

RADIO LOCATION AND RADIO NAVIGATION РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОНАВІГАЦІЯ

УДК 621.396.96, 621.397.48:004.932.2

DOI:10.30837/rt.2022.4.211.06

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.О. ПОСОШЕНКО, канд. техн. наук,
М.В. РИБНИКОВ, А.І. КАПУСТА, Є.В. ПЕРШИН*

ОСОБЛИВОСТІ ЗАДАЧ ВИЯВЛЕННЯ І СПОСТЕРЕЖЕННЯ ГРУП БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Вступ

Поява та значне розширення функціональних можливостей безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволило застосовувати їх при вирішенні найрізноманітніших завдань у різних галузях людської діяльності [1 – 4]: при спостереженні за різними об'єктами та територіями, для доставки вантажів, ретрансляції радіосигналів, у сільськогосподарській діяльності, військовій справі тощо. Однак поряд з виконанням корисних функцій БПЛА несуть і значну потенційну загрозу, розширюючи можливості протиправних дій у різних сферах діяльності [5 – 8].

При вирішенні завдань запобігання несанкціонованим діям з використанням БПЛА в даний час найчастіше використовуються радіолокаційні, оптичні, інфрачервоні та акустичні методи та засоби для їх спостереження [9 – 18]. Питанням виявлення БПЛА присвячено значну кількість публікацій у періодичній пресі та матеріалах міжнародних наукових конференцій, і кількість їх стрімко зростає. Як впливає з літератури, до теперішнього часу досягнуто певних наукових і технічних результатів, що забезпечують виявлення та ідентифікацію типів безпілотних літальних апаратів з різним ступенем достовірності в різних умовах застосування. Проте загалом ситуація така, що потреби практики виявлення БПЛА задовольняються нині далеко ще неповною мірою [1 – 3].

Сучасна тенденція підвищення ефективності використання БПЛА полягає у переході від одиночного до групового застосування, що реалізується в рамках реалізації стратегії мережецентричного управління [2 – 4]. Розробка наукових та технічних основ групового застосування є розвитком ідей щодо підвищення ефективності їх використання та досягнення необхідних результатів при малих витратах сил та засобів. Матеріальною основою групового використання БПЛА є вдосконалення технічних характеристик літальних апаратів та розвиток спеціалізованих БПЛА, призначених на вирішення деяких конкретних завдань.

Основні задачі використання угруповань БПЛА:

- підвищення ймовірності виконання поставленого завдання та ефективності використання наявних засобів шляхом багаторазового дублювання та комплексування функціональних можливостей літальних апаратів, а також шляхом спеціалізації окремих апаратів у групі;
- маскування основного напрямку та цілей групи БПЛА, завантаження та дезорганізація систем виявлення, спостереження, управління, цілерозподілу та впливу шляхом відволікання наявних засобів системи виявлення та впливу на безліч цілей, що входять до групи БПЛА;
- перевищення можливостей засобів протиповітряної оборони (ППО) шляхом використання значної кількості об'єктів у групі та виснаження наявних ресурсів;
- формування «віртуальної насиченої повітряної обстановки» з метою імітації масованого застосування засобів нападу;
- зменшення психологічної стійкості противника та його деморалізація.

В даний час розробляються математичні методи побудови груп БПЛА, технології їх застосування при вирішенні різних завдань як в умовах моделювання ситуацій, так і в натурних експериментах і реальних умовах.

Вочевидь, чим складнішим є алгоритм функціонування групи БПЛА, чим більше вона неоднорідна і автономна, тим складніше завдання здатна виконувати. При цьому бортовий комплекс функціонування та управління кожного конкретного БПЛА також повинен відповідати завданням групи.

Як впливає з викладеного, завдання спостереження за групою безпілотних літальних апаратів є значно складнішим порівняно із завданням спостереження одиночних БПЛА [19 – 24].

Основним завданням статті є розгляд особливостей вирішення сукупності завдань, пов'язаних з виявленням та спостереженням групи БПЛА, комплексно інтегрованою системою, що включає різні інформаційні канали.

Просторове ешелонування окремих каналів комплексних систем

Розглянемо інформаційні, енергетичні та пошукові можливості окремих засобів виявлення, що входять до складу інтегрованої системи спостереження БПЛА, з метою побудови алгоритму ефективної спільної обробки вхідних сигналів, що надходять, з урахуванням різних можливостей окремих каналів (за дальністю, розпізнаванням тощо).

Можливості різних радіо-, оптичних та акустичних засобів виявлення та супроводу малих БПЛА наведено в таблиці [2, 26]:

Можливості різних методів із супроводу та спостереження малих БПЛА

Характеристика	Радіо		Оптичні			Акустичні
	Засоби РЛР (РЛС)	Засоби РРТР	Засоби ОЕР у видимому діапазоні	Засоби ОЕР в ІЧ діапазоні	Лазерні засоби	Засоби АР
Виявлення у денний час	+	+	+	–	+	+
Виявлення у нічний час	+	+	–	+	+	+
Виявлення в умовах природних перешкод	+	+	+	+	+	+
Виявлення БПЛА серед природних об'єктів (насамперед – птахів)	–	+	–	–	–	±
Виявлення у складних погодних умовах	±	+	–	–	–	–
Ідентифікація БПЛА	–	+	±	±	–	+
Селекція одиночних та групових цілей	+	+(по різним каналам)	+	+	+	+(для БПЛА різних типів)
Супровід та формування траєкторії	+	+(для багатопозиційної системи)	+	+	+	+(для багатопозиційної системи)
Дальність дії	висока	висока	середня	середня	середня	низька

Радіолокаційна характеристика БПЛА – ефективна площа розсіювання, що визначає потужність розсіяного радіосигналу та можливості його енергетичного виявлення, визначається формою та розмірами об'єкта, матеріалами, з якого він виготовлений, довжиною хвилі та поляризацією радіосигналу. При вирішенні завдань розпізнавання та класифікації БПЛА використовується його сигнатура, що є, по суті, радіолокаційним портретом об'єкта. Радіолокаційна сигнатура (мікродоплерівська сигнатура) БПЛА визначається кінематичними властивостями цілі, а також модуляцією розсіяного сигналу елементами літального апарату, що рухаються, – гвинтами, лопатками турбореактивного двигуна і т.д., фізичними і геометричними особливостями цілі.

Відомо, що зменшення масогабаритних характеристик БПЛА супроводжується суттєвим зменшенням дальності виявлення радіолокаційними засобами. При використанні в конструкції літальних апаратів композитних, радіопрозорих матеріалів процес їх виявлення з використанням радіолокаційних станцій також ускладнюється [27, 28].

Методи та технічні засоби оптико-електронного спостереження, що працюють у видимому діапазоні електромагнітних хвиль, забезпечують непогані характеристики при спостереженні БПЛА, у тому числі малорозмірних та малошвидкісних. У той же час є залежність результатів оптичного спостереження літальних апаратів від стану атмосфери, погодних умов і часу доби.

Результати натурних випробувань [26] показують, що середня дальність оптичного спостереження БПЛА оптико-електронними засобами розвідки при його спостереженні з бокових ракурсів становить 150 – 700 м, а спереду – 100 – 400 м [27].

Технічні засоби оптико-електронного спостереження БПЛА у видимому діапазоні спектра мають недостатні пошукові можливості та потребують зовнішнього цілевказання при початковому виявленні об'єкта.

Використовуються засоби оптико-електронного виявлення БПЛА в ІЧ-діапазоні, які забезпечують найбільшу ефективність у нічний час.

У літературі немає достовірних даних про дальність виявлення БПЛА з використанням тепловізійних камер, однак зазначається, що дальність у цьому випадку не перевищуватиме дальності спостереження БПЛА у видимому діапазоні спектра.

Застосування акустичних засобів спостереження дозволяє виявляти БПЛА, визначати його пеленг, клас літального апарату. Однак є й недоліки акустичних систем, що обмежують можливості їх застосування для спостереження БПЛА [30]: порівняно невеликі відстані виявлення БПЛА – до 0,8 км за висотою та до 1,2 км за дальністю, невисока точність оцінки координат БПЛА, спричинена, насамперед, вітряною рефракцією акустичних хвиль в атмосфері.

Таким чином, найкращі можливості пошуку БПЛА має радіолокаційний метод. Пошукові можливості оптичного, інфрачервоного та акустичного методів значно слабші. Зони виявлення різних методів і засобів, що входять до складу комплексної системи, можуть бути представлені графічно (рис. 1).

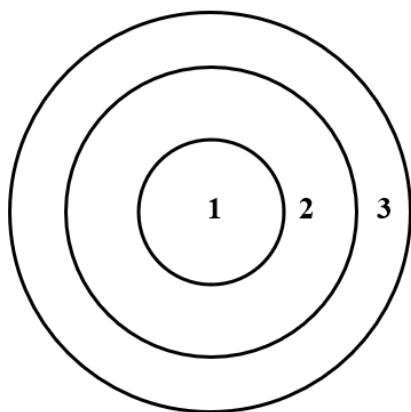


Рис. 1. Графічне подання зон виявлення БПЛА каналами інтегрованої системи: 1 – акустичний канал; 2 – оптичний та інфрачервоний канали; 3 – радіолокаційний канал

Комплексування інформаційних каналів

З позицій статистичної теорії інформаційних радіосистем є два підходи до комплексування засобів спостереження [31 – 33]. З використанням першого підходу завдання комплексування вирішується на етапі первинної обробки інформації (обробки сигналів), під час використання другого – на етапі вторинної обробки інформації (на етапі винесених рішень).

При першому підході до комплексування у межах статистичної теорії радіосистем за результатами спостереження векторного процесу, складовими якого є вхідні сигнали різних каналів, виробляється синтез алгоритмів первинної обробки сигналів у кожному каналі, і навіть відбувається об'єднання інформації, одержуваної кожному з каналів [34, 35]. Такий підхід дозволяє синтезувати оптимальну (відповідно до обраного критерію якості) інтегровану систему обробки інформації (ICOI), яка дозволяє отримати

максимальну кількість корисної інформації з сигналів, що спостерігаються на входах інформаційних каналів.

При другому підході компонентами векторного процесу, що спостерігається, будуть вихідні дані пристроїв первинної обробки сигналів. Вони є рішенням, прийнятим на етапі виявлення, оцінки координат об'єкта тощо. Таким чином, здійснюється синтез інтегрованої системи вторинної обробки інформації (ІСВОІ). Оскільки синтез ІСВОІ здійснюється за наявних обмежень на структуру та параметри пристроїв первинної обробки, які фізично реалізовані, то якість інформації на виході ІСВОІ може виявитися нижчою порівняно з якістю вихідних результатів ІСОІ. Зниження якості інформації обумовлено існуючими обмеженнями на структуру системи.

Незважаючи на деякий можливий програш ІСВОІ порівняно з ІСОІ виконання оптимізації на етапі вторинної обробки (етапі рішень) може виявитися дуже ефективним на практиці, оскільки спирається на використання тих пристроїв первинної обробки сигналів, які є та використовуються для побудови відповідних інформаційних каналів.

Використання математичних методів статистичної теорії радіосистем дозволяє досить гнучко виконувати синтез оптимальних структур комплексних систем виявлення, дозволу та вимірювання параметрів груп БПЛА під час використання різних технічних засобів інформаційних каналів.

Комплексування алгоритмів виявлення

Синтезована оптимальна комплексна система обробки – ІСОІ може виявитися складною, особливо в тому випадку, коли використовуються вимірювачі – рознесені в просторі. В цьому випадку при реалізації ІСОІ необхідно використовувати канали зв'язку з досить високою пропускну здатністю. Система виходить набагато простішою для реалізації на практиці, коли здійснюється комплексування алгоритмів виявлення на етапі вторинної обробки [33].

У цьому випадку у кожному з каналів завдання виявлення груп БПЛА вирішується незалежно один від одного. Подальше комплексування здійснюється внаслідок спільної обробки вихідних даних виявлювачів каналів, тобто їх рішень про наявність чи відсутність об'єктів. На етапі вторинної обробки оптимізація комплексної обробки заснована на використанні критерію максимуму відношення правдоподібності, для формування якого використовуються отримані раніше приватні рішення каналних виявлювачів.

Розглянемо синтез оптимального виявлювача на етапі вторинної обробки сигналів (рішень) n інформаційних каналів комплексної системи виявлення БПЛА.

Виявлювач i -го каналу реалізує певну вирішальну функцію $\mathcal{G}_i(\cdot)$ в результаті аналізу на проміжку часу $[0, T]$ $y_i(t)$ (чи зображення) та виносить рішення $\gamma_i(y_i(t)) = 1$ про наявність корисного сигналу чи рішення $\gamma_i(y_i(t)) = 0$ про його відсутність, з ймовірностями відповідно до правильного виявлення D_i чи хибної тривоги F_i .

На виходах каналних виявлювачів формується випадковий вектор рішень $\gamma_1, \dots, \gamma_n$, компоненти якого набувають значення 0 або 1 з ймовірностями

$$\begin{aligned} P(\gamma_i = 1 | \theta = 0) &= F_i, & P(\gamma_i = 0 | \theta = 0) &= 1 - F_i \\ P(\gamma_i = 1 | \theta = 1) &= D_i, & P(\gamma_i = 0 | \theta = 1) &= 1 - D_i \end{aligned}$$

Відповідно до критерію відношення правдоподібності під час використання вхідних сигналів $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ формується підсумкове рішення R_1 про наявність корисного сигналу або R_0 про його відсутність

$$\Lambda_n = \frac{P(\gamma_1, \dots, \gamma_n | \theta = 1)}{P(\gamma_1, \dots, \gamma_n | \theta = 0)} \diamond H_n. \quad (1)$$

Беручи до уваги статистичну незалежність каналних спостережень γ_i , співвідношення (1) запишемо у вигляді

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i \ln \left[\frac{D_i(1-F_i)}{F_i(1-D_i)} \right] \triangleleft H_n. \quad (2)$$

Отриманий вираз визначає алгоритм оптимального комплексування каналних виявлювачів груп БПЛА на етапі вторинної обробки. Відповідно до (2), обробка полягає у підсумовуванні рішень виявлювачів $\gamma_i = 1$, винесених у каналах, з каналними вагами:

$$\eta_i = \ln [D_i(1-F_i) / F_i(1-D_i)].$$

У тому випадку, якщо значення ймовірностей правильного виявлення та хибної тривоги каналних виявлювачів груп БПЛА дорівнюватимуть – $D_i = D, F_i = F, i = 1, \dots, n$, то вагові коефіцієнти каналів набувають однакових значень $\eta_i = \eta$. Поріг виявлення H_n слід вибирати відповідно до критерію Неймана – Пірсона, виходячи з ймовірності хибної тривоги F_n для комплексної системи у цілому.

При розрахунку характеристик виявлення ІСВОІ (значень D_n и F_n) слід приймати до уваги співвідношення

$$D_n = \sum_{m=h}^l C_l^m D^m (1-D)^{l-m}, \quad F_n \leq \sum_{m=h}^l C_l^m F^m (1-F)^{l-m}. \quad (3)$$

Структурну схему об'єднання рішень каналних виявлювачів у багатоканальній системі виявлення груп БПЛА наведено на рис. 2.

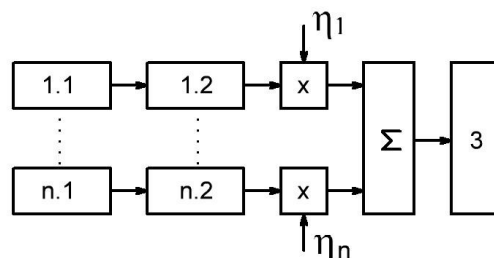


Рис. 2. Структурна схема об'єднання рішень комплексної системи виявлення груп БПЛА:
1.1, n.1 – формувачі сигналів (зображень) інформаційних каналів, 1.2, n.2 – виявлювачі сигналів у каналах,
3 – вирішувальний пристрій

Таким чином, математичні методи статистичної теорії радіосистем дозволяють здійснити оптимальний синтез комплексних систем виявлення та вимірювання параметрів груп БПЛА, оптимізацію алгоритмів обробки багатомодальних сигналів при використанні різних інформаційних каналів та технічних засобів як на етапі первинної, так і на етапі вторинної обробки інформації.

Методи обробки сигналів в інтегрованій системі з використанням цілевказівки

Одне із завдань РЛС в комплексній інтегрованій системі спостереження БПЛА полягає у видачі просторових координат виявлених цілей на певному рубежі для цілевказівки оптико-електронним засобам, що дозволить їм зробити енергетичне виявлення групової цілі без додаткового пошуку (допошуку), або обмежити зону допошуку до прийнятних розмірів. Таким чином відбувається «зав'язування» процесу обробки інформації в комплексній системі за кожною груповою ціллю, виявленою спочатку РЛС, який далі включає все більші ресурси (апаратні, обчислювальні, інтелектуальні). У міру наближення групи БПЛА до об'єкта, що

охороняється, відбувається все більш різноманітна обробка вхідних сигналів і зображень, що надходять на вхід комплексної системи, і витягується з них все більша кількість інформації. У свою чергу групова ціль, у міру наближення до об'єкта, що охороняється, забезпечує можливість для отримання все більшої кількості різноманітної інформації.

Послідовність вирішення сукупності завдань у комплексній інтегрованій системі спостереження БПЛА у міру наближення групової цілі до об'єкта, що охороняється, представляється наступною:

- виявлення групової цілі (енергетичне виявлення);
- оцінка координат групи об'єктів;
- просторове розрізнення та визначення кількості апаратів у групі;
- розпізнавання (визначення типу) кожного окремого апарату;
- оцінка координат кожного літального апарату окремо;
- визначення складу групи (однорідна, неоднорідна);
- визначення спеціалізації групи та розтин характеру її завдань.

Найкращі пошукові можливості та найбільшу дальність має радіолокаційний метод. Саме з використанням методу радіолокації проводиться первинне енергетичне виявлення групи літальних апаратів і оцінка просторових координат групи. Отримані у процесі розв'язання даних завдань результати є основою виконання цілевказання – вказання попередніх просторових координат групи іншим засобам комплексної інтегрованої системи для наступного узгодженого виконання сукупності завдань спостереження.

Обробка та об'єднання багатомодальних сигналів у комплексній системі спостереження за групами БПЛА зменшує наявну невизначеність та сприяє зменшенню похибок, за якими ознаки оцінюються системою [36 – 38]. У цьому випадку використовується присутність в сигналах окремих каналів інформації, що взаємно доповнюється. Наявна надмірність інформації також сприяє підвищенню надійності комплексної системи за наявності аномальних помилок або збоїв у каналах.

Істотним є те, що додаткова інформація з кількох модальностей дозволяє використовувати ознаки сигналів, які неможливо однозначно інтерпретувати за наявності інформації лише від кожної модальності окремо [39, 40]. Наявність можливості проводити паралельну обробку даних у каналах декількох модальностей, що використовуються, дозволяє також більш оперативно отримувати інформацію про групу БПЛА. Рішення (виявлення, ідентифікація) із заданими показниками якості можна отримати і при використанні тільки одного або меншої кількості інформаційних каналів, але це потребує більшого часу для накопичення інформації.

Об'єднання інформації окремих каналів у комплексній системі спостереження груп БПЛА, можливе лише на рівні сигналів, на рівні ознак і рівні рішень [41, 42]. При цьому можуть бути реалізовані такі стратегії об'єднання даних:

- раннього об'єднання, реалізовані лише на рівні сигналів, одержуваних від БПЛА;
- раннього об'єднання, реалізовані лише на рівні ознак опису груп БПЛА;
- пізнього об'єднання, реалізовані на семантичному рівні прийняття рішення;
- гібридного об'єднання.

Використання різних видів стратегій об'єднання даних, зокрема стратегії гібридного об'єднання багатомодальних сигналів наявних каналів інтегрованої системи, дозволяє проводити обробку та об'єднання інформації з урахуванням наявної специфіки завдань, що вирішуються даною системою, та можливостей технічних засобів у кожному каналі.

Значні можливості для об'єднання каналної інформації в інтегрованих системах відкриваються з розвитком нейронних мережових технологій. Об'єднання інформаційних каналів у цьому випадку, зокрема, здійснюється не на рівні ознак, що формуються в окремих концептах, а шляхом об'єднання наявної в каналах інформації в єдине семантичне мультимодальне подання (мультимодальну функцію) [43, 44].

Сигнали, зображення та результати аналізу в каналах, отримані за групою БПЛА, при використанні нейронних мереж та раннього об'єднання зливаються ще до того, як відповідні

канальні уявлення детально вивчені та сформовані відповідні ознаки [45]. У разі пізнього злиття спочатку здійснюється вивчення каналної інформації з допомогою нейронних мереж. У цьому випадку отримані оцінки каналних функцій формують вектор оцінок мультимодальної функції, які є вхідними даними для системи машинного навчання і подальшої інтерпретації отриманої багатоканальної інформації.

При використанні просторового ешелонування каналів і цілевказівок в інтегрованій системі реалізується послідовне накопичення інформації з каналів системи, що послідовно підключаються, проводиться її обробка з використанням нейромережових або традиційних інформаційних технологій інтерпретації та прийняття рішень за групами БПЛА.

Висновки

1. Сучасна тенденція підвищення ефективності застосування БПЛА полягає в переході від одиночного, до їхнього групового застосування, що реалізується в рамках реалізації стратегії мережецентричного управління.

Відповідно до цього при побудові комплексної інтегрованої системи виявлення та спостереження за БПЛА, що включає різні канали, доцільно враховувати особливості функціонування системи, пов'язані з виявленням і спостереженням груп БПЛА.

2. Розглянуто інформаційні, енергетичні та пошукові можливості окремих засобів виявлення, що входять до складу інтегрованої системи спостереження БПЛА, з метою побудови ефективного алгоритму спільної обробки вхідних сигналів, що надходять, з урахуванням різних можливостей окремих каналів (за дальністю, розпізнаванням тощо). Показано, що найкращими пошуковими можливостями і найбільшою дальністю володіє метод радіолокації виявлення груп БПЛА, далі ідуть за спадною оптичний, інфрачервоний і акустичний методи.

Синтезовано оптимальний алгоритм виявлення груп БПЛА у комплексній інтегрованій системі, що поєднує рішення про виявлення, винесені у приватних каналах. Відповідно до синтезованого алгоритму комплексна обробка полягає у підсумовуванні рішень окремих виявлювачів з деякими вагами, що визначаються якістю рішень, прийнятих у каналах. Якість рішень, у свою чергу, залежить від технічних засобів каналів, що використовуються, та умов спостереження.

3. Запропоновано послідовність вирішення сукупності взаємопов'язаних завдань у комплексній інтегрованій системі спостереження БПЛА у міру наближення групової цілі до об'єкта, що охороняється. Послідовність включає наступні операції: виявлення групової цілі (енергетичне виявлення); оцінка координат групи об'єктів; просторовий розрізнення та визначення кількості апаратів у групі; розпізнавання (визначення типу) кожного окремого апарату; оцінка координат кожного літального апарату окремо; визначення складу групи (однорідна, неоднорідна); визначення спеціалізації групи та розтин характеру її завдань.

Список літератури:

1. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. Москва : Стратегические приоритеты, 2016. 676 с.
2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
3. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Koryttsev I.V., Babkin S.I., Zubkov O.V. Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition // Telecommunications and Radio Engineering, 2019. Vol. 78, Iss. 9. P. 771 – 781.
4. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А. и др. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. Вып. 195. С. 235 – 243.
5. Semenets V. V., Kartashov V.M., Leonidov V. I. Registration of refraction Phenomenon in the Problem of acoustic Sounding of Atmosphere in Airport Zone // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 77, №5. P.461 – 468.
6. Kartashov V. M., Oleynikov V. N., Sheyko S. A., Babkin S. I., Koryttsev I. V., Zubkov O. V., Anokhin M. A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol.77, Iss. 10. P. 915 – 924.

7. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А. и др. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2017. Вып. 191. С. 181 – 187.
8. Kartashov V. M., Oleynikov V. N., Zubkov O. V., Sheyko S. A. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), 9-13 September 2019, Odessa, Ukraine. 4 p.
9. Oleksandr Sotnikov, Vladimir Kartashov, Oleksandr Tymochko, Vera Tyrsa, Paolo Mercorelli, Wendy Flores-Fuentes. Methods for Ensuring the Accuracy of Radiometric and Optoelectronic Navigation Systems of Flying Robots in a Developed Infrastructure. Chapter 16 // Machine Vision and Navigation; Editors: Sergiyenko, Oleg, Flores-Fuentes. Wendy, Mercorelli, Paolo. P.537 – 578.
10. Oleynikov V. N., Zubkov O. V., Kartashov V. M., Korytsev I. V., Babkin S. I., Sheiko S. A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic emission // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Iss. 9. P 759 – 770.
11. Kartashov V., Oleynikov V., Korytsev I., Zubkov O., Babkin S., Sheiko S. Processing and Recognition of Small Unmanned Vehicles Sound Signals // 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S and T 2018). Proceedings, 31 January 2019. P. 392 – 396.
12. Kartashov V., Oleynikov V., Korytsev I., Sheyko S., Zubkov O., Babkin S., Selieznov I. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 25-29 Feb. 2020. P. 1-4.
13. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Korytsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, Iss. 9. P. 769 – 780.
14. Oleynikov V., Zubkov O., Kartashov V., Korytsev I., Sheyko S., Babkin S. Experimental estimation of direction finding to unmanned air vehicles algorithms efficiency by their acoustic emission // 2019 International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S and T 2019). Proceeding, 2019. P. 175 – 178.
15. Semenets V.V., Kartashov V.M., Leonidov V.I. Features of Acoustic Noise of Small Unmanned Aerial Vehicles // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, Iss. 11. P. 985 – 995. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i11.80.
16. Тихонов В.А., Карташов В.М., Олейников В.М. и др. Обнаружение-распознавание беспилотных летательных аппаратов с использованием составной модели авторегрессии их акустического излучения // Вісник НТУУ «КПІ». Радиотехніка. Радіоапаратобудування. 2020. №81. С. 38 – 46.
17. Kartashov V. M., Tikhonov V. A., Voronin V. V. Features of Construction and Application of Complex Systems for the Atmosphere Remote Sounding // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 78, Iss.8. P.743-749.
18. Карташов В.М., Олейников В.Н., Колендовская М.М. и др. Комплексирование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2020. Вып. 201. С.120 – 129.
19. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V., Tymoshenko L.P. Complex model of random signal in problems of acoustic sounding of atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. Vol. 75, Iss. 20. P. 1885 – 1892.
20. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision. Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez; 2016, IGI Global, 341 p.
21. Sytnik O., Kartashov V. Methods and Algorithms for Technical Vision in Radar Introspection. Chapter 13 // Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications. IGI Global, 2019. P. 373 – 391.
22. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Б.Л. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. Харьков : Бизнес Информ, 2002. 426 с.
23. Карташов В.М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы; Харьков : ХНУРЭ, 2011. 234 с.
24. Карташов В.М., Олейников В.Н., Воронин В.В. и др. Методы комплексной обработки и интерпретации радиолокационных, акустических, оптических и инфракрасных сигналов беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2020. Вып. 202.
25. Countering rogue drones. FICCI Committee on Drones, EY, 2018. 31 p.
26. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye летателny_e_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 18.10.2020).
27. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс]. 29.01.2015. № 6 (14). URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpkvzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (дата доступа 18.10.2020).
28. Ананенков А. Е., Марин Д. В., Нуждин В. М. и др. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 19.
29. Изделия и комплексы противодействия беспилотным летательным аппаратам [Доклад]. СПб.: АО «НИИ «Вектор», 2018. 51 с.

30. Гейстер С. Р., Джеки А. М. Решение задачи обнаружения маловысотных легкомоторных летательных аппаратов путем использования акустических и сейсмических полей // Наука и военная безопасность. 2008. № 1. С. 42 – 46. URL: <http://militaryarticle.ru/nauka-i-voennayabezopasnost/2008/12105-reshenie-zadachi-obnaruzhenija-malovysotnyh> (дата обращения 18.09.2022).
31. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации : учеб. пособие для вузов. Москва : Радио и связь, 1992. 304 с.
32. Карташов В.М. и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
33. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи : навч. посібник. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
34. Shirman Y.D., Manzhos V.N. The theory and technique of processing radar information against the background of interference. Москва : Radio and communications, 1981. 416 p.
35. Koch W., Koller J., Ulmke M. Ground target tracking and road map extraction // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2006; 61:197–208. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2006.09.013.
36. Hengy S., Laurenzis M., Schertzer S., Hommes A., Kloeppe F., Shoykhetbrod A., Geibig T., Johannes W., Rassy O., Christnacher F. Multimodal UAV detection: Study of various intrusion scenarios // Proceedings of the Electro-Optical Remote Sensing XI International Society for Optics and Photonics. Warsaw, Poland. 11–14 September 2017. p. 104340P.
37. Laurenzis M., Hengy S., Hammer M., Hommes A., Johannes W., Giovanneschi F., Rassy O., Bacher E., Schertzer S., Poyet J.M. An adaptive sensing approach for the detection of small UAV: First investigation of static sensor network and moving sensor platform // Proceedings of the Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXVII International Society for Optics and Photonics; Orlando, FL, USA. 16–19 April 2018. p. 106460S.
38. Park S., Shin S., Kim Y., Matson E.T., Lee K., Kolodzy P.J., Slater J.C., Scherrek M., Sam M., Gallagher J.C., et al. Combination of radar and audio sensors for identification of rotor-type unmanned aerial vehicles // Proceedings of the 2015 IEEE SENSORS. Busan, Korea. 1–4 November 2015. P. 1 – 4.
39. Charvat G.L., Fenn A.J., Perry B.T. The MIT IAP radar course: Build a small radar system capable of sensing range, Doppler, and synthetic aperture (SAR) imaging // Proceedings of the 2012 IEEE Radar Conference. Atlanta, GA, USA. 7–11 May 2012; pp. 0138–0144.
40. Liu H., Wei Z., Chen Y., Pan J., Lin L., Ren Y. Drone detection based on an audio-assisted camera array // Proceedings of the 2017 IEEE Third International Conference on Multimedia Big Data (BigMM); Laguna Hills, CA, USA. 19–21 April 2017; pp. 402–406.
41. Басов О.О., Карпов А.А. Анализ стратегий и методов объединения многомодальной информации // Обработка информации и управления. 2015. №2. С.7-14.
42. Карташов В.М., Куля Д.Н., Пашенко С.В. Алгоритм автосопровождения изменений информационного параметра сигнала радиоакустических систем // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. №4/9(58). С. 57 – 61.
43. Atrey P. K., Hossain M. A., Kankanhalli M. S. Multimoda Fusion for Multimedia Analysis: a Survey // Multimedia Systems. 2010. Vol. 16. Iss. 6. P. 345 – 379.
44. Годунов А. И., Шишков С. В., Бикеев Р. Р. Взаимосвязь машинного (технического) зрения с компьютерным зрением при идентификации малогабаритного беспилотного летательного аппарата // Труды междунар. симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 1. С. 213 – 217.
45. Зайцев А. В., Назарчук И. И., Красавцев О. О., Кичулкин Д. А. Особенности борьбы с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2013. № 5. С. 37 – 43.

Надійшла до редколегії 04.11.2022

Відомості про авторів:

Карташов Володимир Михайлович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна; e-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

Посошенко Віталій Олександрович – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна; email: vitalii.pososhenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0867-9161>

Рибников Микола Володимирович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна, email: mykola.rybnikov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1340-8788>

Капуста Анастасія Ігорівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна, e-mail: anastasiia.kapusta@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2206-1552>

Першин Євгеній Васильович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна, e-mail: yevhenii.pershyn@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4573-9381>