

УДК 621.396.969.35

doi: 10.32620/aktt.2021.6.08

**М. В. РУЖЕНЦЕВ, С. С. ЖИЛА, В. В. ПАВЛІКОВ, Г. С. ЧЕРЕПНІН, А. В. ПОПОВ,
В. В. КОШАРСЬКИЙ, Е. О. ЦЕРНЕ, Д. С. ВЛАСЕНКО**

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський
авіаційний інститут», Україна*

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ БАГАТОЧАСТОТНИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА НА ТЛІ АТМОСФЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У зв'язку з неможливістю приховати власне радіотеплове випромінювання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) або зменшити його контраст на тлі випромінювання атмосфери, доцільно застосовувати високочутливі радіометричні приймачі для вирішення задачі виявлення. Розроблено оптимальний метод комплексування результатів вимірювань в багатоканальних радіометричних приймачах та виявлення різних типів та класів безпілотних літальних апаратів на тлі неба у X, Ka та W діапазонах хвиль при різних метеорологічних умовах. Наскрізна оптимізація методів та алгоритмів дозволить виявити теоретичні основи побудови радіометричних систем починаючи від області реєстрації електромагнітних полів до кінцевих каскадів. Цей метод задовольнятиме суперечливим вимогам до радіотехнічних вимірювань – високій просторовій роздільній здатності, високій флуктуаційній чутливості та всепогодності. В безхмарну та ясну погоду радіометричні вимірювання у W діапазоні дозволять отримати високоточні оцінки просторового положення БпЛА, у X діапазоні – надійні спостереження в дощ, сніг, мряку, туман. Застосування у радіометричному комплексі приймача Ka діапазону хвиль дозволить реалізувати найкращу флуктуаційну чутливість за рахунок технічних досягнень вітчизняного виробництва у створенні широкосмугових радіометричних приймачів у цьому діапазоні хвиль. Проведено дослідження основних параметрів виявлення БпЛА, а саме ймовірність помилкової тривоги виявлення та ймовірність правильного виявлення. Отримані теоретичні результати дозволяють визначити алгоритми обробки сигналів і оптимальні структури радіометричних приймачів, проаналізувати граничні похибки вимірювання та розробити рекомендації з проведення експериментів. Отримавши базу даних радіометричних контрастів, можлива подальша реалізація технічних рішень щодо підвищення можливостей моніторингу повітряного простору для виявлення БпЛА. Надано рекомендації щодо практичного вибору порогу виявлення БпЛА для забезпечення ймовірності правильного виявлення не гірше 0,9 для різних кутів спостереження, стану атмосфери, розмірів та матеріалу виготовлення.

Ключові слова: радіометрія; БпЛА детектування; оптимізація алгоритмів; ймовірнісні характеристики.

Вступ

При розробці та модернізації сучасних засобів протиповітряної оборони основна увага приділяється розвитку акустичних [1, 2], оптичних [3], інфрачервоних [4], активних [5-7] та пасивних [8-10] радіолокаційних методів зондування повітряного простору. Кожний метод має свої переваги і недоліки, проте об'єднує їх той факт, що одночасно ведуться дослідження з розроблення методів і засобів зниження помітності безпілотних літальних апаратів (БпЛА) у зазначених діапазонах. Як наслідок виникає протиріччя: з одного боку розробники засобів виявлення та боротьби з БпЛА постійно підвищують точність та надійність вимірювань, а з іншого боку – на момент отримання результатів вони вже є застарілими та не актуальними по відношенню до розвинутих засобів зниження помітності. Подолати

це протиріччя можливо за рахунок застосування пристроїв та систем пасивної радіолокації. Такі системи є скритними, надчутливими та здатні реєструвати власне радіотеплове випромінювання (РТВ) літальних апаратів, в тому числі виконаних з композитних матеріалів, в широкому спектрі частот на тлі випромінювання атмосфери в будь-яку погоду, вдень та вночі.

Для досягнення високих показників виявлення необхідно розробити систему з високою просторовою роздільною здатністю, високою флуктуаційною чутливістю та всепогодністю. Реалізувати данні переваги можливо в радіометричному комплексі, що працює у X, Ka та W діапазонах хвиль. В безхмарну та ясну погоду радіометричні вимірювання у W діапазоні дозволять отримати високоточні оцінки просторового положення БпЛА, у X діапазоні – надійні

спостереження в дощ, сніг, мряку, туман, а діапазон Ка, завдяки розвинутій в Україні технології створення ширококутових приймачів, підвищує загальну флуктуаційну чутливість радіометричного комплексу.

В даній роботі наводяться результати розробки теоретичних основ побудови багаточастотних радіометричних комплексів з використанням методів оптимізації інформаційно-вимірвальних систем.

Мета роботи полягає в створенні методу побудови всепогодних багаточастотних радіометричних комплексів з високою просторовою роздільною здатністю та високою флуктуаційною чутливістю.

Постановка задачі та рівняння спостереження

Ідея радіометричного виявлення. У роботах [11-13] синтезовано оптимальні та квазіоптимальні алгоритми виявлення сигналів власного радіотеплового випромінювання об'єктів дослідження на тлі внутрішніх шумів приймача. Розроблено структурні схеми оптимальних та квазіоптимальних виявників з дискретною та аналоговою обробкою прийнятих коливань. Також в [14, 15] досліджено аналітичні вирази ймовірнісних та енергетичних характеристик виявлення для різних співвідношень потужності корисних сигналів та завад, побудовано відповідні криві виявлення. Отримані в [11-15] результати є фундаментальними при розробці радіометричних систем і комплексів. У той же час виявлення сигналів радіотеплового випромінювання базується на двох гіпотезах: наявності шумового сигналу на вході приймача та його відсутності. Застосування такого підходу до завдань пасивної радіолокації відповідає практичній ситуації проведення експериментів, оскільки РТВ, що випускається об'єктами з температурою вище 0 К завжди існує. Більш практичним завданням для цього є виявлення приростів температури нагрітих БПЛА з низькою відбиваючою здатністю на тлі радіотеплового випромінювання неба в присутності внутрішніх шумів приймача. Розв'яжемо це завдання з використанням фундаментальних основ виявлення сигналів радіотеплового випромінювання [16].

Постановка задачі. Завдання статистичної теорії виявлення контрастів радіозображення або приростів яскравості температури об'єкта, що досліджується, полягає в наступному: необхідно по прийнятій реалізації $u(t)$ на інтервалі часу $t \in [0, T]$ прийняти рішення, чи з'явився на вході приймача приріст корисного сигналу $s_{UAV}(t)$ або є постійний

сигнал фону $s_{atm}(t)$ у суміші з шумами приймача $n(t)$.

Рівняння спостереження. Векторне рівняння спостереження, що описує сигнали на вході багаточастотного радіометричного комплексу на інтервалі часу $(0, T)$ має вигляд:

$$\bar{u}(t) = \varepsilon \bar{s}_{UAV}(t) + \bar{s}_{atm}(t) + \bar{n}(t), \quad (1)$$

де $\varepsilon = (0, 1)$ – множник, що вказує на наявність і відсутність приросту радіотеплового випромінювання, $\bar{s}_{UAV}(t)$ – вектор корисних шумових сигналів від шуканого БПЛА, $\bar{s}_{atm}(t)$ – вектор сигналів фонового випромінювання атмосфери, $\bar{n}(t)$ – вектор адитивних завад.

Процеси $s_{iUAV}(t)$, $s_{iatm}(t)$, $n_i(t)$ для кожної i -ї частоти ($i = \overline{1, K}$) є гаусовими білими (дельта-корельованими) стаціонарними та взаємно незалежними випадковими процесами з нульовим математичним сподіванням та наступними енергетичними спектрами:

$$\begin{aligned} G_{iUAV}(f) &= 0,5k_B T_{iUAV}, \\ G_{iatm}(f) &= 0,5k_B T_{iatm}, \\ G_{in}(f) &= 0,5k_B T_{in}, \end{aligned} \quad (2)$$

де k_B – постійна Больцмана, T_{iUAV} , T_{iatm} , T_{in} – яскравісні температури БПЛА, фонового випромінювання атмосфери, внутрішніх шумів приймача.

Рішення оптимізаційної задачі

Для визначення оптимального алгоритму виявлення БПЛА багаточастотним комплексом (розробки оптимальної системи обробки спостереження $\bar{u}(t)$) скористаємося критерієм відношення функцій правдоподібності:

$$\frac{P(\bar{u}(t) | \varepsilon = 1)}{P(\bar{u}(t) | \varepsilon = 0)} >, \text{ або } < \frac{P(0)}{P(1)}, \quad (3)$$

де $P(\bar{u}(t) | \varepsilon = 1)$ та $P(\bar{u}(t) | \varepsilon = 0)$ – функції правдоподібності, $P(0)$ та $P(1)$ – апіорні ймовірності відсутності та наявності БПЛА в області спостереження.

Функції правдоподібності для безперервних векторних випадкових процесів (1) мають вигляд:

$$P(\bar{u} | 0) = \prod_{i=1}^K \lim_{\substack{\Delta f_i \rightarrow \infty \\ \Delta t_i \rightarrow 0 \\ M_i \rightarrow \infty}} \frac{1}{(2\pi)^2 [\Delta f_i k_B (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})]^2} \times \exp\left(-\frac{1}{k_B (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})} \int_0^T u_i^2(t) dt\right), \quad (4)$$

$$P(\bar{u} | 1) = \prod_{i=1}^K \lim_{\substack{\Delta f_i \rightarrow \infty \\ \Delta t_i \rightarrow 0 \\ M_i \rightarrow \infty}} \frac{1}{(2\pi)^2 [\Delta f_i k_B (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})]^2} \times \exp\left(-\frac{1}{k_B (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})} \int_0^T u_i^2(t) dt\right), \quad (5)$$

де $\Delta f_i = 1/2\Delta t_i$ – ширина спектра спостережуваних коливань у i -му каналі прийому, Δt_i – інтервал часу, через який процеси $s_{i \text{ UAV}}(t)$, $s_{i \text{ atm}}(t)$, $n_i(t)$ будуть некорельовані, $M_i = 2T\Delta f_i$ – кількість некорельованих відліків на інтервалі часу $t \in (0, T)$. В (4) і (5) передбачається що всі процеси, що входять до $u(t)$, мають нульове математичне сподівання.

Підставивши (4), (5) в (3), отримаємо:

$$\left(\prod_{i=1}^K \lim_{\substack{\Delta f_i \rightarrow \infty \\ \Delta t_i \rightarrow 0 \\ M_i \rightarrow \infty}} \frac{M_i}{(T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2} \right) \times \exp\left(\sum_{i=1}^K C_i \int_0^T u_i^2(t) dt\right) > \text{або} < \frac{P(0)}{P(1)}, \quad (6)$$

$$\text{де } C_i = \frac{T_{i \text{ UAV}}}{k_B (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})(T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})}.$$

Видно, що відношення правдоподібності (6) є монотонно зростаючою функцією величини

$$\sum_{i=1}^K C_i \int_0^T u_i^2(t) dt.$$

Тому з деяким порогом достатньо порівнювати цю величину, яка є в даній задачі достатньою статистиками.

Таким чином, рішення поставленої задачі виявлення можна представити виразом

$$Y_{\Delta} = \sum_{i=1}^K C_i \int_0^T u_i^2(t) dt >, \text{ або } < Y_{0\Delta}, \quad (7)$$

де Y – вихідний ефект оптимального виявника, Y_0 – порогове значення вихідного ефекту.

Аналіз ймовірнісних характеристик

На практиці найбільш цікавими є ймовірність правильного виявлення

$$D(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(Y | \varepsilon = 1) dY$$

і ймовірність помилкової тривоги

$$L(Y_0) = \int_{Y_0}^{\infty} P(Y | \varepsilon = 0) dY.$$

Для їх визначення необхідно знайти диференціальні закони розподілу ймовірностей $P(Y | \varepsilon = 1)$, $P(Y | \varepsilon = 0)$. У виразі (7) процеси $u_i(t)$ на кожній частоті розподіляються за нормальним законом, а значення $u_i^2(t)$ відповідно до закону χ^2 , величина $\int_0^T u_i^2(t) dt$ відповідно до закону χ^2 з M_i ступенів свободи. У практичних ситуаціях радіометричних вимірювань кількість M_i перевищує мільйон. Отже, вихідний ефект Y (достатня статистика) в силу центральної граничної теореми Ляпунова можна вважати розподіленім за нормальним законом

$$P(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} \exp\left(-\frac{(Y - m_Y)^2}{2\sigma_Y^2}\right), \quad (8)$$

де m_Y – математичне сподівання вихідного ефекту

Y , σ_Y^2 є дисперсією Y .

Математичні сподівання в (8) за наявності та відсутності БПЛА в області спостереження виражаються наступним чином:

$$m_Y[Y(\bar{u} | 0)] = 0,5k_B \sum_{i=1}^K M_i C_i (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}}),$$

$$m_Y[Y(\bar{u} | 1)] = 0,5k_B \sum_{i=1}^K M_i C_i (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}}),$$

$$\begin{aligned} \sigma_Y^2[Y(\bar{u} | 0)] &= 0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2, \\ \sigma_Y^2[Y(\bar{u} | 1)] &= 0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Рівняння (8) з урахуванням (9) має вигляд:

$$\begin{aligned} P(Y | 0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2}} \times \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\left(Y - 0,5k_B \sum_{i=1}^K M_i C_i (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}}) \right)^2}{0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2} \right], \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P(Y | 0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi \frac{k_B^2}{2} \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2}} \times \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\left(Y - \frac{1}{2} k_B \sum_{i=1}^K M_i C_i (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}}) \right)^2}{0,5k_B^2 \sum_{i=1}^K M_i C_i^2 (T_{i \text{ UAV}} + T_{i \text{ atm}} + T_{i \text{ n}})^2} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Використовуючи отримані вирази (10) і (11), можна розрахувати параметри $D(Y_0)$ і $L(Y_0)$, які є базовими для радіометричного комплексу виявлення БпЛА. Слід зазначити, що в задачах виявлення приростів шумових сигналів основним заважаючим процесом є результат недоусереднення процесів $u_i^2(t)$ при їх інтегруванні за скінченний інтервал $(0, T)$ в алгоритмі (7). Коли $M_i = \infty$ ця завада відсутня і теоретично виявлення підсилення корисного сигналу в цьому випадку безпомилкове.

Ймовірність правильного визначення БпЛА на тлі атмосфери

Щоб розрахувати $L(Y_0)$ виконуються наступні перетворення

$$\begin{aligned} L(Y_0) &= \int_{Y_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_Y[Y(\bar{u} | 0)]} e^{-\frac{(Y - m_Y[Y(\bar{u} | 0)])^2}{2\sigma_Y^2[Y(\bar{u} | 0)]}} dY = \\ &= \left[x = \frac{Y - m_Y[Y(\bar{u} | 0)]}{\sigma_Y[Y(\bar{u} | 0)]}, dx = \frac{dY}{\sigma_Y[Y(\bar{u} | 0)]}, \right. \\ &\quad \left. \text{for } Y = Y_0, \quad x = x_0 = \frac{Y_0 - m_Y[Y(\bar{u} | 0)]}{\sigma_Y[Y(\bar{u} | 0)]} \right] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_0} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \\ &= 1 - F(x_0) = F(-x_0) = \frac{1}{2}[1 - \Phi(x_0)], \end{aligned} \quad (12)$$

де $F(x_0)$ і $\Phi(x_0)$ є інтегралами ймовірності.

Ймовірність правильного виявлення $D(Y_0)$ також записується наступним чином

$$D(Y_0) = 1 - F(y_0) = F(-y_0) = \frac{1}{2}[1 - \Phi(y_0)], \quad (13)$$

$$\text{де } y_0 = \frac{Y_0 - m_Y[Y(\bar{u} | 1)]}{\sigma_Y[Y(\bar{u} | 1)]}.$$

Щоб розрахувати $D(Y_0)$ і $L(Y_0)$ спочатку необхідно встановити необхідне значення помилкової тривоги, що дає можливість визначити значення порогу Y_0 наступним чином

$$\begin{aligned} L_{\text{desired}} &= \varphi(x_0 \text{ desired}) \Rightarrow \\ &\Rightarrow x_0 \text{ desired} = \varphi^{-1}(L_{\text{desired}}). \end{aligned} \quad (14)$$

На рис. 1 наведено графік для наступних параметрів виявлення міні-БпЛА на тлі чистої атмосфери на частотах $f_1 = 10$ ГГц, $f_2 = 20$ ГГц, $f_3 = 35$ ГГц і $f_4 = 94$ ГГц під кутом візування 30° :

$$\begin{aligned} M_1 &= 10^8, \quad M_2 = 10^8, \quad M_3 = 4,5 \cdot 10^8, \quad M_4 = 1,5 \cdot 10^8, \\ T_{1 \text{ atm}} &= 15 \text{ К}, \quad T_{2 \text{ atm}} = 40 \text{ К}, \quad T_{3 \text{ atm}} = 45 \text{ К}, \\ T_{4 \text{ atm}} &= 100 \text{ К}, \quad T_{1 \text{ n}} = 100 \text{ К}, \quad T_{2 \text{ n}} = 130 \text{ К}, \\ T_{3 \text{ n}} &= 600 \text{ К}, \quad T_{4 \text{ n}} = 3000 \text{ К}, \quad T_{1 \text{ UAV}} = 86 \text{ К}, \\ T_{2 \text{ UAV}} &= 96 \text{ К}, \quad T_{3 \text{ UAV}} = 121 \text{ К}, \quad T_{4 \text{ UAV}} = 245 \text{ К}. \end{aligned}$$

Вказані параметри характеризують радіометричні приймачі діапазонів хвиль X, Ka, K та W, що розроблені на кафедрі аерокосмічних радіоелектронних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Використовуючи графіки на рис. 2-4, можна розробити рекомендації щодо структури радіометричного комплексу, ширини спектру радіометричних приймачів, часу спостереження об'єктів, умов вимірювань та забезпечити підвищення ефективності виявлення від зміни цих параметрів.

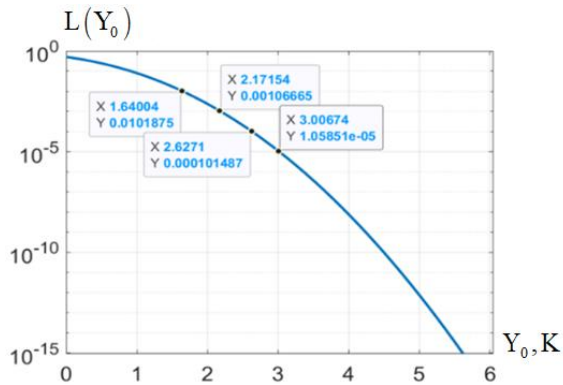


Рис. 1. Ймовірність помилкової тривоги виявлення БПЛА

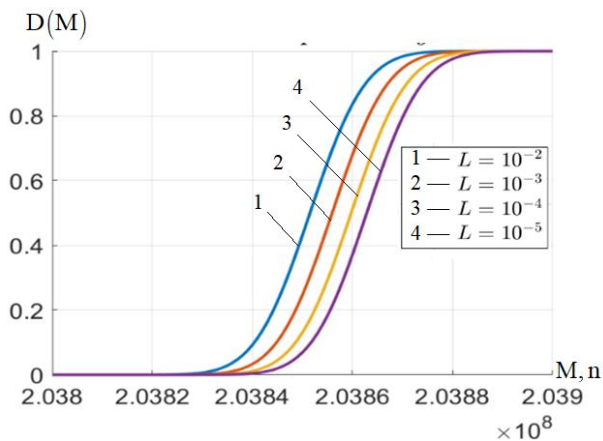


Рис. 2. Ймовірність правильного виявлення БПЛА для різної кількості некорельованих відліків

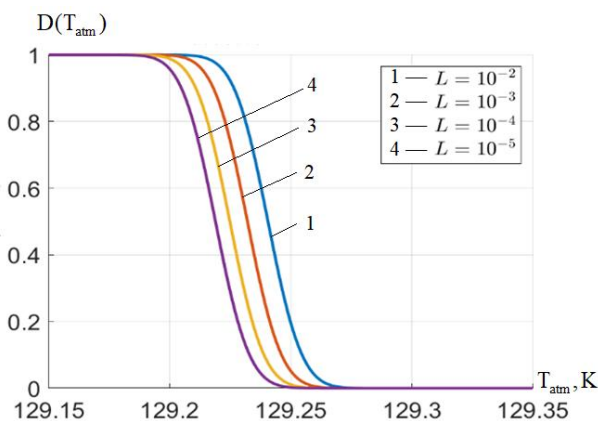


Рис. 3. Ймовірність правильного виявлення БПЛА при різних температурах атмосфери

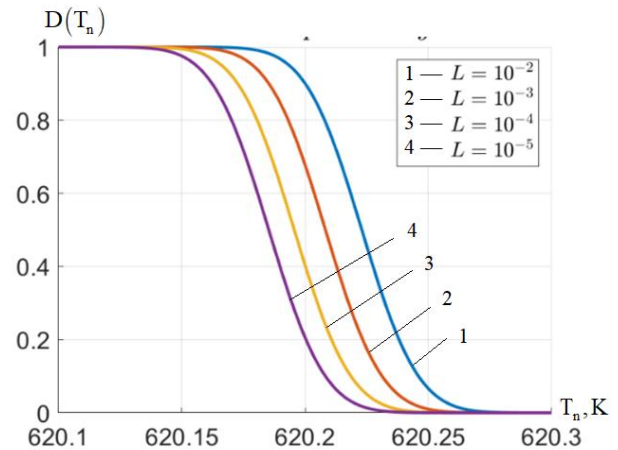


Рис. 4. Ймовірність правильного виявлення БПЛА при різних температурах приймача

Висновок

Використовуючи фізичні властивості радіотеплового випромінювання, поставлено та вирішено задачу розробки теоретичних основ побудови багаточастотних радіометричних систем виявлення БПЛА. Використання багаточастотності обумовлено необхідністю експлуатації комплексу в різних погодних умовах без втрати точності. Розроблено оптимальний алгоритм виявлення, що дозволяє комплексувати результати оцінок яскравісної температури БПЛА в різних каналах прийому. Комплексування виконується з урахуванням характеристик приймачів і стану атмосфери в заданому діапазоні довжин хвиль.

З використанням сучасних досягнень статистичної теорії оптимізації радіосистем розраховано ймовірнісні характеристики роботи радіометричного комплексу. Проаналізовано аналітичні вирази для ймовірності правильного виявлення та помилкової тривоги. Використовуючи розроблені авторами характеристики індивідуальних радіометричних приймачів діапазонів хвиль X, Ka, K, W, розраховано ймовірності виявлення БПЛА. Аналіз графіків показує, що середня смуга пропускання приймачів повинна бути не менше 2 ГГц при постійний часу інтегрування 0,1 секунди, шумова температура приймача не більше 620 К, а температура атмосфери не більше 129 К. для виявлення міні-БПЛА з ймовірністю 0,9.

Підтвердження

Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України, державні реєстраційні номери проектів: 0120U102082, 0119U100968, 0121U109600 та 0121U109598.

Література

1. Артюшин, Л. М. Алгоритм виявлення акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів на основі аналізу фрактальної розмірності [Текст] / Л. М. Артюшин, М. В. Бугайов // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2018. – № 2(32). – С. 23-28.

2. Павлюк, В. В. Алгоритм виявлення радіосигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти каналів дистанційного керування безпілотними літальними апаратами [Текст] / В. В. Павлюк, М. В. Бугайов // Збірник наукових праць ЖВІ НАУ. – Житомир, 2017. – Вип. 14 – С. 5–15.

3. A Survey of Computer Vision Methods for 2D Object Detection from Unmanned Aerial Vehicles [Text] / D. Cazzato, C. Cimorelli, J. L. Sanchez-Lopez, H. Voos, M. Leo // Journal of Imaging. – 2020. – Vol. 6(78). – P. 1–380.

4. Night-time Detection of UAVs using Thermal Infrared Camera [Text] / P. Andraši, T. Radišić, M. Muštra, J. Ivošević // Transportation Research Procedia. – 2017. – Vol. 28. – P. 183-190.

5. Вишневецький, С. Д. Потенційні можливості РЛС РТВ з виявлення оперативного-тактичних та тактичних безпілотних літальних апаратів [Текст] / С. Д. Вишневецький, Л. В. Бейліс, В. Й. Климченко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 2 (27). – С. 92–98.

6. An Improved Unauthorized Unmanned Aerial Vehicle Detection Algorithm Using Radiofrequency-Based Statistical Fingerprint Analysis [Text] / Y. Shengying, Q. Huibin, L. Xiaolin, T. Aaron Gulliver // Sensors. – 2019. – Vol. 19 (274). – P. 1–22.

7. New Approach of UAV Movement Detection and Characterization Using Advanced Signal Processing Methods Based on UWB Sensing [Text] / A. Digulescu, C. Despina-Stoian, D. Stănescu, F. Popescu, F. Enache, I. Cornel, E. Rădoi, I. Rîncu, A. Serbănescu // Sensors. – 2020. – Vol. 20(5904). – P. 1–18.

8. Poullin, D. UAV Detection and Localization Using Passive DVB-T Radar MFN and SFN [Text] / D. Poullin // The sensors and electronic technology panel. – 2016. – P. 18.1-18.10.

9. LTE-based passive radar for drone detection and its experimental results [Text] / D. Yangpeng, Y. Jianxin, W. Xianrong, R. Yunhua, W. Benjing // The Journal of Engineering. – 2019. – Vol. 10. – P. 1-4. DOI: 10.1049/joe.2019.0583.

10. GNSS Based Passive Radar for UAV Monitoring [Text] / C. V. Plioudis et al. // 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf), 22-26 April 2019. – Boston, 2019. – P. 1-6.

11. Method of Detection of Thermal Microwave Radiation Increments. [Text] / V. K. Volosyuk,

V. V. Pavlikov, N. V. Ruzhentsev, S. S. Zhyla, O. V. Odokienko and A. D. Sobkolov // 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 4-7 September 2018. – Odessa, 2018. – P. 269-274.

12. Optimal Radiometric Detection of Band-Limited Noise Signal [Text] / V. K. Volosyuk, V. V. Pavlikov, S. S. Zhyla, and O. V. Odokienko // 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 18-20 April 2017. – Kyiv, 2017. – P. 517-522.

13. Николаев, А. Г. Радиотеплолокация [Текст] / А. Г. Николаев, С. В. Перцев. – М. : Воениздат, 1970. – 132 с.

14. An Optimal Algorithm for the Formation of Unbiased Estimates of the Effective Noise Temperature of a Stochastic Radio Thermal Signal [Text] / V. K. Volosyuk, V. F. Kravchenko, A. V. Odokienko, V. V. Pavlikov, V. I. Pustovoit // Doklady Physics. – 2018. – Vol. 63(6). – P. 227–230.

15. Optimum Algorithm for Estimating Radio Brightness in Spatially Distributed Radiometer Systems [Text] / V. K. Volosyuk, S. S. Zhyla, V. V. Pavlikov, A. D. Abramov, V. G. Yakovlev // Telecommunications and Radio Engineering. – 2018. – Vol. 77(18). – P. 1649-1658.

16. Волосюк, В. К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации [Текст] / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2008. – 704 с.

References

1. Artyushyn, L. M. Algorithm vyavlennya akustychnykh syhnaliv bezpilotnykh lital'nykh aparativ na osnovi analizu fraktal'noyi rozmirnosti [Algorithm for detecting acoustic signals of unmanned aerial vehicles based on fractal dimension analysis]. Suchasni informatsiyi tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony – Modern information technologies in the field of security and defense, 2018, no. 2(32), pp. 23-28.

2. Pavlyuk, V. V., Buhayov, M. V. Algorithm vyavlennya radiosyhnaliv iz psevdovypadkovym perestroyuvannyam robochoyi chastoty kanaliv dystantsiynoho keruvannya bezpilotnyimi lital'nyimi aparatamy [Algorithm for detecting radio signals with pseudo-random tuning of the operating frequency of remote control channels for unmanned aerial vehicles] Zbirnyk naukovykh prats' ZhVI NAU – Collection of scientific works of ZhVI NAU, Zhytomyr, ZhVI NAU, vol. 14, 2017, pp. 5–15.

3. Cazzato, D., Cimorelli, C., Sanchez-Lopez, J. L., Voos, H., Leo, M. A Survey of Computer Vision Methods for 2D Object Detection from Unmanned Aerial

Vehicles. *Journal of Imaging*, 2020, vol. 6(78), pp. 1-380.

4. Andraši, P., Radišić, T., Muštra, M., Ivošević, J. Night-time Detection of UAVs using Thermal Infrared Camera. *Transportation Research Procedia*, 2017, vol. 28, pp. 183-190.

5. Vyshnevsky, S. D., Baylis, L. V., Klimchenko, V. Y. Potentsiyni mozhlyvosti RLS RTV z vyyavlennya operatyvno-taktychnykh ta taktychnykh bezpilotnykh lital'nykh aparativ [Potential capabilities of the RTV radar to detect operational-tactical and tactical unmanned aerial vehicles]. *Nauka i tekhnika Povitryanykh Syl Zbroynykh Syl Ukrayiny – Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces Of Ukraine*, 2017, no. 2(27), pp. 92–98.

6. Shengying, Y., Huibin, Q., Xiaolin, L., Aaron Gulliver, T. An Improved Unauthorized Unmanned Aerial Vehicle Detection Algorithm Using Radiofrequency-Based Statistical Fingerprint Analysis. *Sensors*, 2019, vol. 19(274), pp. 1-22.

7. Digulescu, A., Despina-Stoian, C., Stănescu, D., Popescu, F., Enache, F., Cornel, I., Rădoi, E., Rîncu, I., Serbănescu, A. New Approach of UAV Movement Detection and Characterization Using Advanced Signal Processing Methods Based on UWB Sensing. *Sensors*, 2020, vol. 20(5904), pp. 1-18.

8. Poullin, D. UAV Detection and Localization Using Passive DVB-T Radar MFN and SFN. *The sensors and electronic technology panel*, 2016, pp. 18.1-18.10.

9. Yangpeng, D., Jianxin, Y., Xianrong, W., Yunhua, R., Benjing, W. LTE-based passive radar for drone detection and its experimental results. *The Journal of Engineering*, 2019, vol. 10, pp. 1-4. DOI: 10.1049/joe.2019.0583.

10. Ilioudis, C. V. et al. GNSS Based Passive Radar for UAV Monitoring, *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 22-26 April 2019, Boston, 2019, pp. 1-6.

11. Volosyuk, V. K., Pavlikov, V. V., Ruzhentsev, N. V., Zhyla, S. S., Odokienko, O.V., Sobkolov, A.D. Method of Detection of Thermal Microwave Radiation Increments. *9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, 4-7 September 2018, Odessa, 2018, pp. 269-274.

12. Volosyuk, V. K., Pavlikov, V. V., Zhyla, S. S., Odokienko, O. V. Optimal Radiometric Detection of Band-Limited Noise Signal. *IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 18-20 April 2017, Kyiv, 2017, pp. 517-522.

13. Nikolaiev, A. G., Pertsov, S. V. *Radyotepolokatsyya* [Radio-Thermal Location]. Moscow, Voenyzzdat Publ., 1970. 132 p.

14. Volosyuk, V. K., Kravchenko, V. F., Odokienko, A. V., Pavlikov, V. V., Pustovoit, V. I. An Optimal Algorithm for the Formation of Unbiased Estimates of the Effective Noise Temperature of a Stochastic Radio Thermal Signal. *Doklady Physics*, 2018, vol. 63(6), pp. 227-230.

15. Volosyuk, V. K., Zhyla, S. S., Pavlikov, V. V., Abramov, A. D., Yakovlev, V. G. Optimum Algorithm for Estimating Radio Brightness in Spatially Distributed Radiometer Systems. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2018, vol. 77(18), pp. 1649-1658.

16. Volosyuk, V. K., Kravchenko, V. F. *Statystycheskaya teoriya radyotekhnicheskyykh sistem dystantsyonnoho zondirovaniya y radyolokatsyy* [Statistical Theory of Radio-Engineering Systems of Remote Sensing and Radar], Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 704 p.

Надійшла до редакції 07.09.2021, розглянуто на редколегії 26.11.2021

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОЧАСТОТНЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ОБНАРУЖЕНИЯ БПЛА НА ФОНЕ АТМОСФЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*М. В. Руженцев, С. С. Жила, В. В. Павліков, Г. С. Черепнін, А. В. Попов,
В. В. Кошарський, Е.О. Церне, Д. С. Власенко.*

В связи с невозможностью скрыть собственное радиотепловое излучение беспилотного летательного аппарата (БПЛА) или снизить его контраст на фоне излучения атмосферы, целесообразно применять высокочувствительные радиометрические приемники для решения задачи обнаружения. Разработан оптимальный метод комплексирования результатов измерений в многоканальных радиометрических приемниках и выявление разных типов и классов БПЛА на фоне неба в X, Ka и W диапазонах волн при различных метеорологических условиях. Сквозная оптимизация методов и алгоритмов позволит выявить теоретические основы построения радиометрических систем, начиная от области регистрации электромагнитных полей до конечных каскадов. В безоблачную и ясную погоду радиометрические измерения в W диапазоне позволят получить высокоточные оценки пространственного положения БПЛА, в X диапазоне надежные наблюдения в дождь, снег, туман. Применение в радиометрическом комплексе приемника Ka

диапазона волн позволит реализовать наилучшую чувствительность за счет технических достижений отечественного производства в создании широкополосных радиометрических приемников в этом диапазоне волн. Проведены исследования основных параметров обнаружения БПЛА, а именно вероятность ошибочной тревоги обнаружения и вероятность правильного обнаружения. Полученные теоретические результаты позволяют определить алгоритмы обработки сигналов и оптимальные структуры радиометрических приемников, проанализировать предельную погрешность измерения и разработать рекомендации по проведению экспериментов. Получив базу данных радиометрических контрастов, возможна дальнейшая реализация технических решений по повышению возможностей мониторинга воздушного пространства для обнаружения БПЛА. Даны рекомендации по практическому выбору порога обнаружения БПЛА для обеспечения вероятности правильного обнаружения не хуже 0,9 для разных углов наблюдения, состояния атмосферы, размеров и материала изготовления.

Ключевые слова: радиометрия; БПЛА детектирование; оптимизация алгоритмов; вероятностные характеристики.

THEORETICAL BASIS OF CONSTRUCTING MULTI-FREQUENCY RADIOMETRIC COMPLEXES FOR DETECTING UAV ON THE BACKGROUND OF ATMOSPHERIC RADIATION

*N. Ruzhentsev, S. Zhyla, V. Pavlikov, G. Cherepnin, A. Popov,
V. Kosharskyi, E. Tserne, D. Vlasenko*

Due to the impossibility of hiding the unmanned aerial vehicles (UAV) own radiothermal radiation or reducing its contrast against the background of atmospheric radiation, it is advisable to use highly sensitive radiometric receivers to solve the detection problem. The optimal method for complexing the results of measurements in multichannel radiometric receivers and identifying different types and classes of UAV against the sky in X, Ka, and W wave ranges under different meteorological conditions has been developed. end-to-end optimization of methods and algorithms will reveal the theoretical foundations of the construction of radiometric systems, ranging from the field of registration of electromagnetic fields to the final stages. In cloudless and clear weather, radiometric measurements in the W range will allow to obtain high-precision estimates of the spatial position of UAVs, in the X range of reliable observations in rain, snow, fog. The use of the Ka-band receiver in the radiometric complex will allow to realize the best sensitivity due to the technical achievements of domestic production in the creation of broadband radiometric receivers in this waveband. Studies of the main parameters of UAV detection have been conducted, namely, the probability of erroneous detection alarm and the probability of correct detection. The obtained theoretical results allow to determine signal processing algorithms and optimal structures of radiometric receivers, to analyze the maximum measurement error and to develop recommendations for experiments. Having received a database of radiometric contrasts, it is possible to further implement technical solutions to increase the capabilities of airspace monitoring for UAV detection. Recommendations are given for the practical choice of the UAV detection threshold to ensure the probability of correct detection is not worse than 0.9 for different angles of observation, atmospheric state, size and material of manufacture.

Keywords: radiometry; UAV detection; optimization of algorithms; probabilistic characteristics.

Руженцев Микола Вікторович – д-р техн. наук, проф., провідний науковий співробітник каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Жила Семен Сергійович – д-р техн. наук, зав. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Павліков Володимир Володимирович – д-р техн. наук, проф., проректор з наукової роботи, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Черепнін Гліб Сергійович – асист. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Попов Анатолій Владиславович – д-р техн. наук, доцент каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Харків, Україна.

Кошарський Володимир Віталійович – асист. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Церне Едуард Олексійович – асист. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Власенко Дмитро Сергійович – асист. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Nikolay Ruzhentsev – Doctor of Technical Science, Professor, Senior Research Officer, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: nvruzh@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3023-4927, Scopus Author ID: 16426533400.

Simeon Zhyla – Doctor of Technical Science, Head of the Department of Aerospace Radio-Electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: simeon.zhyla@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2989-8988, Scopus Author ID: 35106469000,

ResearcherID: A-1907-2019.

Vladimir Pavlikov – Doctor of Technical Science, Professor, Vice Rector for Science, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: v.pavlikov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-6370-1758, Scopus Author ID: 23397933100,

ResearcherID: W-5274-2018.

Glib Cherepnin – Assistant of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: g.cherepnin@khai.edu, ORCID: 0000-0003-1245-0933, Scopus Author ID: 57220835419.

Anatoliy Popov – Doctor of Technical Science, Associate Professor of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: a.v.popov@khai.edu, ORCID: 0000-0003-0715-3870, Scopus Author ID: 57205357625,

ResearcherID: B-5751-2019.

Volodymyr Kosharskyi – Assistant of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: v.kosharsky@khai.edu, ORCID: 0000-0002-8569-2047.

Eduard Tserne – Assistant of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: e.tserne@khai.edu, ORCID: 0000-0003-0709-2238, Scopus Author ID: 57218704755.

Dmytro Vlasenko – Assistant of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: d.vlasenko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-6118-2173, Scopus Author ID: 57220834070.