

## **АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТАКТИЧНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПАСИВНИМИ ТА АКТИВНИМИ ЗАСОБАМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

*У статті проаналізовано фактори, що впливають на ефективність виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів акустичними, оптичними, інфрачервоними та радіотехнічними пристроями спостереження. Розроблено рекомендації стосовно вибору найбільш ефективних засобів спостереження з урахуванням впливу різних груп факторів.*

**Постановка проблеми.** У комплексі проблем забезпечення обороноздатності держави від несподіваного нападу одне з провідних місць займає своєчасне виявлення безпілотних літальних засобів. Це, у свою чергу, вимагає визначення ефективності їх викриття за різними фізичними ознаками для оптимізації використання наявних засобів спостереження [1].

Вказану проблему в сучасних умовах вирішують за рахунок створення на можливих театрах воєнних дій відповідних ефективно діючих локальних і глобальних систем спостереження для своєчасного виявлення, розпізнавання, визначення координат і елементів руху безпілотного літального апарата (БПЛА), контролю за його місцеположенням, рухом і діями. Раціональна побудова й ефективне функціонування різноманітних систем спостереження є необхідною умовою забезпечення якісного знання обстановки в просторі та часі.

Як і будь-якому матеріальному об'єкту, БПЛА характерні демаскуючі ознаки, що виділяють його в навколишньому середовищі, роблячи помітним для спостереження. Ступінь помітності визначають величиною його сигнатур у радіочастотному, інфрачервоному (ІЧ) і видимому діапазонах спектра, а також акустичною сигнатурою. Сучасні легкі БПЛА мають сигнатури незначної величини: їх виготовляють із композитних матеріалів і пластику зі спеціальним забарвленням та з особливою комбінацією шарів; невеликі бензинові або електричні двигуни мало випромінюють тепла і працюють майже безшумно. Значна різноманітність можливих варіантів побудови і використання засобів спостереження в кожному з вказаних діапазонів зумовлює труднощі в оцінюванні їх ефективності. Тому актуальними є питання визначення ефективності використання різних засобів пошуку та виявлення для вирішення проблеми своєчасного введення в дію та ефективного використання сил і засобів боротьби з БПЛА.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** У зв'язку із широким застосуванням БПЛА в сучасній збройній боротьбі від тактичного рівня і нижче проблемам їх виявлення приділяється особлива увага, про що свідчить значна кількість публікацій як вітчизняних, так і закордонних авторів [2–13]. Проте в переважній більшості праць розглядають питання виявлення безпілотників лише за окремими демаскуючими ознаками: акустичною [2–9], оптичною [10], ІЧ [10–11] та радіотехнічною [12] сигнатурами. У роботі [11]

висвітлено основні підходи до виявлення БПЛА за кожною з ознак, проте не надано жодних рекомендацій для комплексного застосування засобів спостереження. У [13] описано комплексну сенсорну мережу виявлення БПЛА, що містить у своєму складі радіолокаційний, акустичний та телевізійний канали. Проте запропонований алгоритм роботи системи не враховує ефективності каналів виявлення з огляду на різні фізичні ознаки безпілотників.

У даній статті зроблено спробу проаналізувати ефективність виявлення тактичних БПЛА залежно від трьох груп факторів, що характеризують: ціль, умови поширення фізичних полів (сигналів) у середовищі, прилад спостереження.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є аналіз ефективності виявлення БПЛА акустичними, оптичними, ІЧ та радіотехнічними засобами спостереження і формулювання практичних рекомендацій щодо їх застосування.

### **Виклад основного матеріалу**

**1. Визначення показника ефективності виявлення тактичних БПЛА.** Не дивлячись на різницю в принципі дії окремих типів засобів спостереження (акустичних, оптичних, ІЧ, радіотехнічних тощо), вони мають дуже багато спільних властивостей як прилади ведення розвідки. Дійсно, якщо виявлення цілі розглядати як наслідок фізичного процесу пошуку, що характеризується накопиченням зі збільшенням кількості оглядів або часу стеження ймовірності виявлення, то будь-який засіб спостереження незалежно від принципу його дії можна розглядати передусім як відповідний пристрій дискретної або безперервної дії, що має здатність виявляти цілі, які попадають в зону його дії.

Таким чином, у загальному випадку ймовірність виявлення цілі в зоні дії пристрою спостереження буде залежати від його здатності знаходити ціль у даних фізичних умовах, характеру її дії в зоні огляду та способу використання пристрою спостереження при вирішенні завдань пошуку цілі. Тоді в кожному конкретному випадку ймовірність виявлення цілі може бути правильно оцінена лише за відповідного врахування міри впливу кожного з цих факторів [1].

Під ефективністю виявлення цілі мається на увазі кількісно виражена успішність вирішення завдань пошуку і виявлення цілей засобами спостереження.

До кількісних показників ефективності можна віднести: дальність виявлення цілі (встановлення контакту з нею)  $R$  із заданими ймовірностями правильного виявлення  $D$  та хибної тривоги  $F$ , розміри площі огляду  $S_{огл}$  і площі виявлення цілі  $S_{вияв}$  [1]. Для тактичного пошуку показники  $S_{огл}$  і  $S_{вияв}$  є загальними кількісними характеристиками його продуктивності за величинами площ огляду і виявлення за час пошуку  $t_n$ .

Введемо узагальнений показник ефективності, виражений формулою

$$E = \frac{RS_{огл}}{t_{огл}}, \quad (1)$$

згідно з якою найбільш ефективним буде той пристрій спостереження, що при заданих  $D$  і  $F$  огляне найбільший об'єм простору  $V = RS_{огл}$  за мінімальний час  $t_{огл}$ .

Визначимо дальність виявлення БПЛА  $R$  акустичним, оптичним, ІЧ і радіотехнічним каналами та фактори, що впливають на її значення.

**2. Акустичний канал.** Сумарний спектр акустичного випромінювання тактичного БПЛА зумовлений гармонічними і широкосмуговими складовими. Він включає в себе гармонічні складові випромінювання від двигуна, шуму обертання гвинта, випромінювання механічного походження, а також високочастотну та низькочастотну складові шуму двигуна з безперервними за частотою спектрами. У шумові силової установки БПЛА, що включає поршневий двигун повітряного охолодження, за відсутності у його вихлопному тракті глушника визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршневий двигун.

Дискретні складові спектра слідує з частотами  $f_i = f_0 \cdot i$ , що кратні частоті запалювання  $f_0$ , де  $i = 1, 2, 3 \dots$  – номер відповідної гармонічної складової. На високих частотах значущість періодичних процесів у формуванні спектра акустичного випромінювання двигуна помітно послаблюється, оскільки більш важливу роль у сумарному акустичному випромінюванні починають відігравати процеси випадкового походження. Зокрема, для шуму вихлопу може бути суттєвою вихрова складова. Насправді ж вихлопний тракт двигуна формує в середовищі послідовність імпульсів тиску, частотний спектр якої є комбінацією гармонічних і широкосмугових складових (рис. 1) [4].

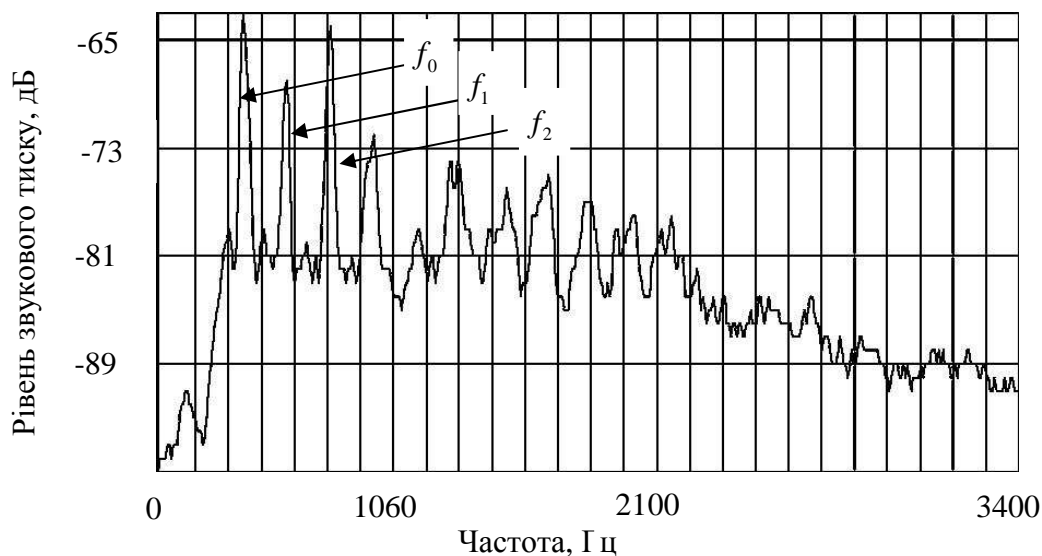


Рис. 1. Типовий спектр акустичного випромінювання роботи силової установки БПЛА

Електричні двигуни мають нижчі шумові характеристики, проте їх використання обмежується БПЛА малого радіуса дії. Акустичний шум, як правило, посилюється зі зростанням потужності двигуна [14].

Двигуни більшості неактивних БПЛА є досить малими для використання глушників і зменшення таким чином акустичної помітності. Крім того, шум поля бою робить виявлення БПЛА за їх акустичними портретами досить складним. Але оскільки безпілотники мають малі ІЧ та радіолокаційні сигнатури, порівняно з пілотованою авіацією, то використання акустичних систем стає актуальним питанням сьогодення. Акустичні сенсори дозволяють наземним засобам проводити пошук і виявлення БПЛА в пасивному режимі, зменшуючи в такий спосіб імовірність виявлення противником

власних позицій. Модифікація існуючих акустичних систем пошуку або розробка нових може забезпечити надійний метод виявлення БПЛА [11].

Для детального аналізу акустичних сигналів використовують решітки з мікрофонів. Використання ж окремого мікрофона надасть лише грубу оцінку акустичного сигналу [5].

Акустичні антенні решітки можуть ефективно використовуватися для виявлення і супроводження низьколітаючих БПЛА на тактичних відстанях. У той же час акустична решітка дозволяє крім просторового накопичення сигналів оцінювати час надходження фронту хвилі в різні точки простору, що, у свою чергу, сприяє оцінюванню кута поширення хвилі відносно решітки, тобто можна обчислити пеленг на джерело випромінювання. Для БПЛА середнього розміру з двигуном внутрішнього згорання дальність виявлення в п'ять разів перевищує цей же показник для безпілотної з електричним двигуном [2, 6–7].

При гармонічному виявленні аналізуються вузькі смуги частот у коротких часових вікнах. Сигнал подають у вигляді суми гармонік з невідомими частотами й фазами. Якщо сигнали слабкі, то гармонічний детектор працює надійніше від енергетичного [8, 9].

Дальність енергетичного виявлення акустичного сигналу можна записати в такому вигляді [15]:

$$R = \sqrt{\frac{P_{дж_а}^2 S_{пр_а} G_{дж}}{4\pi P_{пор_а}^2}} \exp(-0,115\alpha R), \quad (2)$$

де  $P_{дж_а}$  – значення акустичного тиску, створеного корисним сигналом;

$S_{пр_а}$  – ефективна поверхня прийому акустичної хвилі засобом спостереження;

$P_{пор_а}$  – порогове значення акустичного тиску;

$G_{дж}$  – коефіцієнт спрямованої дії джерела сигналу;

$\alpha$  – коефіцієнт загасання акустичних коливань внаслідок релаксаційних процесів. Коефіцієнт загасання зростає пропорційно квадрату частоти і залежить від відносної вологості повітря, його температури й атмосферного тиску (рис. 2) [16].

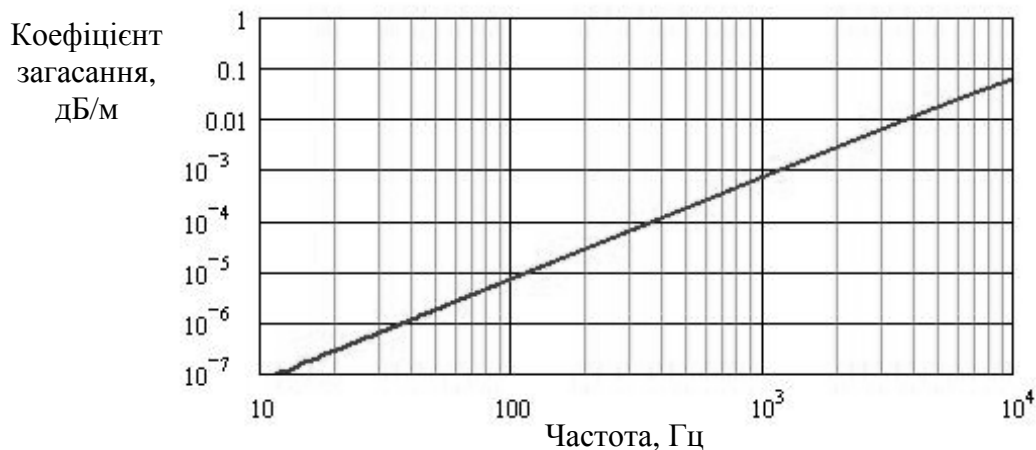


Рис. 2. Коефіцієнт загасання акустичних коливань у повітрі за нормальних умов і відносній вологості 70%

Геометричну дальність виявлення акустичних сигналів визначають геометричною зоною акустичної освітленості, отриманої в результаті побудови променевої картини, що залежить від стратифікації атмосфери, рельєфу підстилаючої поверхні, висоти джерела звуку та характеристик його спрямованості.

**3. Оптичний канал.** Оптичне виявлення БПЛА дуже залежить від факторів середовища. Підвищення дальності викриття досягається за рахунок звуження поля зору, зменшення зони огляду і збільшення часу пошуку. Тому візуальні сенсори є неефективними пристроям для здійснення пошуку. При надходженні зовнішніх цілевказівок від більш ефективного пошукового засобу оптичні сенсори можуть бути ефективно використані для супроводження БПЛА.

Оскільки безпілотники є значно меншими за пілотовані засоби, то це ускладнює їх виявлення за допомогою оптичних засобів. Порівняно з літаком контрастність БПЛА відносно фону є меншою через відсутність світлових маяків, зменшений факел малого двигуна і меншу поверхню відбиття [11].

Критерії, що визначають здатність оптичних пристроїв спостереження виявляти повітряні об'єкти в чистому небі або на фоні хмар, включають:

- 1) *розмір і форму об'єкта;*
- 2) *контрастність на фоні хмар і гостроту країв контрасту.* Контрастність  $C$  визначають як відношення різниці освітленості між об'єктом та фоном до освітленості фону:

$$C = (B - B_1) / B_1 = \Delta B / B_1, \quad (3)$$

де  $B$  – освітленість об'єкта;

$B_1$  – освітленість фону в кд/м<sup>2</sup>.

Якщо освітленість фону й об'єкта однакові, то останній виявити неможливо.

Освітленість об'єкта залежить ще й від його форми та текстури поверхні, а також відбитого атмосферою світла, що є непередбачуваним. Прогнозування виявлення об'єкта за допомогою оптичних засобів є дуже складним, можливі лише деякі наближення залежно від розміру, форми і кутової швидкості об'єкта відносно точки спостереження на землі. Об'єкт з великими розмірами за інших рівних умов виявляється простіше;

- 3) *вплив атмосфери.* Вміст водяної пари в атмосфері або її забруднення (крім погіршення видимості для наземних оптичних засобів) також підвищують рівень освітленості об'єкта через відбиття вгору сонячних променів;

- 4) *будь-який рух об'єкта, час спостереження;*

- 5) *виблискування об'єкта* є результатом відбиття сонячних променів від блискучих поверхонь, особливо зі скляним покриттям [14].

Імовірність виявлення об'єкта, що знаходиться всередині миттєвого поля зору, залежить від контрасту та його розмірів. Під час пошуку об'єкта його форма не відіграє важливої ролі, а має значення лише його площа в межах співвідношення сторін 1:10, характерного для компоновок БПЛА. Дальність виявлення майже ніколи не перевищує деякого максимального значення  $R_{max}$ , що відповідає найбільш сприятливому поєднанню фізичних умов спостереження. При цьому закон розподілу дальностей виявлення найбільш повно характеризує засоби й умови спостереження [10].

Дальність виявлення оптичними системами визначають за таким виразом [17]:

$$R = \sqrt{\frac{B_{\lambda} S_{u_o} r_{\psi} S_{np_o} \Delta\lambda \tau_{np_o} \tau_{cp_o}}{4\pi P_{np_o}}}, \quad (4)$$

де  $B_{\lambda}$  – спектральна щільність випромінювання поверхні цілі  $S_{u_o}$  за рахунок освітлення її сонцем ( $B_{\lambda} = 10^2$  Вт/см<sup>2</sup>·мкм·ср);

$S_{u_o}$  – ефективна поверхня відбиття цілі в оптичному діапазоні;

$r_{\psi}$  – коефіцієнт відбиття поверхні цілі;

$S_{np_o}$  – ефективна площа об'єктива, на яку падає випромінювання;

$\Delta\lambda$  – смуга пропускання оптичного фільтра (мкм);

$P_{np_o}$  – порогова чутливість приймального пристрою;

$\tau_{np_o}, \tau_{cp_o}$  – коефіцієнти пропускання приймального пристрою і середовища відповідно.

**4. ІЧ канал.** Тепло від БПЛА виділяється в основному силовою установкою і в меншій мірі електронними компонентами, а також точками гальмування на несучих краях крил, пропелерів та гвинтів. Розробники безпілотників намагаються запобігати випромінюванню в ІЧ діапазоні в напрямку розташованих на землі приймачів і направити це випромінювання в сторону неба. Також використовують матеріали з малою випромінювальною здатністю, такі як срібло та алюміній [14].

Здатність БПЛА бути виявленим визначається його випромінювальною здатністю, контрастом та площею випромінювання.

Розподіл інтенсивності випромінювання  $J_{ч.т.}(\lambda, T)$  для абсолютно чорного тіла визначають за законом Планка [18]:

$$J_{ч.т.}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/kT\lambda) - 1}, \quad (5)$$

де  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка;

$c = 3 \cdot 10^8$  м·с<sup>-1</sup> – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup> – стала Больцмана;

$T$  – абсолютна температура нагрітого тіла.

Інтенсивність випромінювання реальних (сірих) тіл обраховуємо за такою формулою:

$$J'_{ч.т.}(\lambda, T) = \xi \cdot J_{ч.т.}(\lambda, T), \quad (6)$$

де  $\xi$  – спектральний коефіцієнт випромінювання.

Проте ІЧ випромінювання поглинається атмосферою краще за світло, особливо парами води та молекулами вуглекислого газу. Основні вікна в атмосфері для ІЧ діапазону хвиль знаходяться в межах 3–4 і 8–12 мм, тому ІЧ пристрої розробляються так, щоб

приймати в одному з цих діапазонів, не дивлячись на те, у якому з них знаходить максимум випромінювання БПЛА згідно із законом Планка.

Дальність виявлення пасивними ІЧ системами БПЛА, що має температуру  $T$ , визначають за виразом [17]

$$R = \sqrt{\frac{S_{np\Gamma\check{C}} S_{u\Gamma\check{C}} \tau_{np\Gamma\check{C}}}{P_{пор\Gamma\check{C}}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{cp}(\lambda) J'_{ч.м.}(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

де  $S_{u\Gamma\check{C}}$  – площа проекції БПЛА на картинну площину, перпендикулярну напрямку спостереження цілі;

$S_{np\Gamma\check{C}}$  – ефективна площа приймальної апертури ІЧ пристрою;

$\tau_{np\Gamma\check{C}}$  – коефіцієнти пропускання приймального пристрою;

$P_{пор\Gamma\check{C}}$  – порогова чутливість приймального пристрою;

$\lambda_1, \lambda_2$  – межі спектрального діапазону приймального пристрою;

$\tau_{cp}(\lambda)$  – спектральний коефіцієнт пропускання середовища.

Параметри поточного фонового випромінювання неба визначають відразу ж після проведення вимірювань яскравості цілі за допомогою того ж ІЧ пристрою. Потужність фонового випромінювання розраховують відповідно до такого виразу [10]:

$$P_{\phi} = (\Delta\varepsilon \times \Delta\beta) \sqrt{S_{np\Gamma\check{C}} \tau_{np\Gamma\check{C}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{cp}(\lambda) N_{\phi}(\lambda) d\lambda}, \quad (8)$$

де  $\Delta\varepsilon \times \Delta\beta$  – розміри миттєвого поля зору системи;

$N_{\phi}(\lambda)$  – спектральна випромінювальна здатність фону, що визначають за станом атмосфери.

Досконалі ІЧ пристрої спостереження знаходяться на стадії розробки, а виявлення малих об'єктів зі слабким випромінюванням можливе лише в малому полі зору ( $5^\circ$ ). Практична реалізація процесу виявлення БПЛА з високою ймовірністю потребує створення спеціальних високочутливих ІЧ пристроїв, скануючих вузькоспрямованих антен, розробки методів і алгоритмів огляду простору та прийняття рішення про наявність або відсутність об'єктів на напрямках контролю. Основні технічні характеристики такої системи – дальність дії та час огляду – визначають за ступенем оптимізації всіх її елементів і алгоритмів.

При збільшенні дальності зростає необхідний розмір антенної системи, звужується промінь антени, час інтегрування в кожному незалежному напрямку стає одного порядку з часом переміщення цілі в промені. За таких умов почерговий огляд простору стає неможливим. Крім того, однопроменевою ІЧ системою можуть контролюватися лише малі тілесні кути зони огляду. Для контролю великих тілесних кутів потрібні багатопроменеві ІЧ системи, у яких деяка кількість нерухомих променів "очікують" прольоту цілі [19].

## **5. Радіотехнічний канал**

**5.1. Радіолокаційний канал.** Пошук БПЛА за допомогою активних радіолокаційних станцій (РЛС) досить продуктивний, оскільки вони мають відносно великий імпульсний об'єм пошуку і значну дальність виявлення [21]. Проте РЛС можуть бути визначені противником за власним випромінюванням. Радіолокаційне виявлення БПЛА буде прийнятним лише тоді, коли не ставляться вимоги до прихованості роботи чи високої мобільності [11].

Більшість БПЛА виготовляють з композитних матеріалів, які досить погано відбивають електромагнітні хвилі. Радіохвилі проникають через поверхню безпілотної літака і лише частково відбиваються від неї [11]. Коефіцієнт відбиття радіохвиль від діелектрика визначаємо за формулою [20]

$$k = \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1}, \quad (9)$$

де  $\epsilon$  – діелектрична проникність матеріалу поверхні об'єкта.

Розробники БПЛА намагаються уникнути відбивання зондуєчих імпульсів РЛС у напрямку приймача. Як і у видимому діапазоні частот, безпілотної літака мають переваги порівняно з пілотованою авіацією, що полягає в менших розмірах (менша площа відбивання) і відсутності необхідності розміщення екіпажу, тобто форма фюзеляжу може змінюватися в більш широких межах.

Серед відомих підходів до зменшення рівня відбитого сигналу у напрямку приймача РЛС розробники БПЛА в переважній більшості випадків використовують такі:

1) виготовлення відповідних поверхонь БПЛА з радіопрозорих матеріалів, наприклад кевлару, або скляних композиційних матеріалів, що використовують для виробництва обтікачів антен РЛС. Такий метод рідко може бути ефективним, за винятком випадку дуже малих БПЛА з тонким покриттям крил. Частина відбитої енергії зростає зі збільшенням товщини шару покриття до величини близько 15 мм залежно від матеріалу покриття. Такі матеріали, звичайно, не можуть використовуватися для покриття металевих або інших компонентів, оскільки не лише відбиватимуть радіосигнали, а навіть підсилюватимуть їх;

2) покриття зовнішніх поверхонь літального апарата радіопоглинальними матеріалами, які зазвичай складаються із шарів піни, є досить об'ємними, крихкими і можуть значно збільшувати вагу безпілотної літака. Інша проблема полягає в тому, що такі матеріали поглинають електромагнітну енергію в обмеженій смузі частот. Сигнал з частотою, що знаходиться поза межами смуги поглинання, досить добре відбивається;

3) виготовлення літального апарата такої форми, яка сприятиме відбиттю радіолокаційних сигналів у бік, протилежний РЛС. Це найбільш ефективний метод, що найчастіше використовують для зменшення відбивальної здатності БПЛА, оскільки його форма не обумовлюється потребами екіпажу, проте є обмеженою стосовно компромісу між вимогами щодо аеродинамічних властивостей та радіолокаційної помітності. Оскільки ціль зазвичай знаходиться під малим кутом місця відносно РЛС, то найбільш критичними є вертикальні поверхні (стабілізатори) та поверхні, що перетинаються під



прямими кутом, оскільки вони діють як кутові відбивачі й можуть давати потужні відбиті сигнали [14].

Вираз для визначення дальності виявлення цілі активною РЛС можна записати у такому вигляді [21]:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 P_{\text{порРЛС}}}}, \quad (10)$$

де  $P_{\text{пер}}$  – потужність передавача;

$G_{\text{пер}}$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени;

$G_{\text{пр}}$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени;

$\sigma_{\text{ц}}$  – ефективна поверхня розсіювання БПЛА;

$P_{\text{порРЛС}}$  – порогова потужність сигналу на вході приймача РЛС.

Показники ефективності виявлення: імовірність правильного виявлення  $D$  та ймовірність хибної тривоги  $F$ , – за умови виявлення на фоні білого шуму при невідомій амплітуді та початковій фазі прийнятого сигналу, пов'язані таким співвідношенням:

$$D = F^{\frac{1}{1+0.5q^2}}, \quad (11)$$

де  $q^2 = \frac{2E_c}{N_0} = \frac{2P_{\text{пор}} \tau_i}{N_0}$  – відношення сигнал/шум;

$\tau_i$  – тривалість зондуючого імпульсу;

$N_0 = kT_u = k[T_a + T_0(k_u - 1)]$  – спектральна щільність внутрішніх шумів приймача;

$T_a$  – шумова температура приймальної антени;

$k_u$  – коефіцієнт шуму приймального пристрою;

$T_0 = 293 \text{ } ^\circ\text{K}$ .

**5.2. Канал радіотехнічної розвідки.** БПЛА також можуть бути виявлені засобами радіотехнічної розвідки (РТР) шляхом прийому та аналізу радіосигналів ліній зв'язку й управління, радіолокаційних альтиметрів, постановників активних завад і РЛС. Даним методом можна встановити лише напрямок на БПЛА, причому точність визначення підвищується зі збільшенням часу спостереження. Деякі низькочастотні лінії зв'язку можуть бути виявлені на значних дальностях. Випромінювання бортових РЛС та постановка активних завад можуть бути визначеними на ще більших дальностях.

Даний метод вимагає мінімуму обладнання і дозволяє швидко визначити пеленг цілі з подальшою видачею цілевказівок на засоби оптичного чи ІЧ спостереження. Проте виявлення ліній зв'язку БПЛА з командним пунктом буде неефективним у разі автономного польоту або використання оптико-волоконних ліній зв'язку [11].

Спектр частот, що використовується сучасними БПЛА військового призначення, досить широкий (табл. 1), тому для їх виявлення необхідні спеціалізовані засоби РТР.

Розподіл використання частот переважної більшості БПЛА військового призначення

Частоти, ГГц	Використання частот від загального трафіка, %	
	Від БПЛА до командного пункту (супутника)	Від командного пункту (супутника) до БПЛА
0,01-0,1	13	0
0,1-1	32	17
1-2 (L)	6	19
2-4 (S)	11	13
4-8 (C)	21	23
8-12 (X)	15	17
12-18 (Ku)	2	9

Дальність виявлення сигналу БПЛА засобами РТР визначаємо за формулою [22]

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{джер.РТР}} G_{\text{джер}}(\epsilon, \beta) G_{\text{пр}}(\epsilon, \beta) \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\text{пор.РТР}}}}, \quad (12)$$

де  $P_{\text{джер.РТР}}$  – потужність сигналу джерела випромінювання;

$G_{\text{джер}}(\epsilon, \beta)$  – коефіцієнт підсилення антени джерела випромінювання залежно від сферичних координат;

$G_{\text{пр}}(\epsilon, \beta)$  – коефіцієнт підсилення антени станції РТР залежно від сферичних координат;

$P_{\text{пор.РТР}}$  – порогова потужність сигналу на вході приймача станції РТР.

**6. Визначення ефективності каналів спостереження.** Для визначення ефективності виявлення БПЛА кожним з каналів відповідно до виразу (1) розглянемо окремо усі величини, використані в ньому, для кожного з каналів.

Дальність дії пристрою спостереження  $R$  у загальному випадку можна розглядати як функцію дуже великої кількості факторів  $\Phi_k$ , що характеризують: ціль, умови поширення фізичних полів (сигналів) у середовищі та прилад спостереження тощо:

$$R = f(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k). \quad (13)$$

Труднощі безпосереднього й точного визначення очікуваної величини  $R$  зумовлені тим, що вплив тих чи інших факторів може мати не лише достатньо стійкий, але часто й нестійкий (флуктуючий) характер, тому зазвичай не піддається завчасному врахуванню і контролю. Припустимо, що впродовж короткого проміжку спостереження характеристики середовища поширення сигналів та слідкувальних пристроїв залишаються незмінними (що в більшості випадків виконується на практиці). Їх можна віднести до постійно діючих і повільно змінних факторів, які піддаються врахуванню та контролю і можуть бути віднесені до контрольованих параметрів, що зумовлюють середнє значення (математичне

сподівання) дальності дії пристрою спостереження. Тоді флуктуації дальності виявлення БПЛА визначатимуться факторами, пов'язаними з ціллю, відповідно до виразів (2), (4), (7), (10), (12) (табл. 2). На основі цього можна говорити про щільність розподілу дальності дії пристрою спостереження  $\Psi(R)$ , що характеризується математичним сподіванням  $m_R$  і середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_R$ .

Таблиця 2

Фактори цілі, що впливають на дальність виявлення

Канал	Фактор	Параметр, що флюктує
Акустичний	Зміна орієнтації БПЛА	Інтенсивність акустичного сигналу
	Зміна режиму роботи силової установки БПЛА	Інтенсивність акустичного сигналу
Оптичний	Зміна орієнтації БПЛА	Площа проекції БПЛА
ІЧ	Зміна орієнтації БПЛА	Площа проекції БПЛА
	Зміна режиму роботи силової установки БПЛА	Інтенсивність ІЧ випромінювання
Радіолокаційний	Зміна орієнтації БПЛА	Ефективна поверхня розсіювання
РТР	Зміна орієнтації БПЛА	Потужність сигналу

При цьому характерними законами розподілу дальності дії пристроїв спостереження в тих чи інших умовах є закони Гаусса, Релея, узагальнений Релея та ін. Нормальний закон може бути використаний лише в достатньо однорідних (типових) умовах, коли розсіювання дальності дії пристрою спостереження зумовлене дією великої кількості незначних за силою своєї дії причин, а вплив основних (домінуючих) факторів обмежений достатньо вузькими межами типової вибірки [23].

Зазвичай інтегральна крива (рис. 3), що характеризує залежність імовірності виявлення від дальності дії  $D(R)$ , прямує до нуля на максимальних дальностях виявлення цілі й до одиниці – на мінімальних. Встановлено, що якщо розглядати виявлення цілей як випадковий процес, який здійснюється в досить однорідних типових умовах, то розподіл дальностей виявлення відповідає нормальному закону [1].

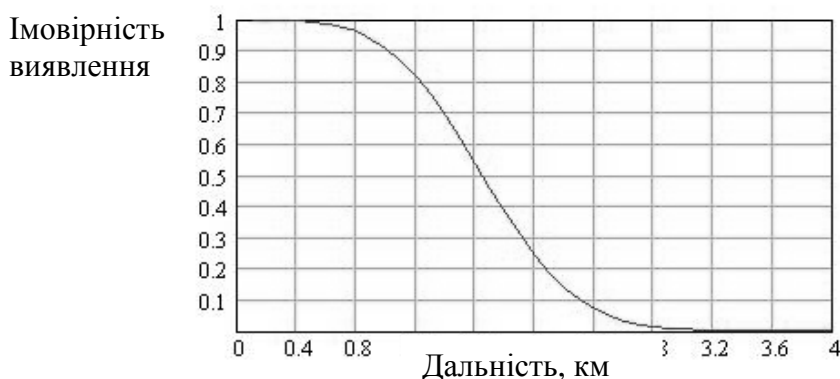


Рис. 3. Інтегральна крива залежності ймовірності виявлення від дальності

Проте виявлення цілі завжди більш імовірно на середніх дальностях, ніж на великих чи малих: на великих – через недостатню енергетичну ефективність пристроїв спостереження, а на малих – через малу ймовірність пропуску цілі.

Припустимо, що пристрій спостереження виявляє БПЛА із заданими ймовірностями правильного виявлення  $D$  та хибної тривоги  $F$  на відстані  $R$ . При коловому огляді за всіма кутами місця необхідно оглянути площу, що становить половину площі сфери, –  $S = 2\pi R^2$ . Якщо максимальна висота польоту БПЛА менша за радіус дії пристрою спостереження  $H < R$  (рис. 4), то площа огляду зменшиться до такої величини:

$$S_{огл} = 2\pi \sin(\gamma) R^2 = 2\pi HR, \quad (14)$$

що принципово лише для тих пристроїв спостереження, які здійснюють сканування.

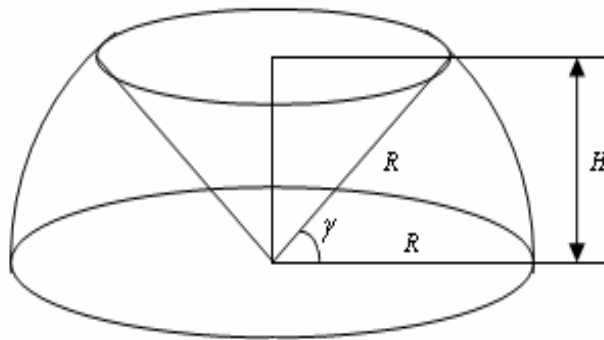


Рис. 4. Зона огляду пристрою спостереження

Тоді вираз (1), що характеризує узагальнений показник ефективності, можна записати в такому вигляді:

$$E = \frac{RS_{огл}}{t_{огл}} = \frac{2\pi HR^2}{t_{огл}}. \quad (15)$$

Для визначення ефективності виявлення БПЛА розглянемо окремо кожен величину, що входить до виразу (15), для кожного з каналів.

Дальність виявлення БПЛА при заданих ймовірностях  $D$  та  $F$  розраховують за відношенням сигнал/шум  $q^2$ . Дане співвідношення, у свою чергу, залежить від енергетичного потенціалу пристрою спостереження, що для акустичного, оптичного, ІЧ та каналу РТР визначають за чутливістю приймачів і розмірами приймальної апертури, а для РЛС ще й за потужністю випромінювання та потужністю сигналу, який випромінює або перевідбиває БПЛА.

Акустичний та канал РТР можуть одночасно оглядати всю площу  $S_{огл}$  на дальності  $R$ , причому час, необхідний на огляд даної площі  $t_{огл} = t_{ел}$ , обмежуватиметься терміном, необхідним для накопичення сигналу до порогового рівня, визначеного заданими ймовірностями  $D$  та  $F$ .

Оптичний та ІЧ канали мають достатньо вузькі миттєві поля зору (елементарні площі огляду)  $S_{ел} = \Delta\epsilon \times \Delta\beta$  (одиниці градусів), причому дальність виявлення цілі збільшується зі

звуженням поля зору. Ширину діаграми спрямованості РЛС визначають за довжиною хвилі зондуючого сигналу та геометричними розмірами апертури антени. Тому для даних пристроїв спостереження для огляду площі простору  $S_{озл}$  на дальності  $R$  необхідно оглянути

$$N = \frac{S_{озл}}{R^2 \Delta\epsilon \times \Delta\beta} = \frac{2\pi}{\Delta\epsilon \times \Delta\beta} \cdot \frac{H}{R} \quad (16)$$

елементарних площ. Час, необхідний для одного циклу огляду,  $t_{озл} = Nt_{ел}$ , де  $t_{ел}$  – час перебування діаграми спрямованості пристрою спостереження в одній точці простору. Тоді вираз для визначення ефективності виявлення БПЛА даними пристроями можна записати в такий спосіб:

$$E = \frac{RS_{озл}}{Nt_{ел}}. \quad (17)$$

Проте вирази (15) та (17) не враховують як особливостей самих пристроїв спостереження, так і помітності БПЛА, що впливає на дальність дії даних пристроїв. Оскільки в кожному каналі спостереження дальність  $R$ , на якій БПЛА може бути виявлений із заданими ймовірностями  $D$  та  $F$ , різна, то для адекватної оцінки ефективності каналів вирази (15) та (17) необхідно помножити на функцію  $D(R)$ , що характеризує залежність ймовірності виявлення від дальності дії. Для кожного з каналів дану залежність можна отримати через відношення сигнал/шум при заданій ймовірності  $F$ , аналогічно до виразу (11). Тоді характер нових функцій, що описуватимуть ефективність каналів виявлення БПЛА, залежатиме від таких параметрів:

оптичного, ІЧ та радіолокаційного – від відношення сигнал/шум, ширини полів зору (ширини діаграми спрямованості) та часу  $t_{ел}$ , необхідного на огляд елемента простору;

акустичного та РТР – від відношення сигнал/шум та часу  $t_{озл}$ , необхідного на огляд заданої ділянки простору.

При цьому збільшення відношення сигнал/шум призводить як до підвищення ефективності виявлення, так і до розширення діапазону дальності, де можна її досягти (рис. 5а). Розширення полів зору оптичних та ІЧ засобів спостереження, з одного боку, зумовить підвищення ефективності виявлення за рахунок зменшення кількості елементарних площ огляду, а з іншого – її зниження через погіршення чутливості. Тому характер зміни ефективності даних пристроїв для різних полів зору залежить від їх чутливості. Збільшення часу на огляд окремого елемента простору  $t_{озл}$  призводить до зміщення кривих ефективності вниз без зміни їх форми. Орієнтовні графіки кривих ефективності залежно від дальності для акустичного  $E_1(R)$ , оптичного  $E_2(R)$ , ІЧ  $E_3(R)$ , радіолокаційного  $E_4(R)$  та каналу РТР  $E_5(R)$  наведено на рис. 5б. Ефективність каналів виявлення може відрізнитися від наведеної на графіку залежно від груп факторів, що характеризують ціль, умови поширення сигналів у середовищі та приладу спостереження.

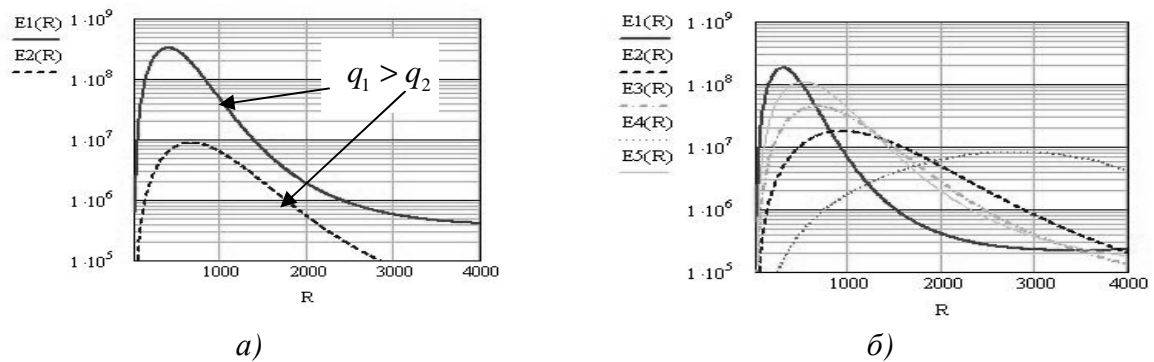


Рис. 5. Залежність ефективності виявлення БПЛА від дальності

Необхідність застосування всіх наявних засобів спостереження для виявлення тактичних БПЛА зумовлена їх низькою помітністю в кожному з каналів. Для оптимізації застосування наявних засобів сформулюємо алгоритм оцінювання ефективності їх можливого застосування:

- визначити енергетичний потенціал пристроїв спостереження;
- оцінити вплив параметрів середовища на поширення фізичних полів;
- оцінити помітність БПЛА для кожного пристрою спостереження;
- задати ймовірністю хибної тривоги  $F$  ;
- визначити аналітичну залежність  $D(R)$  ;
- визначити розмір необхідної зони огляду;
- побудувати в одній системі координат графіки функцій, що описують ефективність виявлення засобами спостереження  $E_n(R)$  ;

обрати ті пристрої спостереження, які забезпечать максимальну ефективність виявлення на інтервалі дальності, що становить інтерес.

**Висновки.** На ефективність пошуку та виявлення тактичних БПЛА впливають фактори, пов'язані з пристроями спостереження, середовищем поширення сигналів та помітністю безпілотників. Для оптимізації застосування наявних засобів спостереження запропоновано алгоритм оцінювання їх ефективності, що ґрунтується на знанні апріорних відомостей про помітність БПЛА в кожному каналі спостереження та розрахованих характеристик середовища.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбунов В. А. Эффективность обнаружения целей / В. А. Горбунов. – М. : Воениздат, 1979. – С. 16.
2. Sinibaldi G. Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV / G. Sinibaldi, L. Marino // Applied Acoustics. – 2013. – № 74. – P. 79–88.
3. Saravanakumar A. Exploitation of Acoustic signature of low flying Aircraft using Acoustic Vector sensor / A. Saravanakumar, K. Senthilkumar // Defence Science Journal. – March 2014. – Vol. 64, No. 2. – P. 95–98.
4. Самохин В. Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым двигателем в толкающей компоновке / В. Ф. Самохин, С. П. Остроухов, П. А. Мошков // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – Вып. № 70. – С.1–24.

5. Sadasivan S. Acoustic Signature of an Unmanned Air Vehicle – Exploitation for Aircraft Localisation and Parameter Estimation / S. Sadasivan, M. Gurubasavaraj, S. Ravi Sekar // *Eronautical DEF SCI J.* – 2001. – Vol. 51, N. 3. – P. 279–283.
6. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K. Massey, R. Gaeta // *16th AIAA 2010-3911/CEAS Aeroacoustics Conference.* – 2010. – P. 1–16.
7. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / L. Marino // *16th AIAA 2010-3854/CEAS Aeroacoustics Conference.* – 2010. – P. 1–14.
8. Pham T. TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs / T. Pham, N. Srour // *U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE.* – 2004. – Vol. 5417. – P. 24–29.
9. Zelnio A. M. Detection of small aircraft Using an acoustic array. Thesis. B.S / A. M. Zelnio. – *Electrical Engineering, Wright State University, 2007.* – 55 p.
10. Соловьев В. А. Проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов оптико-электронными устройствами / В. А. Соловьев // *Электронный математический и медико-биологический журнал.* – Т. 10, 2011. – Вып. 3. – С. 1–13.
11. 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.
12. Moses A. Radar-based detection and identification for miniature air vehicles / A. Moses, M. J. Rutherford, K. P. Valavanis // *IEEE International Conference on Control Applications.* – Denver, CO, USA. – September 28–30, 2011. – P. 933–940.
13. Detecting, Tracking and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence / W. Shi, G. Arabadjis, B. Bishop, P. Hill // *Sensor Fusion – Foundation and Applications.* – Rijeka, Croatia : *InTech Europe, 2001.* – P. 139–158.
14. Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment / R. Austin. – *Boston : John Wiley & Sons Ltd, 2010.* – P. 113–127.
15. Bradley S. Atmospheric acoustic remote sensing / S. Bradley. – *London : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.* – P. 90–91.
16. Затухание звука при распространении на местности. Ч. 1. Расчет поглощения звука атмосферой : ГОСТ 31295.1-2005 (ИСО 9613-1:1993). – [Дата введения 2007-01-01]. – М. : *Стандартинформ, 2006.* – 43 с. – (Межгосударственный стандарт).
17. Довідник з протиповітряної оборони / А. Я. Горопчин, І. О. Романенко, Ю. Г. Даник та ін. – Х. : *ХВУ, 2003.* – 368 с.
18. Радиотехнические системы : учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др. ; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : *Высшая школа, 1990.* – 496 с. : ил.
19. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов : монография / Р. П. Быстров, Г. К. Загорин, А. В. Соколов, Л. В. Фёдорова. – М. : *Радиотехника, 2008.* – С. 13.
20. Матвеев А. Н. Электродинамика : учеб. пособие. / А. Н. Матвеев. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : *Высш. школа, 1980.* – С. 272.
21. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации / Я. Д. Ширман. – М. : *Сов. радио, 1970.* – С. 235–240.
22. Куприянов А. И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – М. : *Вузовская книга, 2003.* – 528 с. : ил.
23. Афанасьев А. А. Эффективность обнаружения целей радиотехническими средствами наблюдения / А. А. Афанасьев, В. А. Горбунов. – М. : *Воениздат, 1964.* – 122 с.

Подано 05.03.2015

**Ю. Г. Даник, Н. В. Бугаёв**

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТАКТИЧЕСКИХ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПАССИВНЫМИ И  
АКТИВНЫМИ СРЕДСТВАМИ НАБЛЮДЕНИЯ**

*В статье проанализированы факторы, которые влияют на эффективность обнаружения тактических беспилотных летательных аппаратов акустическими, оптическими, инфракрасными и радиотехническими средствами наблюдения. Разработаны рекомендации по выбору наиболее эффективных средств наблюдения с учетом влияния разных групп факторов.*

**Y. G. Danyk, M. V. Bougaiov**

**ANALYSIS OF EFFICIENCY OF TACTICAL UNMANNED AERIAL VEHICLES  
DETECTION BY PASSIVE AND ACTIVE DEVICES**

*Factors that influence efficiency of tactical unmanned aerial vehicles detection by acoustical, optical, infrared and radiotechnical devices are analyzed. Recommendations for the most effective devices selection into consideration of different groups of factors are given.*