки поле тиску, але й поле коливальної швидкості (pv). Це дозволяє визначати зміни інтенсивності звукового поля при роботі в складі детектора потужності [14, 15].

Методика розрахунку дальності виявлення, процедура приведення оточуючих шумів до входу акустичної антени і сам розрахунок дальності представленні авторами в роботі [30]. В даній роботі у якості прийомної системи обрана група приймачів, що реалізує pv -зонд і виконана у вигляді лінійної дискретної акустичної антени, векторно-фазові властивості якої дозволяють визначити дальність дії антени. В результаті розрахунку дальності виявлення для БПЛА типу крило з урахуванням шуму навколишнього середовища і розглянутої антени на основі pv -зондов, було визначено, що дальність в 1000 м є досяжною.

На основі визначених вище теоретичних засадах та розрахунку дальності виявлення було створено структурну схему пристрою виявлення та шумопеленгування і як результат розроблено патент на корисну модель акустичної антени [13].

Реалізація просторових якостей такої антени визначається шляхом використання адитивних методів обробки інформації. Антена може працювати як пристрій, що забезпечує реєстрацію як скалярних, так і векторних характеристик.

Дана мультикомпонентна антена містить три лінійні дискретні акустичні антени, які складаються з приймачів тиску, розміщені взаємно ортогонально, мають однакові розміри баз і спільний фазовий центр, у якому встановлено приймач тиску (рис. 3).

Перевагою і удосконаленням є те, що у одну з лінійних дискретних акустичних антен зі збільшеною базою додатково встановлено ще два приймачі тиску симетрично відносно фазового центру. Додатково встановлені приймачі тиску збільшують кількість способів виявлення та пеленгування, які можуть бути реалізовані за допомогою пристрою, що забезпечує покращення його функціональних характеристик у складі шумопеленгаторних акустичних комплексів і підвищує точність виявлення та пеленгування цілей. Слід зауважити, що ця антена в силу використання додаткових приймачів може бути віднесеною як до області повітряної, так і до області гідроакустики.

Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування складається з приймачів тиску 0, x_1-x_2 , y_1-y_4 , z_1-z_2 (рис. 3), тракту формування характеристик спрямованості (ТФХС) 1 у складі суматора 2, віднімача 3 дипольного каналу X, віднімача 4 дипольного каналу Y, віднімача 5 дипольного каналу Z, блоку прослуховування (БП) 6 у складі тракту прослуховування ненаправленого (ТПНН) 7, тракту прослуховування направленого (ТПН) 8, блоку виявлення (БВ) 9 у складі тракту виявлення за спектром (ТВС)

10, тракту виявлення за інтенсивністю (ТВІ) 11, тракту виявлення за взаємним спектром (ТВВС) 12 та блоку пеленгування (БП) 13 у складі тракту кореляційного пеленгування (ТКП) 14, тракту фазового пеленгування (ТФП) 15, тракту пеленгування способом рівносигнальних зон (ТПРЗ) 16 (рис. 4).

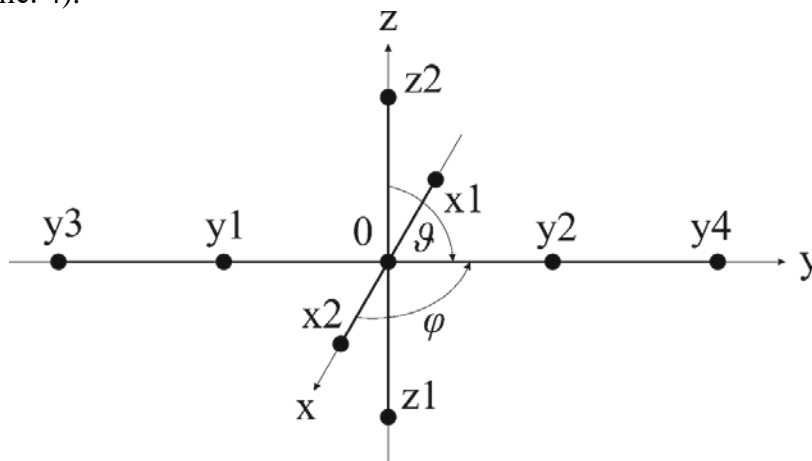


Рис. 3. Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування

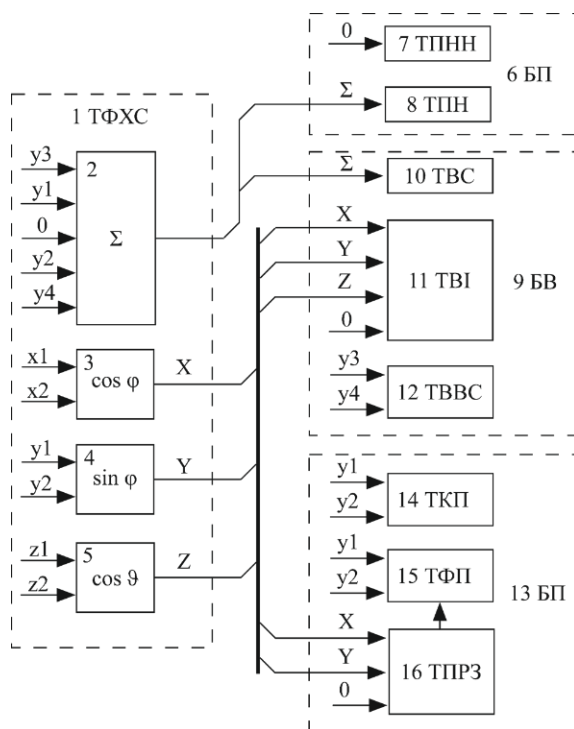


Рис. 4. Структурна схема мультикомпонентної векторної акустичної антени пристроїв виявлення та пеленгування

Пристрій працює наступним чином: при надходженні акустичної хвилі, що створена ціллю, до мультикомпонентної векторної акустичної антени пристроїв виявлення та пеленгування приймачами тиску 0, x_1-x_2 , y_1-y_4 , z_1-z_2 ресструються певні величини тиску. Електричний сигнал, що генерується приймачем тиску 0, використовується у ТПНН 7 для ненаправленого прослуховування місцевості оператором, а електричний сигнал, сформований суматором 2, використовується у ТПН 8 для направленного прослуховування місцевості оператором.

Одночасно електричний сигнал із суматора 2 надходить до ТВС 10, у якому реалізується спектральна обробка просторово відфільтрованого акустичного поля цілі та за допомогою порогового пристрою визначається наявність або відсутність цілі. Після надходження акустичних хвиль до пар приймачів тиску x_1-x_2 , y_1-y_2 , z_1-z_2 , сформовані віднімачами 3–5 електричні сигнали з каналів дипольного прийому X, Y, Z та електричний сигнал з приймача тиску 0 надходять до ТВІ 11, у якому здійснюється обчислення інтенсивності акустичного поля у різних частотних діапазонах та визначається за допомогою порогового пристрою наявність чи відсутність цілі. Одночасно електричні сигнали з приймачів тиску u_3-u_4 надходять до ТВВС 12, де проводиться обчислення взаємного спектру та по обраному критерію виявлення визначається наявність чи відсутність цілі. При цьому результати вимірювань усіх трьох трактів аналізуються оператором, який приймає остаточне рішення.

Згенеровані приймачами тиску y_1-y_2 електричні сигнали надходять до ТКП 14, у якому здійснюється їх кореляційна обробка та обчислюється пеленг на ціль. Одночасно електричні сигнали з приймачів тиску y_1-y_2 надходять до ТФП 15, у якому реалізовано фазовий спосіб пеленгування, що має недолік, викликаний неоднозначністю визначення квадранту знаходження цілі при певних хвильових співвідношеннях між спектральними складовими акустичного поля цілі та розміром бази лінійної дискретної акустичної антени, що реалізована приймачами тиску y_1-y_2 . Цей недолік усувається у ТПРЗ 16, на який надходять електричні сигнали з приймача тиску 0 та з каналів дипольного прийому X, Y. У ТПРЗ 16 реалізовано спосіб рівносигнальних зон, за допомогою якого визначається квадрант знаходження цілі, а також кут пеленгу. Результати вимірювань пеленгу на ціль цими способами аналізуються оператором, який приймає остаточне рішення.

Таким чином, запропонована мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування реалізує повний комплекс заходів щодо виявлення та визначення кутових координат цілі та може застосовуватись у шумопеленгаторних акустичних комплексах.

Авторами в роботі [31] представлені розрахунки дальності та експериментальні дослідження з виявлення БПЛА типу квадрокоптер з використання спрощеного прототипу корисної моделі – акустична антена, що складалась з декількох акустичних перетворювачів.

В подальшому, мають проводитись експериментальні дослідження вже з використанням макету пристрою на основі даного патенту і результатів розрахунку дальності виявлення. Методологія вимірювання просторових характеристик, що до постановки експерименту в частині отримання характеристики направленості (ХН) мають відповідати стандартним методам вимірювання ХН в межах робочого діапазону акустичної антени. При цьому для лабораторних умов вимірювання мають проводитись в ситуації коли оточуючі шуми нижчі 15 дБ. Обробка результатів вимірювання має визначатись в довірчому інтервалу з імовірністю 0,95.

Висновки. Визначено, що застосування векторно-фазових приймачів призводить до формування характеристики направленості дискретних інтерференційних антен в області нижніх частот та дає можливість отримати однонаправлену антену без зміни конструкції. При цьому визначено, що основними характеристиками акустичного поля, що формує антена, є: тиск, та коливальна швидкість. Визначено теоретичні засади побудови систем шумопеленгування. Створено структурну схему трактів виявлення, пеленгування, та вимірювання енергетичних характеристик акустичного поля. Розроблено мультикомпонентну векторну акустичну антену пристроїв виявлення та пеленгування. Розроблена антена може працювати як пристрій, що забезпечує реєстрацію як скалярних, так і векторних характеристик. На основі вказаної антени показано застосування адитивних операцій, що до

можливості формування характеристик направленості різних типів. Слід зауважити, що ця антена в силу використання додаткових приймачів може бути віднесеною як до області повітряної, так і до області гідроакустики. В подальшому напрямки дослідження і розробки систем виявлення БПЛА має бути спрямоване на удосконалення трактів виявлення та вимірювання основних характеристик акустичного поля в умовах лабораторних та натурних експериментів.

References

1. Pavlyuk, O. E., Lypovetska, G. D., Karpenko, E. V., Solovei, V. Yu., Kotsyuba, V. S., Smidovych, O. V., Zatserkovskyi, R. O., Nyzhnyk, O. I., Gurin, O. S., Melenko, Yu. Ya., Bilous, V. V. (2016). Utility model patent No. 105308, 01.03.2016. Ukraine. Positional noise direction finding station [in Ukrainian].
2. Lucas, C., Heard, G., Flemming, R., Pelavas, N. (2013). A robust phase gradient bearing estimation algorithm for a tri-axis cross-dipole acoustic array, with application to a long range autonomous underwater vehicle homing and tracking system. *Acoustical Society of America*, № 14.
3. Didkovskiy, V. S., Leiko, O. H., Kandrachuk, I. V. (2009). Osoblyvosti formuvannya poliv kryvoliniinymy akustychnymy antenamy, utvorenymy z kruhovykh tsylindrychnykh piezokeramichnykh pryimachiv zvuku [Peculiarities of forming floor curvilinear acoustic antennas formed from circular cylindrical piezoceramic sound]. *Sci. news NTUU "KPI" Sci. Tech. journal*, No. 4 (66), P. 34–42. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/36074> [in Ukrainian].
4. Gordienko, V. A. (2007). Vektorno-fazovyue metody v akustike [Vector-phase methods in acoustics]. Moscow: FIZMATLIT, 2007. 480 p. [in Russian].
5. Andebura, V. A., Skrebnev, G. K. (1979). Ob akustiko-mekhanicheskikh kharakteristikakh plastinchatykh preobrazovateley pervogo poriyadka [On the acoustic-mechanical characteristics of first-order plate]. *Akust. Zhurnal*, Vol. 25, No. 3, P. 346–351 [in Russian].
6. Aronov, B. S. (1988). O raschete pyezokeramicheskikh tsylindricheskikh priyemnikov pervogo poriyadka [On the calculation of piezoceramic cylindrical receivers of the first order]. *Akust. Zhurnal*, Vol. 34, No. 5. P. 804–811 [in Russian].
7. Ehrlich, S. L., Frelich, P. D. (1965). Patent US3176262A, 1965-03-30, United States. Directional Sonar System. URL: <https://patents.google.com/patent/US3176262A/en>.
8. Andebura, V. A. (1976). Ob akustiko-mekhanicheskikh kharakteristikakh sferoidalnykh izluchateley i rasseivateley [On the acoustic-mechanical characteristics of spheroidal radiators and diffusers]. *Akust. Zhurnal*, Vol. 22, No. 4, P. 487–486 [in Russian].

Література

1. Павлюк О. Є., Липовецька Г. Д., Карпенко Є. В., Соловей В. Ю., Коцюба В. С., Смідович О. В., Зацерковський Р. О., Нижник О. І., Гурін О. С., Меленко Ю. Я., Білоус В. В. Патент на корисну модель №105308, 01.03.2016. Україна. Позиційна шумопеленгаторна станція.
2. Lucas C., Heard G., Flemming R., Pelavas N. A robust phase gradient bearing estimation algorithm for a tri-axis cross-dipole acoustic array, with application to a long range autonomous underwater vehicle homing and tracking system. *Acoustical Society of America*. 2013. № 14.
3. Дідковський В. С., Лейко О. Г., Кандрачук І. В. Особливості формування полів криволінійними акустичними антенами, утвореними з кругових циліндричних п'єзокерамічних приймачів звуку. *Наукові вісти НТУУ «КПІ»*. 2009. № 4 (66). С. 34–42. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/36074>.
4. Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 480 с.
5. Андебур В. А., Скребнев Г. К. Об акустико-механических характеристиках пластинчатых преобразователей первого порядка. *Акуст. ж.* 1979. Т. 25, № 3. С. 346–351.
6. Аронов Б. С. О расчете пьезокерамических цилиндрических приемников первого порядка. *Акуст. ж.* 1988. Т. 34, № 5. С. 804–811.
7. Ehrlich S. L., Frelich P. D. Directional Sonar System. Patent US3176262A, 1965-03-30, United States. URL: <https://patents.google.com/patent/US3176262A/en>.
8. Андебур В. А. Об акустико-механических характеристиках сфероидальных излучателей и рассеивателей. *Акуст. ж.* 1976. Т. 22, № 4. С. 481–486.

9. Skrebnev, G. K. (1997). Kombinirovannyye gidroakusticheskiye priyemniki [Combined hydroacoustic receivers]. St. Petersburg: ELMOR. 200 p. [in Russian].
10. Bitzer, J., Simmer, K. U. (2001). Superdirective Microphone Arrays. P. 19–38. DOI: 10.1007/978-3-662-04619-7_2.
11. Madhu, N., Masiero, B., Kuno, Y. (2019). A Neural Network Approach to Broadband Beamforming.
12. Mabande, E., Schad, A., Kellermann, W. (2009). Robust superdirectional beamforming for hands-free speech capture in cars. Jan. 2009.
13. Kostiuk, R., Korzhyk, O., Kozeruk, S., Kozak, A., Larin, P. (2018). Mulytkomponentna vektorna akustychna antena prystroiv vyavleniia ta pelenhuvannia [Multicomponent vector acoustic antenna of direction finding and detection devices]. Application number u201809649, 26.09.2018. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/getdocument.php?claimnumber=u201809649&doctype=ou> [in Ukrainian].
14. Korzhyk, O. V., Kozak, A. V., Larin, Ph. M., Kostiuk, R. Yu. (2018). Imitatsiine modeliuвання vymiriuvacha intensyvnosti zvuku v zadachakh shumopelenhuvannia [Designing of sound intensity measuring simulator for bearing tasks]. *Elektronna ta Akustychna Inzheneriia = Electronic and Acoustic Engineering*, Vol. 1, No. 1, P. 27–33. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/33618> [in Ukrainian].
15. Kozak, A. V. (2021). Udoskonalena systema shumopelenhuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Improved Unmanned Aerial Vehicle Noise Direction Finding System]. *Elektronna ta Akustychna Inzheneriia = Electronic and Acoustic Engineering*, Vol. 4, No. 1, 228902–1. DOI: 10.20535/2617-0965.eae.228902 [in Ukrainian].
16. Strutt, J. W. (Lord Rayleigh) (1955). Teoriya zvuka: v 2-kh t. [Theory of sound: in 2 vols.]. Moscow: Gostekhizdat. Vol. 2 [in Russian].
17. Leslie, C. B., Kendall, J. M., Jones, J. L. (1956). Hydrophone for Measuring Particle Velocity. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 28, No. 4, P. 711–715. DOI: 10.1121/1.1908455.
18. Smaryshev, M. D., Dobrovolskiy, Yu. Yu. (1984). Spravochnik po raschetu napravlennykh svoystv gidroakusticheskikh antenn [Handbook on the calculation of the directional properties of hydroacoustic antennas]. Leningrad: Sudostroenie. 304 p. [in Russian].
19. Balyan, R. Kh., Batanogov, E. V., Bogorodsky, A. V. (1989). Terminologicheskii slovar – spravochnik po gidroakustike [Terminological dictionary – reference book on hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie. 368 p. [in Russian].
9. Скребнев Г. К. Комбинированные гидроакустические приемники. Санкт-Петербург: ЭЛМОР, 1997. 200 с.
10. Bitzer J., Simmer K. U. Superdirective Microphone Arrays. 2001. P. 19–38. DOI: 10.1007/978-3-662-04619-7_2.
11. Madhu N., Masiero B., Kuno Y. A Neural Network Approach to Broadband Beamforming. 2019.
12. Mabande E., Schad A., Kellermann W. Robust superdirectional beamforming for hands-free speech capture in cars. Jan. 2009.
13. Костюк Р. Ю., Коржик О. В., Козерук С. О., Козак А. В., Ларін П. М. Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування. Номер заявки u201809649, 26.09.2018, URL: <https://base.uipv.org/searchINV/getdocument.php?claimnumber=u201809649&doctype=ou>.
14. Козак А. В., Ларін П. М., Костюк Р. Ю., Коржик О. В. Імітаційне моделювання вимірювача інтенсивності звуку в задачах шумопеленгування. *Електронна та Акустична Інженерія*. 2018. Т. 1, № 1. С. 27–33. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/33618>.
15. Козак А. В. Удосконалена система шумопеленгування безпілотних літальних апаратів. *Електронна та Акустична Інженерія*. 2021. Vol. 4, No. 1. 228902–1. DOI: 10.20535/2617-0965.eae.228902.
16. Стрэтт Дж. В. (Лорд Рэлей). Теория звука: в 2-х т. М.: Гостехиздат, 1955. Т. 2. 475 с.
17. Leslie C. B., Kendall J. M., Jones J. L. Hydrophone for Measuring Particle Velocity. *J. Acoust. Soc. Am.* 1956. Vol. 28, No. 4. P. 711–715. DOI: 10.1121/1.1908455.
18. Смаришев М. Д., Добровольский Ю. Ю. Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1984. 304 с.
19. Бальян Р. Х., Батаногов Э. В., Богородский А. В. и др. Терминологический словарь – справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1989. 368 с.

20. Pritchard, R. L. (1954). Maximum Directivity Index of a Linear Point Array. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 26, No. 6, P. 1034–1039. DOI: 10.1121/1.1907444.
21. Tokarev, V. I., Didkovskiy, V. S., Akimenko, V. Ya., Zaporozhets, O. I., Savin, V. G. (2001). *Osnovy akustichnoi ekologii* [Fundamentals of acoustic ecology]. Kirovograd: Imeks Ltd. 520 p. [in Ukrainian].
22. Mayatsky, V. I. (1967). О синтезе сверхнаправленных антенн со специальными диаграммами направленности [On the synthesis of superdirectional antennas with special radiation patterns]. *Voprosy special'noj gidroakustiki = Issues Spec. hydroacoustics*, No. 4, P. 31–39 [in Russian].
23. Taylor, J. D. (2018). *Ultra-wideband Radar Technology*. 2018.
24. Dolph, C. L. (1946). A Current Distribution for Broadside Arrays Which Optimizes the Relationship between Beam Width and Side-Lobe Level. *Proc. IRE*, Vol. 34, No. 6. P. 335–348. DOI: 10.1109/JRPROC.1946.225956.
25. Yampolsky, V. G. (1965). Lineynyye anteny s nizkim urovnem bokovykh lepestkov [Linear antennas with a low level of side lobes]. *Electrosvyaz = Telecommunications*, No. 4, P. 26–36 [in Russian].
26. Mayatsky, V. I. (1964). О помехоустойчивости дискретных сверхнаправленных антенн по отношению к собственным шумам их элементов [On the noise immunity of discrete superdirectional antennas in relation to the intrinsic noise of their elements]. *Voprosy special'noj radioelektroniki XVII. Gidroakustika = Quest. Spec. radio Electron. XVII. Hydroacoustics*, No. 12, P. 33–39 [in Russian].
27. Tucker, D. Y. (1958). Signal/noise performance of super directive arrays. *Acoustic*, Vol. 8, No. 1, P. 48–54.
28. Mayatsky, V. I. (1966). О помехоустойчивости дискретных сверхнаправленных антенн по отношению к собственным шумам их элементов [On the issue of maximizing the mechanoacoustic efficiency of a group of point radiators]. *Akust. Zhurnal*, Vol. 12, No. 2, P. 137–142 [in Russian].
29. Karnovsky, M. I. (1940). Napravlennyye svoystva sfericheskikh izluchateley [Directional properties of spherical emitters]. *Zhurnal tehnikeskoy fiziki = Journal of Technical Physics*, Vol. 10, No. 12, P. 13–22 [in Russian].
30. Kabushka, Y. V., Zotko, A. S., Kandrachuk, I. V., Korzhyk, O. V. (2018). Dalnost obnaruzheniya malyykh vozdushnykh ob'ektov nazemnoy sistemoy shumopelengovaniya [Range of Detection of Small Air Objects by the Grounding Noise Receivers System].
20. Pritchard R. L. Maximum Directivity Index of a Linear Point Array. *J. Acoust. Soc. Am.* 1954. Vol. 26, No. 6. P. 1034–1039. DOI: 10.1121/1.1907444.
21. Дідковський В. С., Акіменко В. Я., Запорожець О. І., Савін В. Г., Токарев В. І. Основи акустичної екології: навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл. Кіровоград: ПВЦ ТОВ "Імекс ЛТД", 2001. 520 с.
22. Маяцкий В. И. О синтезе сверхнаправленных антенн со специальными диаграммами направленности. *Вопросы специальной гидроакустики*. К., 1967. № 4. С. 31–39.
23. Taylor J. D. *Ultra-wideband Radar Technology*. 2018.
24. Dolph C. L. A Current Distribution for Broadside Arrays Which Optimizes the Relationship between Beam Width and Side-Lobe Level. *Proc. IRE*. 1946. Vol. 34, No. 6. P. 335–348. DOI: 10.1109/JRPROC.1946. 225956.
25. Ямпольский В. Г. Линейные антенны с низким уровнем боковых лепестков. *Электросвязь*. 1965. № 4. С. 26–36.
26. Маяцкий В. И. О помехоустойчивости дискретных сверхнаправленных антенн по отношению к собственным шумам их элементов. *Вопросы специальной радиоэлектроники XVII. Гидроакустика*. 1964. Вып. 12. С. 33–39.
27. Tucker D. Y. Signal/noise performance of super directive arrays. *Acoustic*. 1958. Vol. 8, No. 1. P. 48–54.
28. Маяцкий В. И. К вопросу о максимизации механоакустического КПД группы точечных излучателей. *Акуст. ж.* 1966. Т. XII, № 2. С. 137–142.
29. Карновский М. И. Направленные свойства сферических излучателей. *Журнал технической физики*. 1940. Т. X, № 12. С. 13–22.
30. Кабушка Я. В., Зотько А. С., Кандрачук І. В., Коржик О. В. Дальність виявлення малих повітряних об'єктів наземною системою шумопеленгування. *Мікросист., Електрон. та Акуст.* 2018. Т. 23, Вип. 5. С. 48–56. DOI:

Mikrosist., Elektron. ta Akust. = Microsystems, Electronics and Acoustics., Vol. 23, No. 5, P. 48–56.
DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.5.131483> [in Russian]

31. Korzhyk, O., Kozak, A., Didkovskiy, V., Naida, S. (2020). Construction the Device of Acoustic Noise Air Bearing. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, P. 683–687, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088899.

<https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.5.131483>.

31. Korzhyk O., Kozak A., Didkovskiy V., Naida S. Construction the Device of Acoustic Noise Air Bearing. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine. 2020. P. 683–687. DOI: 10.1109/ELNANO 50318.2020.9088899.

KOZAK ANDRII

Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4756-7931>
Scopus Author ID: 57214137197
E-mail: andreka1996@gmail.com

KORZHYK OLEKSII

Dr.Sc.(Eng.), Professor
Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6793-1676>
E-mail: ov.korzjik@aae.kpi.ua

KOZAK A. V., KORZHYK O. V.

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

**IMPROVEMENT OF UAV NOISE DIRECTION FINDING SYSTEMS
USING VECTOR-PHASE METHODS AND SUPERDIRECTION**

Purpose. Increasing the detection range of noise direction finding systems by providing the acoustic antenna with properties to ensure the registration of both scalar and vector characteristics of the acoustic field.

Methodology. The use of vector-phase methods that ensure the formation of directivity characteristics in the area of lower frequencies.

Findings. It was determined that the use of vector-phase receivers leads to the formation of the directivity characteristics of discrete interference antennas in the region of lower frequencies and makes it possible to obtain a unidirectional antenna without changing the design. At the same time, it was determined that the main characteristics of the acoustic field formed by the antenna are: pressure and oscillating speed. The theoretical foundations of the construction of noise direction finding systems have been defined. A multi-component vector acoustic antenna for detection and direction finding devices has been developed.

Originality. The possibility of improving the systems of air and hydroacoustic noise direction finding due to the use of superdirectionality effects and vector-phase methods has been established. A multi-component vector acoustic antenna for detection and direction finding devices is proposed. It was determined that the implementation of vector-phase methods leads to the fact that the antenna maintains or improves the signal-to-noise ratio in the tasks of receiving acoustic signals in the air. In this way, a combination of discrete interference antennas is provided, which register not only the pressure field, but also the oscillating velocity field.

Practical value. The proposed theoretical propositions can be used for the development of sound direction finding acoustic complexes for both air and hydroacoustic purposes. The proposed multi-component vector acoustic antenna of detection and direction finding devices implements a full set of measures for detecting and determining the angular coordinates of the target and can be used in noise direction finding acoustic complexes.

Keywords: acoustic field; vector-phase methods; superdirectionality; acoustic antenna; UAV; direction finding; acoustic noises.