

УДК 621.37

*Бугайов М. В., к.т.н., ст. досл., ЗННДВ НДУ*

*Поздняков В. В., ад'юнкт*

*Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова*

## **МЕТОД ПРОСТОРОВО-СПЕКТРАЛЬНОГО ОБРОБЛЕННЯ ГРУПОВИХ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ГВИНТОМОТОРНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

В умовах сучасних збройних конфліктів спостерігається стрімке зростання масштабів застосування ударних гвинтомоторних літальних апаратів (ГЛА). Їх пріоритетними цілями є об'єкти критичної інфраструктури та енергетичного сектору. Вони здатні здійснювати політ на надмалих висотах поза зоною прямої видимості радіолокаційних станцій. Виникає потреба у розвитку пасивних акустичних систем виявлення ГЛА. Перехід до групових польотів ГЛА зумовлює складну акустичну обстановку. Це зумовлює критичну необхідність пошуку та створення нових просторово-спектральних методів оброблення групових сигналів, здатних виділяти окремі джерела в багатокомпонентному звуковому сигналі.

Вихідними даними для роботи запропонованого методу просторового оброблення є результати спектрального аналізу групового сигналу, а саме кількість ГЛА, що одночасно перебувають у зоні дії акустичного детектора та набори їхніх індивідуальних спектральних сигнатур. Зокрема, для кожного ідентифікованого об'єкта вже виділено масиви значень його фундаментальної частоти та відповідних вищих гармонік. Отримання цих даних забезпечується розділенням алгоритмами шляхом адаптивного порогового оброблення та спектрального усереднення [1]. Сутність алгоритму полягає у просторово-спектральній фільтрації сигналів на рівні мікрофонних пар. Для збереження фазової інформації вихідні акустичні сигнали перетворюються у частотно-часову область за допомогою віконного перетворення Фур'є, формуючи масиви комплексних спектральних відліків  $Z(t, f) = A(t)e^{j2\pi f t + \varphi}$ . Процес виділення окремого ГЛА реалізується шляхом фільтрації цих масивів динамічним спектральним фільтром  $H(t, f)$ , що синтезований на основі апріорно визначених кінематичних параметрів. Цей фільтр функціонує як багатосмуговий адаптивний гребінчастий фільтр. Його принциповою особливістю є жорстке присвоєння нульових вагових коефіцієнтів усім частотним відлікам, які не належать спектральній сигнатурі обраного ГЛА в момент часу аналізу. Натомість одиничні значення фільтра динамічно супроводжують виділені фундаментальну частоту та гармоніки,

адаптуючись до їхнього пропорційного доплерівського зсуву. Операція поелементного множення комплексного взаємного спектра мікрофонної пари на коефіцієнти фільтра залишає лише відфільтрований спектр  $Y_{12}(t, f)$ :

$$Y_{12}(f, t) = H(f, t) \cdot (Z_1(f, t) \cdot Z_2^*(f, t)),$$

де  $Z_1(t, f)$  та  $Z_2(t, f)$  комплексні спектри першого та другого мікрофонів відповідно, а  $*$  – знак спряження.

Завершальним етапом алгоритму є просторова локалізація ГЛА на основі отриманих фазових зсувів. Для визначення міжканальних часових затримок  $\Delta\tau$  застосовується модифікований метод узагальненої взаємокореляції з фазовим перетворенням (GCC-PHAT) [2], що виконується безпосередньо в частотній області:

$$R_{12}(\tau) = F^{-1} \left\{ \frac{Y_{12}(f, t)}{|Y_{12}(f, t)|} \right\},$$

де  $F^{-1}$  – оператор зворотного перетворення Фур'є, а  $|Y_{12}(t, f)|$  – модуль відфільтрованого спектра. Завдяки роботі попереднього каскаду алгоритм оперує виключно цільовими фазовими відліками, а нормалізація їхніх амплітуд додатково мінімізує похибки, викликані перевідбиттями в середовищі. Виконання зворотного перетворення Фур'є над відфільтрованим взаємним спектром дозволяє виділити єдиний глобальний кореляційний максимум, що відповідає істинній затримці поширення сигналу між мікрофонною парою.

Наявність сукупності таких часових затримок, отриманих від різних просторово рознесених пар мікрофонної решітки, формує систему геометричних рівнянь. Її розв'язання дозволяє однозначно обчислити просторовий кут (азимут  $\theta$ ) напрямку на ГЛА. Послідовне виконання описаної процедури у кожному часовому вікні забезпечує формування неперервних просторових траєкторій польоту для кожного окремого літального апарата в умовах групового польоту.

### Список використаних джерел

1. Поздняков В. В. Застосування алгоритму CFAR для виявлення гармонічних складових акустичних сигналів засобів повітряного нападу // Збірник наукових праць ЖВІ. 2025. Вип. 28 (I). С. 51-64.
2. Lim J., Joo J., Kim S. C. Performance Enhancement of Drone Acoustic Source Localization Through Distributed Microphone Arrays. Sensors. 2025. Vol. 25, No. 6. P. 1928.