

УДК 623.765.4

Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів

Сокольський С. О., Мовчанюк А. В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

E-mail: sokolskyi@ros.kpi.ua, movchanuk@rtf.kpi.ua

Безпілотні летальні апарати (БПЛА) або дрони широко використовуються в багатьох сферах, але в той же час почала стрімко зростати і кількість правопорушень з їх використанням. Тому задача виявлення дронів є актуальною. Метою дослідження, наведеного в статті, є порівняння та критичний аналіз основних методів та засобів виявлення малих безпілотних летальних апаратів. В роботі було досліджено потенційні можливості наступних методів виявлення дронів: оптичний метод, радіолокаційний та акустичний методи. Встановлено, що оптичний метод передбачає використання камер високої роздільної здатності у світлий час доби, але він занадто залежний від природних факторів навколишнього середовища, наприклад, дощу або туману. У темний час доби для детектування дронів зазвичай використовують інфрачервоні оптичні пристрої. Основними недоліками такого підходу є невисока максимальна дальність виявлення цілі та поглинання атмосферою ІЧ випромінювання, окрім «вікон» з межами довжин хвиль 3–4 та 8–12 мкм. В результаті наведених розрахунків встановлено, що дальність визначення цілі оптичним методом складає близько 230 метрів, а з використанням ІЧ приймача 73 метри. Зазначено, що радіолокаційні методи поділяються на активні та пасивні. Радіолокаційні системи можуть працювати у будь-яку частину доби та дозволяють виявляти малі безпілотні літальні апарати (МЛА) на відстанях до кількох кілометрів (9,3 км). В результаті аналізу спектру радіочастотного сигналу можна отримати найбільш детальну інформацію про ціль. Основним недоліком радіолокаційних методів є те, що всі РЛС не працюють у ближній зоні. Встановлено, що акустичні сенсори дозволяють ефективно виявляти малі безпілотні летальні апарати незважаючи на рельєф оточуючого середовища, але результати залежать від наявних акустичних фонових шумів та завад. Ефективна дальність виявлення цілі складає біля 75 метрів. У статті наведено порівняння результатів розрахунку, на основі експериментальних даних, дальності виявлення малого безпілотного літального апарату «DJI Mini 2 Fly More Combo». У висновках дослідження зазначено, що найбільш ефективним підходом є комбінація відомих методів виявлення БПЛА та наведено рекомендації, щодо побудови таких систем.

Ключові слова: дрон; малий безпілотний літальний апарат; МЛА; детекція; максимальна дальність виявлення

DOI: [10.20535/RADAP.2021.87.46-55](https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.46-55)

1 Вступ

Безпілотний літальний апарат («БПЛА» або «дрон») представляє собою повітряне судно без пілота, що дистанційно керується з іншого місця: з землі, з борту іншого повітряного судна, з космосу, або запрограмоване і повністю автономне (Рис. 1).

Ідея появи БПЛА виникла досить давно, але в сьогоденнішому вигляді вони з'явилися тільки в останні десятиліття, в період активного розвитку робототехніки та штучного інтелекту. Це стало можливим завдяки розвитку і вдосконаленню ряду технологій, перш за все супутникових радіонавігаційних технологій, сенсорних технологій, радіолокаційних, оптичних, акустичних, інфрачервоних (ІЧ), а також появи на борту дронів досить потужних

обчислювальних засобів, які дозволяють інтерпретувати дані, отримані з цих видів сенсорів.



Рис. 1. Малий безпілотний літальний апарат (дрон) «DJI Mini 2 Fly More Combo»

Безпілотні літальні апарати здатні виконувати широкий спектр корисних для людства функцій, перш за все це моніторинг та контроль територій, аеро-, фото- або відеозйомку, крім того БПЛА здатні здійснювати доставку вантажів, а також брати участь в проведенні пошуково-рятувальних операцій.

Згідно з класифікацією безпілотних літальних апаратів, запропонованою Міжнародною асоціацією з питань безпілотних літальних систем *AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International)*, малі безпілотні літальні апарати (МЛА) мають наступні параметри [1]:

- злітна маса: 0,025 - 150 (кг);
- дальність польоту: 1 - 30 (км);
- висота польоту: 100 - 300 (м);
- тривалість польоту: 0,5 - 2 (г).

Незважаючи на те, що дрони здатні виконувати велику кількість корисних для людства функцій, все частіше почали фіксуватись правопорушення при використанні малих безпілотних літальних апаратів, наприклад, доставка заборонених предметів, бомб, контрабанди, напади на людей, несанкціонована зйомка державних воєнних об'єктів та заборонених територій, що призводить до витоку конфіденційної інформації.

У світлі цього актуальною є *науково-технічна проблема* — проаналізувати основні методи та засоби для виявлення малих безпілотних літальних апаратів, визначити найбільш ефективний, що дозволить швидко та своєчасно розгортати контрзаходи, усуваючи потенційні неприємні наслідки.

Існують три основні технічні методи детектування малих безпілотних літальних апаратів — оптичний, радіолокаційний та акустичний.

Задачею цієї статті є виявлення найбільш ефективного методу детектування МЛА.

2 Методи виявлення і локалізації МЛА

2.1 Оптичний метод

Перспективним та досить інформативним методом виявлення малих безпілотних літальних апаратів є оптичний метод.

Системи оптичної локації, як правило, містять пасивні сенсори різних оптичних діапазонів. Джерелами електромагнітного випромінювання оптичного діапазону для цих пристроїв є лазери, що працюють в імпульсному або в безперервному режимі. Окремі оптичні пристрої служать як для формування передавання випромінювання лазера, так і для приймання відбитого від об'єкта спостереження лазерного випромінювання.

В окремих системах оптичної локації застосовуються індивідуально адаптовані оптичні формуючі пристрої для пасивних сенсорів, що працюють в різних оптичних діапазонах довжин хвиль, а також скануючий пристрій (камера спостереження високої роздільної здатності), що забезпечує огляд заданого простору. Для функціонування системи застосовуються обчислювальні пристрої, що забезпечують обробку отриманих вхідних сигналів, проведення вбудованого контролю даних і видачу необхідної інформації у зовнішній пристрій.

Можна виділити наступні недоліки оптичних систем:

- невеликі кути огляду простору по азимуту;
- малі швидкості сканування заданого простору;
- недостатній захист застосовуваних сенсорів від зовнішніх і внутрішніх засвічень.

Оптичні системи зазвичай працюють у двох режимах сканування — пасивному та активному.

Режим пасивного сканування. У цьому режимі камера з ІЧ сенсором (лінійка фотоелементів) повертається на відповідний кут місця, скануючи навколишній простір. При виявленні об'єкта з температурним контрастом сигнал з ІЧ сенсора подається на процесор (ПР) — керуючий взаємодією всіх блоків і пристроїв за зовнішніми командам. Команда з ПР подається на телевізійний канал нічного бачення (ТКНБ) для спрацьовування електронного затвора електрооптичного перетворювача світла (ЕОП). Отримана інформація з ТКНБ надходить в ПР, який визначає величину кутової неузгодженості між «істинним» об'єктом і його температурним аналогом. Кутові координати «істинного» об'єкта передаються у зовнішній пристрій. У разі відсутності інформації з ТКНБ про «істинне» положення об'єкта, що спостерігається, у зовнішній пристрій видаються кутові координати об'єкта з температурним контрастом.

Режим активного сканування. Цей метод включає в себе підсвічування атмосфери лазерним випромінюванням, приймання відбитого випромінювання і використання обчислювально-аналітичної системи. Сканування атмосфери в тривимірному просторі здійснюють за допомогою керованого скануючого лазера. Малі безпілотні літальні апарати або турбулентні потоки, викликані ними, відхиляють в просторі промінь когерентного джерела світла.

Відхилення променя лазерного джерела світла контролюють телеметричним пристроєм. Технічний результат — підвищення ймовірності виявлення об'єктів і підвищення точності вимірювання просторових координат цілі. Прикладами таких систем є наземні лазерні далекоміри, наземні локатори, лазерні системи розвідки тощо.

Зазвичай при застосуванні системи оптичної локатії з камерами спостереження високої роздільної здатності зображення об'єктів [2]. Далі відбувається обробка таких зображень і виділяються ділянки відповідні малому безпілотному літальному апарату.

Важливо зауважити, що обробку зображень необхідно здійснювати в реальному масштабі часу. Також значна проблема з'являється при моніторингу величезної території об'єкту: на досить великій відстані малі безпілотні літальні апарати мають малі кутові розміри і на світлочутливій матриці камери вони будуть займати невелику кількість пікселів, тому їх легко переплутати зі звичайними птахами та подати сигнал хибної тривоги (Рис. 2).

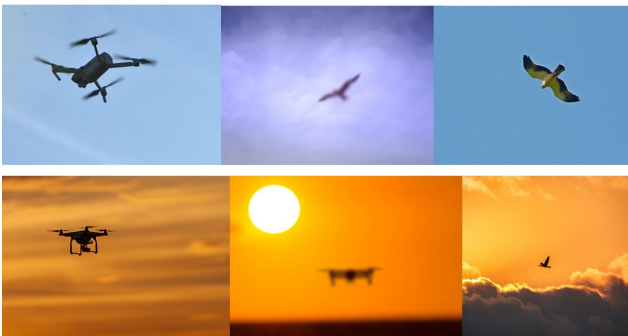


Рис. 2. Зображення МЛА та птахів при різній роздільній здатності

Саме тому і використовують спеціальні алгоритми цифрової обробки зображень для виділення малих безпілотних літальних апаратів на тлі досить складних фонових об'єктів. Приклад алгоритму показано на рисунку 3.

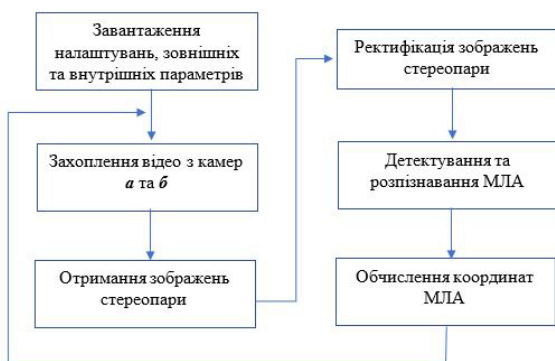


Рис. 3. Алгоритм обробки зображень

Оптичне детектування малих літальних апаратів значно залежить від факторів оточуючого середовища. Очевидно, що погіршення результатів виявлення МЛА відбувається через збільшення зони огляду та поля зору, обмеження прямої видимості, наприклад, через сильний туман, пил або з настанням ночі.

Дальність детектування дронів завжди менше або рівне деякому максимальному значенню R_{max} , що відповідає найбільш сприятливому поєднанню фізичних умов спостереження. При цьому закон розподілу дальності детектування найбільш повно характеризує засоби й умови спостереження [3].

Дальність виявлення малих безпілотних літальних апаратів оптичними системами R_{opt} (м) визначають за таким виразом [4]:

$$R_{opt} = \sqrt{\frac{B_{\lambda} S_{\square} k_{\square} S_{\text{пр}} \Delta \lambda \tau_{\text{пр}} \tau_{\text{сер}}}{4\pi P_{\text{пор}}}}, \quad (1)$$

де B_{λ} – спектральна щільність випромінювання поверхні малих безпілотних літальних апаратів за рахунок освітлення її сонцем ($Вт/см^2 \cdot мкм \cdot ср$); S_{\square} – ефективна поверхня відбиття цілі в оптичному діапазоні ($м^2$); k_{\square} – коефіцієнт відбиття поверхні дрону; $S_{\text{пр}}$ – ефективна площа об'єктива, на яку падає випромінювання ($м^2$); $\Delta \lambda$ – смуга пропускання оптичного фільтра ($мкм$); $P_{\text{пор}}$ – порогова чутливість приймального пристрою ($Вт/см^2$); $\tau_{\text{пр}}$, $\tau_{\text{сер}}$ – коефіцієнти пропускання приймального пристрою та відповідно середовища.

Розрахуємо максимальну дальність виявлення малого літального апарату оптичною системою на прикладі квадрокоптера «DJI Mini 2 Fly More Combo» (Рис. 1). Його розміри у «відкритому» стані (з пропелерами): $245 \times 289 \times 56$ мм (Д×Ш×В).

Будемо вважати, що процес детектування відбувається при нормальних погодних умовах, у ясний сонячний день, тому спектральна щільність випромінювання поверхні цілі $B_{\lambda} = 10^2$ $Вт/см^2 \cdot мкм \cdot ср$.

Визначимо значення ефективної поверхні відбиття (ЕПВ) дрону. Відбивальні властивості поверхні об'єктів зазвичай можна охарактеризувати і через ефективну поверхню розсіювання (ЕПР) [5]. Щоб виміряти ЕПР з високою точністю, необхідно взяти реальні об'єкти та провести експерименти на полігонах або у радіочастотних безехових камерах. Через відсутність необхідного обладнання, ЕПР для дрону «DJI Mini 2 Fly More Combo» розраховано теоретично на прикладі моделі БПЛА RQ-1 «Predator». У [6] авторами проведені необхідні експерименти та зроблено висновки, що для моделі RQ-1 «Predator» кругова медіанна ЕПР (значення ЕПР, яке використовується при розрахунках дальності виявлення БПЛА з ймовірністю 0,5) складає $0,93$ $м^2$. Для моделі квадрокоптера «DJI Mini 2 Fly More Combo» значення ЕПР = $0,033$ $м^2$, тому що наведена модель дрону, менша за RQ-1 «Predator» у 28 разів.

Коефіцієнт відбиття поверхні $k_{\square} = 0,9$, вважаємо, що він не залежить від кута падіння світла на об'єкт, а також, що корпус малого безпілотного літального апарату буде максимально контрастним кольору до оточуючого середовища.

Діаметр об'єктива камери виявлення $d = 50$ мм та має форму круга, тому при ідеальних умовах

ефективна площа, на яку падає випромінювання дорівнює: $S_{\text{про}} = \frac{\pi d^2}{4} = 1,963 \text{ м}^2$.

У якості смуги пропускання оптичного фільтра будемо використовувати видимий діапазон довжин хвиль: границя коротких хвиль 380...400 нм, границя довгих хвиль 760...780 нм. Тому $\Delta\lambda = 780 - 380 = 500 \text{ нм}$.

Приймальний пристрій оптичної системи буде використовувати аналогову відеокамеру високої чутливості з 1/3-дюймовою ПЗС-матрицею *Sony 960H EXview HAD CCD II*, процесором *Sony Effio-E*. Камера має розширений динамічний діапазон 52 дБ і високе розширення 680/700 ТВЛ в кольоровому/чорно-білому режимах. Програмний режим «день/ніч» відеокамери спостереження дозволяє їй формувати кольорове/чорно-біле зображення при мінімальних рівнях освітленості (0.03/0.01 лк), а система шумоподавлення 2D DNR забезпечує чіткість зображення при зниженому освітленні [7]. Тому порогова чутливість камери при формуванні кольорового зображення дорівнюватиме 0.03 лк (відношення С/Ш 52 дБ) або $4.39 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/см}^2$.

Коефіцієнти пропускання приймального пристрою і середовища приймемо рівними 1, вважаємо, що ефект затухання не відбувається та не має розсіювання.

Підставимо знайдені параметри у формулу (1):

$$R_{\text{онт}} = \sqrt{\frac{10^2 \cdot 0.033 \cdot 1.963 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1}{4\pi \cdot 4.39 \cdot 10^{-9}}} = 230 \text{ м.}$$

Для збільшення імовірності детектування малих безпілотних літальних апаратів у нічний час, зазвичай використовують тепловізійні камери. У цьому випадку зображення формуються в інфрачервоному діапазоні електромагнітних хвиль.

Основне тепло виділяється зазвичай силовою установкою МЛА, в меншому ступені електронними компонентами, а також точками гальмування на несучих краях крил, пропелерів і гвинтів [3]. Розробники БПЛА, щоб запобігти випромінненню в інфрачервоному діапазоні в напрямку розташованих на землі приймачів, намагаються або направити його в сторону неба, створюючи нові спеціальні конструкції дронів, або використовувати матеріали з низькою випромінювальною здатністю, наприклад, срібло та алюміній [8].

Малі безпілотні літальні апарати можливо виявити за їх випромінювальною здатністю, контрастом та площею випромінювання.

Розподіл інтенсивності випромінювання для реальних (сірих) тіл $J_{\text{с.т.}}(\lambda, T)$ визначають за законом Планка [9]:

$$J_{\text{с.т.}} = \epsilon \cdot \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}, \quad (2)$$

де $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ — стала Планка; $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі; λ — довжина хвилі

(мкм); $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — стала Больцмана; T — абсолютна температура нагрітого тіла (К); ϵ — коефіцієнт випромінювання.

Атмосфера поглинає інфрачервоне випромінювання краще, ніж світло. Але існують так звані атмосферні вікна для ІЧ діапазону з межами довжин хвиль 3–4 мм та 8–12 мм, тому інфрачервоні пристрої проектують так, щоб приймати в одному з «вікон», не дивлячись на те, у якому з них знаходиться максимум випромінювання МЛА згідно із законом Планка.

Обробка одержуваного зображення відбувається за допомогою спеціальних алгоритмів, виділяються області, що відповідають малим безпілотним літальним апаратам, тобто відбувається їх виявлення.

У ряді випадків для того, щоб підвищити ефективність оптичного інфрачервоного методу використовують «комплексування», тобто на основі оптичного інфрачервоного зображення формується загальне інтегральне зображення виходячи з даних парціальних зображень.

Максимальну дальність виявлення малих безпілотних літальних апаратів (з температурою T) пасивними інфрачервоними системам $R_{\text{ІЧ}}(M)$ визначають за наступним виразом [4]:

$$R_{\text{ІЧ}} = \sqrt{\frac{S_{\text{ціч}} S_{\text{пріч}} \tau_{\text{пріч}}}{P_{\text{поріч}}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\text{спіч}}(\lambda) \cdot J_{\text{с.т.}}(\lambda) d(\lambda)}, \quad (3)$$

де $S_{\text{ціч}}$ — площа проекції МЛА на картинну площину, перпендикулярну напрямку спостереження цілі (м^2); $S_{\text{пріч}}$ — ефективна площа приймальної апертури ІЧ пристрою (м^2); $\tau_{\text{пріч}}$ — коефіцієнти пропускання приймального пристрою; $P_{\text{поріч}}$ — порогова чутливість приймального пристрою (Вт/см^2); λ_1, λ_2 — межі спектрального діапазону приймального пристрою (мкм); $\tau_{\text{спіч}}(\lambda)$ — спектральний коефіцієнт пропускання середовища.

За формулою (3) розраховуємо максимальну дальність детектування малого безпілотного літального апарату «*DJI Mini 2 Fly More Combo*» за допомогою інфрачервоної системи.

За законом Планка необхідно визначити розподіл інтенсивності випромінювання $J_{\text{с.т.}}(\lambda, T)$ для сірого тіла (2) при довжині хвилі $\lambda = 2 \text{ мкм}$. Матеріал корпусу дрона «*DJI Mini 2 Fly More Combo*» — пластик, тому згідно з [10] коефіцієнт випромінювання $\epsilon = 0.95$, при температурі оточуючого середовища 20°C абсолютна температура нагрітої ділянки малого безпілотного літального апарату дорівнюватиме 298 K , відповідно значення інтенсивності випромінювання дрону:

$$J_{\text{с.т.}} = 0.95 \cdot \frac{2\pi \cdot 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot (3 \cdot 10^8)^2}{(2 \cdot 10^{-6})^5} \times \frac{1}{e^{\frac{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} - 1}} = 362.384 \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^3}.$$

За формулою (3) максимальна дальність виявлення малого безпілотного літального апарату «*DJI Mini 2 Fly More Combo*» дорівнює:

$$R_{\text{ГЧ}} = \sqrt{\frac{0.033 \cdot 1.963 \cdot 10^{-3}}{4.39 \cdot 10^{-3}} \int_{0.78 \cdot 10^{-6}}^{1000 \cdot 10^{-6}} 1 \cdot 362.384 d(\lambda)} = 73 \text{ м.}$$

Бездоганні інфрачервоні пристрої спостереження знаходяться лише на стадії розробки, а детектування малих літальних апаратів зі слабким випромінюванням можливе лише за малих тілесних кутів, приблизно 5° . На практиці ефективний процес детектування дронів потребує створення спеціальних високочутливих інфрачервоних пристроїв, розробки спеціальних алгоритмів огляду простору та прийняття рішення про наявність цілі або її відсутність у зоні контролю. Основними технічними характеристиками таких систем є дальність її дії та час огляду. Ці характеристики визначають за ступенем оптимізації всіх елементів і алгоритмів системи детектування безпілотних літальних апаратів. Крім того, для контролю великих тілесних кутів потрібні багатопроменеві інфрачервоні системи, у яких деяка кількість нерухомих променів "очікують" прольоту цілі [11].

2.2 Радіолокаційний метод

Радіолокаційний метод використовується в двох режимах — *активної* і *пасивної* радіолокації.

Активний метод радіолокації є досить ефективним, оскільки має досить великий імпульсний об'єм пошуку, а також значну дальність виявлення [12]. При використанні цього методу радіолокаційні станції випромінюють зондуючий сигнал, коли він відбивається від МЛА, то надходить на приймач станції. Далі відбувається процес аналізу сигналу, звідки ми можемо визначити просторові координати, дальність знаходження малого літального апарату, а також отримувати деяку додаткову інформацію про об'єкт.

Зокрема, в сигналі міститься інформація про сам об'єкт, його тип, кількість гвинтів, ступінь завантаженості. Така інформація міститься в мікродоплерівській сигнатурі, яку ми «витагуємо» з сигналу, що приходить на вхід системи (рис. 4).

Радіолокаційні системи дозволяють детектувати дрони на досить великій відстані, порядку десятків кілометрів, якщо вони досить великі за розміром (більша площа відбиття сигналу) та мають значну вагу, але максимальна дальність виявлення значно зменшується в міру зменшення ваги та розмірів безпілотних літальних апаратів. Для МЛА вона приблизно становить одиниці км або сотні метрів. В таких умовах буде недостатньо часу, щоб привести методи протидії в функціональну готовність. Також на якість детектування впливає і те, що багато безпілотних літальних апаратів виготовляють із композитних матеріалів, тому електромагнітні

хвилі проходять крізь поверхню дронів та лише частково відбиваються від неї [13].

Дальність виявлення малого безпілотного літального апарату «*DJI Mini 2 Fly More Combo*» активною радіолокаційною станцією $R_{\text{РЛС}_{\text{акт}}}$ (м) можна визначити за таким виразом [12]:

$$R_{\text{РЛС}_{\text{акт}}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пр}} G_{\text{пер}} \lambda^2 \sigma_{\text{МЛА}}}{(4\pi)^3 P_{\text{пор}_{\text{РЛС}}}}, \quad (4)$$

де $P_{\text{пер}}$ – потужність передавача (Вт); $G_{\text{пер}}$ – коефіцієнт підсилення передавальної антени; $G_{\text{пр}}$ – коефіцієнт підсилення приймальної антени; $\sigma_{\text{МЛА}}$ – ЕПР малого безпілотного літального апарату (м^2); $P_{\text{пор}_{\text{РЛС}}}$ – порогова потужність сигналу на вході приймача РЛС (Вт).

Для розрахунку максимальної дальності виявлення малого безпілотного літального апарату візьмемо РЛС дециметрового діапазону з потужністю передавача 1.5 кВт , з коефіцієнтами підсилення передавальної (2500) та приймальної (3000) антени. ЕПР квадрокоптеру «*DJI Mini 2 Fly More Combo*» дорівнює 0.033 м^2 . Також будемо вважати, що мінімальна потужність сигналу на вході приймального пристрою радіолокаційної станції $1.52 \cdot 10^{-12}$ Вт. Підставимо значення параметрів у (4):

$$R_{\text{РЛС}_{\text{акт}}} = \sqrt[4]{\frac{1.5 \cdot 10^3 \cdot 2500 \cdot 3000 \cdot 0.25^2 \cdot 0.033}{(4\pi)^3 \cdot 1.52 \cdot 10^{-12}}} = 9365 \text{ м.}$$

Досить інформативним є пасивний метод радіолокації. При використанні цього методу засоби радіотехнічної розвідки (РТР) виявляють малі безпілотні літальні апарати шляхом приймання та аналізу радіосигналів, які випромінюються радіозасобами, наприклад, для встановлення зв'язку з пультом керування, для передачі відео зображення, одержуваного безпосередньо за допомогою дрона або для отримання навігаційної інформації тощо. Такі радіоелектронні засоби зазвичай розташовані безпосередньо на борту МЛА.

Але пасивна радіолокація дозволяє встановити лише напрямок руху безпілотних літальних апаратів, а точність детектування зростає зі збільшення часу спостереження. Проте цей метод забезпечує досить велику дальність виявлення, яка визначається за наступною формулою [14]:

$$R_{\text{РЛС}_{\text{пас}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{дж}_{\text{РТР}}} G_{\text{дж}}(\epsilon, \beta) G_{\text{пр}}(\epsilon, \beta) \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\text{пор}_{\text{РТР}}}}, \quad (5)$$

де $P_{\text{дж}_{\text{РТР}}}$ – потужність сигналу джерела випромінювання (Вт); $G_{\text{дж}}(\epsilon, \beta)$ – коефіцієнт підсилення

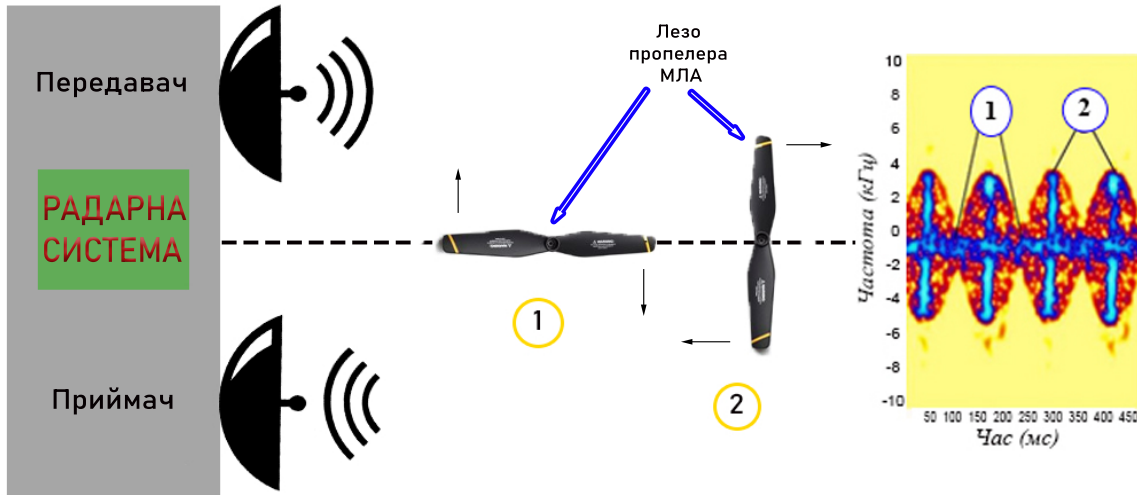


Рис. 4. Мікро-доплерівська модуляція сигналу МЛА

антени джерела випромінювання залежно від сферичних координат; $G_{пр}(\epsilon, \beta)$ – коефіцієнт підсилення антени станції РТР залежно від сферичних координат; $P_{пор\ РТР}$ – порогова потужність сигналу на вході приймача станції РТР ($Вт$).

Однак малі безпілотні літальні апарати можуть здійснювати політ в автономному режимі, тобто в умовах радіомовчання, або із використанням оптико-волоконних ліній зв'язку, у таких випадках переваги пасивного методу зводиться практично до нуля.

2.3 Акустичний метод

Наступний метод виявлення малих безпілотних літальних апаратів полягає в прийомі акустичного сигналу, який випромінюється через обертання несучих гвинтів дрону, його двигунів, а також шумів механічного походження.

За своєю структурою акустичний сигнал МЛА являє собою сукупність гармонічних і широкопasmових складових від 1 кГц до 12 кГц. Кратні гармоніки спектру слідує з частотами $f_i = f_0 \cdot i$, де f_0 – частота запалювання, а $i = 1, 2, \dots$ – номер відповідної гармонічної складової. На високих частотах періодичність спектру акустичного випромінювання пропадає та починається процес випадкового походження. «Вихлопний тракт двигуна формує в середовищі послідовність імпульсів тиску, частотний спектр якої є комбінацією гармонічних і широкопasmових складових» (Рис. 5) [15].

Акустичний шум посилюється зі зростанням рівня потужності двигуна [8]. Шум оточуючого середовища робить детектування МЛА за їх акустичною сигнатурою складною задачею. Але оскільки малі безпілотні літальні апарати мають малі інфрачервоні та радіолокаційні сигнатури, то використання акустичних систем є дуже актуальним питанням на

сьогоднішній день. Акустичні сенсори детектування працюють у пасивному режимі.

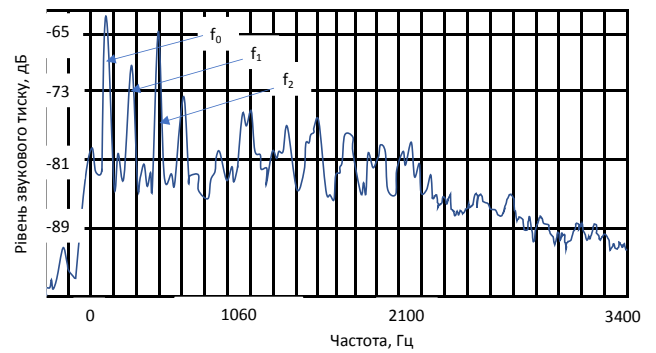


Рис. 5. Спектр акустичного випромінювання роботи силової установки МЛА

Дальність виявлення акустичного сигналу від малих безпілотних літальних апаратів $R_{акуст}$ ($м$) визначається за формулою:

$$R_{акуст} = \sqrt{\frac{I_c}{q^2 I_s}} \cdot r_c, \quad (6)$$

де I_c, I_s – інтенсивність сигналу та завади на вході приймача; q – відношення сигналу до завади; r_c – відстань, для якої визначено акустичний тиск випромінювання ($м$).

Проаналізувавши формулу (6), можна зробити висновок, що при зменшенні величини вхідного акустичного сигналу, який впевнено реєструє приймач, зростає максимальна відстань детектування малих безпілотних літальних апаратів, тобто джерел випромінювання.

За результатами власного дослідження, проведеного за аналогією до експерименту у [16], при заданих ймовірностях виявлення $D = 0.90$ та хибної тривоги $F = 10^{-3}$, співвідношенню С/З по інтенсивності (параметр виявлення) $q^2 = 0.13$ та різниці рівнів $L = 26$, максимальна відстань виявлення

малого літального апарату «*DJI Mini 2 Fly More Combo*» приймачем із параметрами налаштування $\Delta f = 2100 \text{ Гц}$ (ефективна смуга частот) становить приблизно **75 м**.

Особливість виявлення малих безпілотних літальних апаратів полягає в тому, що недостатньо провести тільки енергетичне виявлення — виявити деяку матеріальну точку. Також необхідно вирішити задачу розпізнавання, тобто необхідно відрізнити МЛА від птахів. Локаційні характеристики дронів і птахів дуже близькі, тому це завдання в цілому є досить важким.

3 Обговорення результатів

Основними показниками ефективності виявлення малих безпілотних літальних апаратів є максимальна дальність детектування цілі **R** (Рис. 6) при заданих ймовірностях правильного виявлення **D** та хибної тривоги **F**, розмірі площі огляду пристроїв $S_{\text{огл}}$, а також площі виявлення МЛА $S_{\text{виявл}}$ [17].

Визначимо та проаналізуємо переваги та недоліки основних методів виявлення малих безпілотних літальних апаратів.

Оптичний метод значно залежний від факторів оточуючого середовища. Він використовується у світлу пору дня для підвищення розділової здатності камер спостереження.

Основними перевагами використання оптичного методу є:

- + виявлення МЛА, що не мають радіочастотної передачі;
- + оптичні датчики є пасивними пристроями;
- + велика дальність розпізнавання цілі;
- + низька вартість оптичних сенсорів.

На якість та максимальну відстань детектування безпілотних літальних апаратів оптичними сенсорами впливають:

- розміри, форми та матеріал корпусу МЛА;

Зі зменшенням розміру безпілотних літальних апаратів, зростає складність його виявлення та зменшується максимальна відстань успішної детекції об'єкту. Форма дронів та матеріал поверхні корпусу впливає на його освітленість та контрастність до оточуючого середовища.

- погодні умови та пора дня;

Малі безпілотні літальні апарати неможливо виявити у хмарну погоду, туман та якщо освітленість фону оточуючого середовища й об'єкта однакові. Також оптичні системи не ефективні після заходу сонця.

- впливи атмосфери;

Забруднення атмосфери суттєво погіршує видимість для оптичних сенсорів, але через водяні пари в атмосфері сонячні промені відбиваються вгору, що може підвищити рівень освітленості МЛА.

- зона огляду.

Максимальна відстань детектування цілі досягається шляхом звуження поля зору камер спостереження, це відповідно зменшує зону огляду та збільшує час пошуку.

Інфрачервоний метод виявлення має схожі переваги з оптичним, але ІЧ спосіб детектування дронів використовується вночі.

З недоліків цього методу можна виділити наступні:

- спеціальні *конструкції* та *матеріал корпусу* для зменшення випромінювальної здатності, контрастності та площі випромінювання малих безпілотних літальних апаратів;
- *невисока максимальна дальність виявлення об'єктів*;
- *інфрачервоне випромінювання* добре *поглинається атмосферою*, окрім вікон з межами довжин хвиль 3–4 і 8–12 мм.
- *вузька зона огляду*.

Перевагами **методів** із використанням **радіолокаційних систем** є:

- + *дальність виявлення МЛА в кілометрах*;
- + *сектор огляду 360°*;
- + *активні датчики* — можуть працювати вдень та вночі;
- + *надають детальну інформацію про об'єкт*: дальність польоту, радіальну швидкість, розміри, типи і навіть форми БПЛА, дозволяють локалізувати його за кутом місця / азимуту на великих дистанціях.

Основними вадами використання систем радіолокації є:

- *низька мобільність та прихованість РЛС станцій*;
- *розміри, форми та матеріал корпусу зменшують відбивальну здатність МЛА*;

У малих безпілотних літальних апаратів менша площа відбиття електромагнітної хвилі, також їх корпуси зазвичай виготовляють з композитних матеріалів або покривають радіопоглинальними матеріалами, що значно зменшує рівень відбитого сигналу у напрямку приймача радіолокаційних станцій.

- *РЛС «сліпі» у ближній зоні*;

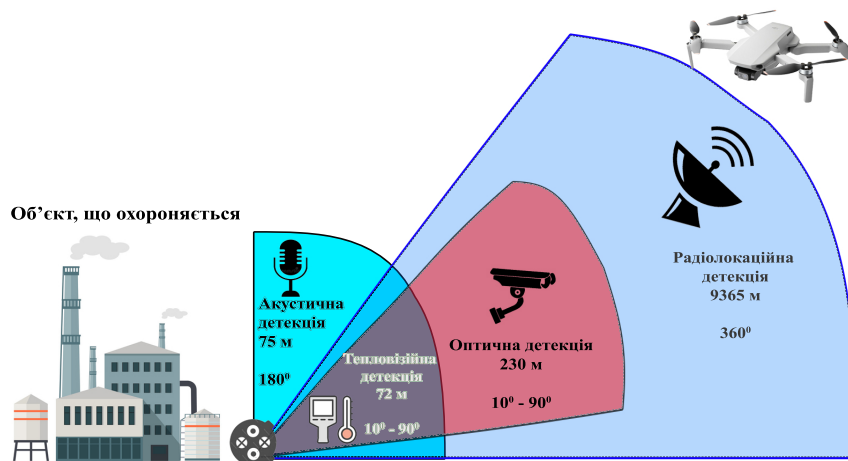


Рис. 6. Сектор огляду та максимальна дальність детектування МЛА «DJI Mini 2 Fly More Combo» основними методами

Проте метод пасивної радіолокації буде неефективним, коли малі безпілотні літальні апарати будуть перебувати у режимі автономного польоту або використовувати оптико-волокну для зв'язку з командним пунктом.

- *варіація конструкцій станцій за призначенням, діапазоном довжини хвиль, методом дії та характером носія.*

Перевагами *акустичного методу* є:

- + *пасивність датчиків та їх низька вартість;*
- + *сектор огляду 360°* — одночасно можна моніторити всю площу огляду $S_{огл}$;
- + *незалежність від оточуючого рельєфу;*
- + *висока точність виявлення об'єктів.*

З основних недоліків можна виділити наступні:

- *вплив фонових шумів оточуючого середовища;*
- *малий рівень звукової потужності та широка смуга частот;*
- *високий рівень апріорної невизначеності відносно структури акустичних сигналів МЛА та завад.*

Висновки

Проаналізувавши основні методи локалізації, класифікації та відстеження малих безпілотних літальних апаратів можна зробити висновок, що на ефективність детекції дронів значно впливають середовище поширення сигналів, помітність об'єктів у радіолокаційному, інфрачервоному та оптичному діапазонах довжин хвиль та фактори, пов'язані з пристроями спостереження.

Методи з використанням систем радіолокації показали найкращу максимальну відстань для успішного виявлення МЛА, навіть якщо він працює в автономному режимі (не випромінює радіочастотні сигнали), але основним недоліком є те, що всі РЛС «сліпі» в ближній зоні, тому якщо дрон буде пролітати на близькій відстані до станції, його виявлення буде неможливим.

Через невисокий рівень ефективності пошуку малих безпілотних літальних апаратів, оптичний метод краще використовувати як допоміжний до більш дієвого методу, наприклад до радіолокаційного.

Акустичні антенні пристрої, через їх малу максимальну дальність виявлення, але велику площу огляду та можливість працювати у будь-який період дня, також можуть бути використані як додатковий метод детектування і супроводження МЛА, що літають на низькій висоті до поверхні землі.

Підсумовуючи вищесказане, для швидкого та ефективного виявлення малих безпілотних літальних апаратів пропонується використовувати комбіновані системи, які надають дані, одночасно отримані від декількох різних типів датчиків. Радіолокаційні станції необхідні для детектування дронів на великих відстанях до об'єктів, а для захисту «ближньої зони» пропонується встановити оптичні та інфрачервоні сенсори або акустичні датчики.

Але оскільки малі безпілотні літальні апарати мають невисокий рівень інфрачервоного випромінювання та радіолокаційних сигнатур, у порівнянні, наприклад, з пілотованою авіацією, то актуальним питанням на сьогоднішній день стає розробка систем детекції за допомогою акустичних сигналів з великою максимальною відстанню виявлення до цілі.

Перелік посилань

- Dalamagkidis K. Classification of UAVs / K. Dalamagkidis // *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. – 2015. – pp. 83-91.
- Соловьев В. А. Проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов оптикоэлектронными устройствами / В. А. Соловьев, А. В. Купреев, М. В. Жендарев, И. В. Якименко // *Электронный математический и медикобиологический журнал*. – 2011. – Т. 10, Вып. №3. – С. 1–13.
- Даник Ю. Г. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження / Ю. Г. Даник, М. В. Бугайов // зб. наук. пр. "Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем". – 2015. – Вип. №10. – С. 5-20.
- Торопчин А. Я. Довідник з протиповітряної оборони / А. Я. Торопчин, І. О. Романенко, Ю. Г. Даник та ін. – К.: МО, 2003. – 366 с.
- Лепіх Я. І. Оптико-електронні системи ближньої локації: монографія / Я. І. Лепіх, В. І. Сантоній, Л. М. Будянська та інші. За редакцією Лепіха Я. І. – Од: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2019. – 294 с.
- Сухаревський О. І. Розрахунок радіолокаційних характеристик моделі безпілотного літального апарату RQ-1 "PREDATOR" / О. І. Сухаревський, В. О. Василець, Я. О. Белевщук, К. І. Ткачук // *Системи обробки інформації*. – 2012. – Вип. 5(103). – с. 68-72.
- Михайлов А. А. Применение оборудования охранных телевизионных систем в условиях ограниченной видимости или других дестабилизирующих факторов / А.А. Михайлов, А. В. Котельников, Ю. В. Тарасова, М. В. Ванжа, А. А. Никитина, А. Г. Зайцева. – М.: НИИЦ "Охрана", 2015. – 111 с.
- Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment / R. Austin. – Chichester, UK: John Wiley and Sons Ltd, 2010. – P. 113–127.
- Гришин Ю. П. Радиотехнические системы: учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др. – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.
- Таблиця спектральних коефіцієнтів випромінювання. <https://www.icsgroup.ru/upload/iconult/301/Fluke-emissivity-factor.pdf>.
- Быстров Р. П. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов / Р. П. Быстров, Г. К. Загорин, А. В. Соколов, Л. В. Фёдорова. – М.: Радиотехника, 2008. – С. 318.
- Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации / Я. Д. – М. : Сов. радио, 1970. – 561 с.
- Beel J. J. Anti-UAV Defense For Ground Forces and Hypervelocity Rocket Lethality Models / J. J. Beel. – Monterey, California : Naval Postgraduate School, 1992. – P. 36–46.
- Куприянов А. И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2003. – 528 с.
- Самохин В. Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке / В. Ф. Самохин, С. П. Остроухов, П. А. Мошков // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. – 2012. – Вып. № 70. – С. 1–24.
- Козерук С. О. Виявлення малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням / С. О. Козерук, О. В. Коржик // *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. – 2019. – Вип.76. – с.15-20
- Горбунов В. А. Эффективность обнаружения целей / В. А. Горбунов – М.: Военное издательство, 1979. – 160 с.

References

- Dalamagkidis K. (2015). Classification of UAVs. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, pp 83-91. DOI:10.1007/978-90-481-9707-1-94.
- Solovjov V. A., Kypreev A. V., Zhendarev M. V. and Yakimenko I. V.(2011). Detection problems pilotless flying machines optiko-electronic devices. *Mathematical morphology. Electronic mathematical and biomedical journal*, Vol. 10, Iss. 3, pp. 1–13. [In Russian].
- Danik Yu. G., Bugayov M. V. (2015). Analysis of the effectiveness of the appearance of tactful, unpowered lithal devices by passive and active means of caution. *Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems*, Iss. 10, pp. 5-20. [In Ukrainian].
- Toropchyn A. Ya., Romanenko I. O., Danyk Ju. Gh. and Pashhenko R. E. (2003). *Dovidnyk z protypovitrianoi oborony* [Air Defense Reference Book], Kyiv, 366 p. [In Ukrainian].
- Lepich Ya. I., Santoniy V. I., Budiyanska L. M., Ivanchenko I. O. and Yanko V. V. (2019). *Optyko-elektronni systemy blyzhoi lokatsiyi: monografiya* [Optical-electronic systems of near location: monograph]. Odessa: Odessa I.I. Mechnikov National University, 294 p. ISBN 978-617-689-298-4. [In Ukrainian].
- Sukharevsky O. I., Vasilets V. O., Belevshchuk Ya. O. and Tkachuk K. I. (2012). Calculation of radar characteristics of the RQ-1 "PREDATOR" unmanned aerial vehicle model. *Information Processing Systems*, Iss. 5(103), pp. 68-72. ISSN: 1681-7710. [In Ukrainian].
- Mikhailov A. A., Kotelnikov A. V., Tarasova Yu. V., Vanzha M. V., Nikitina A. A. and Zaitsev A. G. (2015). *Primeneniye oborudovaniya okhrannykh televizionnykh sistem v usloviyakh ogranichennoy vidimosti ili drugikh destabiliziruyushchikh faktorov* [The use of security television systems equipment in conditions of limited visibility or other destabilizing factors.] Moscow, NITS «Okhrana», 111 p. P 78.36.049-2015. [In Russian].
- Austin R. (2010). *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment*. Chichester, UK: John Wiley and Sons Ltd., pp. 113–127. DOI:10.1002/9780470664797
- Grishin Yu. P., Ipatov V. P., Kazarinov Yu. M. et al. (1990). *Radiotekhnicheskiye sistemy: uchebnik dlya vuzov po spetsialnosti «Radiotekhnika»* [Radio engineering systems: Textbook for universities in the specialty "Radio Engineering".] Moscow, Graduate school, 496 p. ISBN 5-06-000687-5. [In Russian].
- Emissivity values of common materials (2008). Available at: <https://www.icsgroup.ru/upload/iconult/301/Fluke-emissivity-factor.pdf>.
- Bystrov R. P., Sokolov A. V. (2008). *Passivna radio-elektronica. Metodi obnaryusheniya ob'ektov* [Passive radar. Object detection methods]. Moscow, Radiotekhnika, 318 p. ISBN 978-5-88070-186-5. [In Russian].

- [12] Shirman Ya. D. (1970). *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii* [Theoretical foundations of radar]. Moscow, Soviet radio, 561 p. [In Russian].
- [13] Beel J. J. (1992). *Anti-UAV Defense Requirements for Ground Forces and Hypervelocity Rocket Lethality Models*. Monterey, California: Naval Postgraduate School, pp. 36–46. A.N: ADA252727.
- [14] Kupriyanov A. I., Sakharov A. V. (2003). *Radioelektronnyye sistemy v informatsionnom konflikte* [Electronic systems in information conflict]. Moscow, Vuzovskaya kniga, 528 p. ISBN 978-5-89522-456-4. [In Russian].
- [15] Samokhin V. F., Ostroukhov S. P., Moshkov P. A. (2012). Experimental study of the sources of noise of an unmanned aerial vehicle with a propeller-ring propeller in a pushing arrangement. *Electronic journal «Trudy MAI»*, Moscow, Iss. 70, pp.1-24. [In Russian].
- [16] Kozeruk S.O., Korzhuk O. V. (2019). Detection Small Aircraft by Acoustic Radiation. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparato buduvannia*, Vol. 76, pp. 15-20. DOI: 10.20535/RADAP.2019.76.15-20. [In Ukrainian].
- [17] Gorbunov V. A. (1979). *Effektivnost obnaruzheniya tseley* [Target detection efficiency]. Moscow, Voennoye izdatelstvo Ministerstva oborony SSSR, 160 p. [In Russian].

Обзор методов обнаружения и локализации малых беспилотных летательных аппаратов

Сокольский С. О., Мовчанюк А. В.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) или дроны широко используются во многих сферах, но в то же время начало стремительно расти количество правонарушений с их использованием. Поэтому задача обнаружения дронов актуальна. Целью исследования, приведенного в статье, является сравнение и критический анализ основных методов и средств обнаружения малых беспилотных летательных аппаратов (МЛА). В работе были исследованы потенциальные возможности следующих методов обнаружения дронов: оптический метод, радиолокационный и акустический методы. Установлено, что оптический метод предполагает использование камер с высокой разрешающей способностью в светлое время дня, но он слишком зависим от природных факторов окружающей среды, например дождя или тумана. В темное время суток для детектирования дронов обычно используют инфракрасные оптические устройства. Основными недостатками такого подхода являются невысокая максимальная дальность обнаружения цели и поглощения атмосферой инфракрасного излучения, кроме «окон» с пределами длин волн 3–4 и 8–12 мкм. В результате приведенных расчетов установлено, что дальность определения цели оптическим методом составляет около 230 метров, а с использованием ИК приемника 73 метра. Указано, что радиолокационные методы делятся на активные и пассивные. Радиолокационные системы (РЛС) могут работать в любую пору суток и позволяют обнаруживать МЛА на расстояниях до нескольких километров (9,3 км). В результате анализа спектра радиочастотного сигнала можно получить наиболее подробную информацию о цели. Основным недостатком радиолокационных методов является то, что все РЛС не работают в ближней зоне. Установлено,

что акустические сенсоры позволяют эффективно обнаруживать малые беспилотные летательные аппараты, несмотря на рельеф окружающей среды, но результаты зависят от имеющихся акустических фоновых шумов и помех. Эффективная дальность обнаружения цели составляет около 75 метров. В статье приведены сравнения результатов расчета, на основе экспериментальных данных, дальности обнаружения малого беспилотного летательного аппарата «*DJI Mini 2 Fly More Combo*». В выводах исследования указано, что наиболее эффективным подходом является комбинация известных методов выявления БПЛА и наданы рекомендации, касающиеся построения таких систем.

Ключевые слова: дрон; малый беспилотный летательный аппарат; МЛА; детекция; максимальная дальность обнаружения

Overview of Detection and Localization Methods of Small Unmanned Aerial Vehicles

Sokolskyi S. O., Movchanyuk A. V.

Unmanned aerial vehicles (UAV) or drones are widely used in many areas, but at the same time, the number of offenses with their use began to overgrow. Therefore, the problem of detecting drones is relevant. The study presented in the article aims to compare and critically analyze the main methods and means of detecting small unmanned aerial vehicles. The paper explored the potential of the following drone detection methods: optical, radar, and acoustic methods. The optical method has been found to involve high-resolution cameras during daylight hours but is too dependent on natural environmental factors such as rain or fog. In the dark, infrared optical devices are usually used to detect drones. The main disadvantages of this approach are the low maximum range of target detection and absorption of infrared radiation by the atmosphere, except for "windows" with the wavelengths limits of 3-4 and 8-12 mm. As a result of the above calculations, the range of target determination by the optical method is about 230 meters, and with the use of an IR receiver, 73 meters. The radar methods are divided into active and passive. Radar systems can operate at any time of the day and allow detecting low-flying aircraft at distances of up to several kilometers (9.3 km). By analyzing the spectrum of the RF signal, we can get the most detailed information about the target. The main disadvantage of radar methods is that all radars do not work in the near-field zone. It has been determined that acoustic sensors allow efficient detection of small unmanned aerial vehicles, despite the topography of the environment, but the results depend on the available acoustic background noise and interference. The effective target detection range is about 75 meters. The article compares the calculation results, based on experimental data, of the detection range of the small unmanned aerial vehicle «*DJI Mini 2 Fly More Combo*». In conclusion, the study specifies that the most effective approach is a combination of known methods for detecting UAVs, and recommendations are given regarding the construction of such systems.

Keywords: drone; small unmanned aerial vehicle; UAV; detection; maximum detection range