

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

КОМПЛЕКСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ КАНАЛІВ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ПОЗИЦІЙ ТЕОРІЇ СТАТИСТИЧНИХ РІШЕНЬ

Вступ

В даний час безпілотні літальні апарати (БПЛА) забезпечують виконання широкого спектру корисних для людства завдань, але з іншого боку, вони представляють серйозну загрозу в господарській, військовій та інших областях діяльності людини [1]. Труднощі спостереження БПЛА з використанням сучасних технічних засобів, а також їх відносно невисока вартість призводять до розширення сфери протиправних дій з використанням БПЛА [2]. Тому захист різних об'єктів від БПЛА – серйозне науково-технічне завдання сучасності.

Останнім часом застосування БПЛА істотно збагатило та розширило методи вирішення різноманітних господарських та інших завдань, а також міцно увійшло в тактику дій військових підрозділів. Аналіз, виконаний в роботах [1, 2], показує, що найбільш складними щодо виявлення та протидії виявляються малі БПЛА – малогабаритні та нешвидкі. Природно, що літальні апарати цього класу є також найбільш складними цілями для системи виявлення та спостереження в зоні критично важливого об'єкту інфраструктури, що охороняється [3]. Дана обставина обумовлена низкою додаткових чинників, які ускладнюють виконання ефективної протидії відповідних систем по відношенню до малих БПЛА. Це, перш за все [4, 5]:

- використання в конструкції БПЛА пластикових і композитних матеріалів, що слабо відображають і розсіюють електромагнітне випромінювання (ЕМВ);
- використання «рваних» (з періодичним зависанням або різким зниженням швидкості) і високоманеврових (наприклад, «змійка») видів траєкторії переміщення та режимів польоту;
- використання для організації управління БПЛА не виділених командних радіоліній управління (КРУ), побудованих на основі окремих спеціальних засобів зв'язку, а застосування вже існуючої інфраструктури – систем зв'язку мобільних операторів і точок доступу Wi-Fi.

При вирішенні завдань виявлення, розпізнавання та вимірювання просторових координат БПЛА в даний час найбільш часто використовують радіолокаційні, акустичні, оптичні та інфрачервоні методи і засоби [10, 11].

Кожен із зазначених методів має свої переваги та недоліки, характеризується певним діапазоном дальності, але жоден з них не дозволяє вирішити задачу самостійно з достатньою ефективністю [3].

Оскільки області можливостей різних методів не збігаються, то на практиці часто реалізується передумова спільного використання систем різного виду для більш ефективного вирішення досить складного завдання виявлення та розпізнавання БПЛА [6 – 13].

Проаналізуємо відомі в літературі комплексні системи, які використовуються для виявлення БПЛА. В [14] описана мультисенсорна система, призначена для виявлення БПЛА та вимірювання їх просторових координат. Комплексна система включає активний і пасивний радіолокаційні й оптичний канали. Обробка інформації в системі реалізується шляхом зіставлення одержуваних даних – результатів виявлення та вимірювання просторових координат спостережуваних цілей. Спочатку реалізується самостійне виявлення цілей в використовуваних інформаційних каналах, далі виконується зіставлення та поєднання результатів виявлення за належністю до певної цілі. Алгоритм дозволяє виявити

які рішення відповідають корисним цілям, а які представляють собою помилкову тривогу. Визначався також внесок кожного інформаційного каналу в виявлення. У системі реалізований також алгоритм комплексування даних в процесі вимірювання просторових координат об'єктів.

Публікація [15] присвячена дослідженню об'єднання інформації радіолокаційного, акустичного й оптичного інформаційних каналів для виявлення, класифікації спостережуваних БПЛА та вимірювання їх розташування. Інтегрована система здійснює вимір кутових координат – азимута та кута місця з похибкою відповідно 1,5 і 2,5 град.

Інтегрування активного радіолокаційного та пасивного акустичного локаційних каналів дозволило забезпечити зменшення ймовірності помилкових тривог виявлення, а комплексування зображень, що формуються в видимому й інфрачервоному діапазонах (інфрачервоне зображення отримують в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR)), забезпечує більш швидке та достовірне виявлення БПЛА при наявності перешкод і диму на зображеннях інформаційних каналів.

В роботі [16] описано виявлення та спостереження БПЛА в межах міста. Воно реалізовано з використанням статичних і мобільних пунктів, що включають радіолокаційні, акустичні, оптичні технічні засоби, а також лідар. При пеленгації та визначенні місцезнаходження об'єктів багатоканальною акустичною системою застосовувався триангуляційний метод. Комплексна система забезпечує впевнене виявлення БПЛА та визначення їх місця розташування із середньою помилкою в 7 м.

Процес об'єднання інформації різних інформаційних каналів, призначених для виявлення дронів, в ряді робіт реалізований з використанням засобів штучного інтелекту.

В роботі [17] для виявлення БПЛА застосовується радіолокаційна станція, а також сукупність акустичних датчиків. Отримана інформація подається на вхід попередньо навченого алгоритму глибокого навчання, який складається з трьох MLP. В описаній системі виконується виявлення БПЛА з малою вірогідністю хибних тривог, реалізоване в польових умовах.

Недороге технічне устаткування використовувалося в комплексній системі [18], яка включає радіолокаційний, акустичний, видимий і інфрачервоний канали. Для об'єднання одержуваної в зазначених каналах інформації застосовується фільтр Калмана; далі інформація подається на класифікатор найближчого сусіда для винесення рішення по завданню розпізнавання. Система забезпечує спостереження повітряних об'єктів на відстані до 800 м.

В [19] оптичний канал спостереження включає 30 відеокамер, а акустичний канал – три мікрофони. В оптичному й акустичному інформаційних каналах реалізовані класифікатори SVM, навчені відповідно за зображеннями і акустичними сигналами БПЛА. Розглянута комплексна система успішно функціонує при польотах БПЛА різних видів на висотах до 100 м і на відстанях до 200 м.

Кількість публікацій, в яких описуються методи і технічні засоби, спрямовані на виявлення БПЛА на тлі різноманітних перешкод, з кожним роком збільшується. Розглядаються різні методи прийому, обробки сигналів, їх подальшого аналізу, досліджуються комплексні системи, засновані на використанні різних мультисенсорних датчиків [5]. Але при цьому інтегральна ефективність комплексних систем виявлення БПЛА на практиці є недостатньою. Проблема ефективного спостереження та протидії БПЛА (особливо малим БПЛА), є складною, багатогранною, до теперішнього часу не має задовільного рішення і вимагає комплексного, системного підходу при її вирішенні [2].

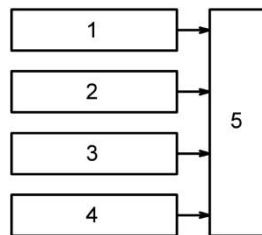
Дана стаття присвячена розгляду методів синтезу нових, більш ефективних алгоритмів комплексування радіолокаційних, акустичних, оптичних і інфрачервоних інформаційних каналів інтегральних систем виявлення та розпізнавання БПЛА, які виконуються з позицій статистичної теорії оптимізації радіосистем.

Постановка завдання комплексної обробки інформації при вимірюванні координат і параметрів руху БПЛА

Внаслідок статистичного характеру перешкод і збурюючих впливів, що надходять на вхід інформаційної системи, статистичного характеру похибок вимірювання координат об'єктів і помилкових рішень, прийнятих при виявленні і розпізнаванні цілей, в процесі комплексування інформаційних каналів систем спостереження БПЛА доцільно використовувати методи статистичної теорії оптимізації радіосистем і теорії статистичних рішень [20 – 23].

Припустимо, що комплексна система спостереження БПЛА включає l інформаційних каналів (наприклад, активний і пасивний радіолокаційні, оптичний, акустичний канали), кожен з яких містить на виході вимірювач. При цьому вимірювальний пристрій i -го каналу оцінює якийсь інформативний параметр $\lambda_{it}, i = 1, \dots, l$, або деяку функцію від нього (просторову координату або параметр руху БПЛА). Вимірювані параметри в сукупності утворюють векторний l -мірний випадковий процес $\lambda_t = (\lambda_{1t}, \dots, \lambda_{lt}), t \geq 0$. На виході вимірників каналів отримуємо дані в вигляді оцінок інформативних параметрів і похибок їх вимірювань. Сукупності оцінок розглядаються також як реалізації деякого векторного l -мірного випадкового процесу $y_t = (y_{1t}, \dots, y_{lt})$.

Узагальнена структурна схема системи комплексної обробки сигналів інформаційних каналів, які використовуються для спостереження БПЛА, наведена на рис.1.



1 – активний і пасивний радіолокаційні канали, 2 – акустичний канал, 3 – оптичний канал, 4 – інфрачервоний канал, 5 – пристрій обробки і прийняття рішення

Рис. 1. Узагальнена структурна схема системи комплексної обробки сигналів інформаційних каналів, які використовуються для спостереження БПЛА

Основним завданням даної комплексної системи спостереження БПЛА є формування оптимальної (в байєсовому сенсі) оцінки $v^*_{t\tau} = (v^*_{1t\tau}, \dots, v^*_{lt\tau})$ векторного параметру λ_t в деякий заданий момент часу $\tau > 0$ за результатами спостереження реалізацій сигналів інформаційних каналів y_t протягом відрізка часу $[0, t]$.

Між поточним моментом часу τ і тривалістю часу спостереження t можливі такі співвідношення: $\tau < t$, $\tau = t$, $\tau > t$. Вважаємо, що завдання оптимального комплексування l вимірників розглядається на етапі оцінювання, коли виконується умова $\tau = t$.

У статистичній теорії радіосистем є два основні підходи до комплексування використовуваних інформаційних засобів [21, 23]. У першому випадку завдання комплексування вирішується на етапі первинної обробки інформації, у другому – на етапі вторинної обробки одержуваної інформації (на етапі об'єднання рішень). Вторинною в теорії радіосистем називають обробку, яка здійснюється на основі результатів сформованих оцінок і рішень після виконання необхідної обробки вхідних сигналів, що поступають (сигнали фільтрації, посилення, детектування). На етапі вторинної обробки виконуються завдання зав'язування та виявлення траєкторій літальних апаратів, їх згладжування і т.д. В процесі третинної обробки за допомогою математичних методів відбуваються доповнення й уточнення отриманої раніше інформації, забезпечується підвищення стійкості супроводу

цілей і повноти даних, а також здійснюється оптимізація функціонування угруповання радіолокаційних та інших технічних засобів з метою отримання максимальної якості радіолокаційної інформації при мінімальних витратах ресурсів, з урахуванням особливостей обстановки, що спостерігається, і наявних коштів [22, 23].

Зауважимо, що при постановці і рішенні в загальному вигляді завдання оптимізації не має принципового значення як комплексуються вимірювачі інтегральної системи: на етапі первинної чи вторинної обробки. У першому випадку під вхідним коливанням y_t розуміється векторний процес, який спостерігається на входах вимірювальних пристроїв інформаційних каналів, у другому випадку – це випадковий процес на виходах вимірників каналів. Специфіка й особливості вирішення конкретного завдання комплексування будуть проявлятися при виборі адекватних математичних моделей вхідного процесу y_t . У разі комплексування на етапі первинної обробки вхідний процес y_t системи містить інформаційні сигнали й інформативні параметри λ_t , що приймаються на тлі випадкових шумів і перешкод; на етапі вторинної обробки роль адитивних шумів виконують похибки сформованих в каналах результатів вимірювань. Ефективність комплексування й оптимізації в значній мірі буде визначатися ступенем адекватності обраної математичної моделі y_t реальному векторному вхідному процесу, що спостерігається.

Функцію векторного оптимального оператора системи, або векторну вирішальну функцію, з використанням якої за вхідними реалізаціями $y_0^t = \{\gamma_{1v}, \dots, \gamma_{lv}, 0 \leq v \leq t\}$ векторного процесу на часовому відрізку $[0, t]$, формується в момент часу $\tau > 0$ оцінка $v_{t\tau} = f_\tau(y_0^t)$ параметру λ_τ , тобто $v_{it\tau} = f_{i\tau}(y_0^t)$, $i = 1, \dots, l$, уявімо вектор-функцією $f_\tau = (f_{1\tau}, \dots, f_{l\tau})$. Якщо конкретизувати функцію втрат $c(\lambda, d)$, де λ і d – l -мірні вектори, то в результаті мінімізації апостеріорного ризику

$$\min_{\delta_\tau} \mathbf{M}\{c[\lambda_\tau, f_\tau(y_0^t)]|y_0^t\} = \mathbf{M}\{c[\lambda_\tau, f_\tau^*(y_0^t)]|y_0^t\} \quad (1)$$

може бути сформовано байєсове рішення $v_{t\tau}^* = f_\tau^*(y_0^t)$ – оптимальна відповідно до заданого критерію оцінка шуканого параметра λ_τ . Вираз для отримання в результаті виконаних операцій шуканої оцінки визначає, в кінцевому підсумку, загальні алгоритми оптимального комплексування вимірників інформаційних каналів.

У разі $\tau = t$ маємо поточну фільтраційну оцінку v_{tt}^* , вираз для отримання якої визначає оптимальну структуру фільтраційної системи комплексування інформаційних каналів (ФСКІК). При $\tau \neq t$ одержувані оцінки $v_{t\tau}^*$ визначають структури інтерполяційної ($\tau < t$) та екстраполяційної ($\tau > t$) систем оптимального комплексування інформаційних каналів.

Ефективність функціонування оптимальної комплексної системи визначається отриманим байєсовим середнім ризиком:

$$\bar{r}_{t\tau}^* = \mathbf{M}\mathbf{M}\{c[\lambda_\tau, f_\tau^*(y_0^t)]|y_0^t\} = \mathbf{M}c[\lambda_\tau, f_\tau^*(y_0^t)].$$

У разі використання квадратичної функції втрат (функції штрафів) можна записати

$$c(\lambda, v) = \sum_{i=1}^l (\lambda_i - v_i)^2, \quad (2)$$

а оптимальні відповідно до заданого критерію оцінки векторного параметра будуть визначатися співвідношенням

$$v_{t\tau}^* = \mathbf{M}(\lambda_\tau | y_0^t), \tau > t, \tau < t, \quad (3)$$

Якщо визначити апостеріорні щільності ймовірностей оцінюваних інформаційних параметрів $\lambda_{i\tau}$, $i = 1, \dots, l$ у вигляді

$$w(\lambda_{i\tau} | y_0^t) \equiv p_{t\tau}(\lambda_i), \tau > t, \tau < t, i = 1, \dots, l, \quad (4)$$

то з використанням (2) можна записати вираз для формування оцінки

$$v_{it\tau}^* = f_{i\tau}^*(y_0^t) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda_i p_{t\tau}(\lambda_i) d\lambda_i, \tau > t, \tau < t, i = 1, \dots, l. \quad (5)$$

Для квадратичної функції втрат (2) скалярний, інтегральний баєсовий ризик буде визначатися співвідношенням

$$\bar{r}_{t\tau}^* = \sum_{i=1}^l \mathbf{M}[\lambda_{i\tau} - f_{i\tau}^*(y_0^t)]^2, \tau > t, \tau < t$$

у вигляді суми середніх квадратів помилок оцінювання складових векторного параметра $\lambda_{i\tau}$. Середньоквадратичні похибки оцінювання кожного скалярного параметра

$$\sigma_{it\tau} = \sqrt{\mathbf{M}[\lambda_{i\tau} - f_{i\tau}^*(y_0^t)]^2}, \tau > t, \tau < t, i = 1, \dots, l \quad (6)$$

визначають найменші помилки вимірювання, одержувані в разі оптимального комплексування інформаційних каналів. Порівнюючи похибки $\sigma_{it\tau}$ в (6), отримані для $\tau = t$, із середньоквадратичними помилками сформованих раніше оцінок y_{it}

$$\sigma_{it} = \sqrt{\mathbf{M}(\lambda_{it} - y_{it})^2}, i = 1, \dots, l, \quad (7)$$

можна зробити висновки про якість функціонування оптимальної комплексної системи (про якість комплексування інформації).

Ефективність комплексної обробки інформації може бути підвищена, якщо в основу функціонування системи покласти використання інтерполяційної оцінки $v_{t\tau}^*$, $\tau < t$. Пояснюється це тим, що формування додаткової реалізації вхідного сигналу не може погіршити якості оптимальної оцінки, а може тільки поліпшити її, відповідно для середньоквадратичних похибок інтерполяції $\sigma_{it\tau}$, $\tau < t$, і фільтрації $\sigma_{it\tau}$ справедлива нерівність $\sigma_{it\tau} \leq \sigma_{it\tau}$, $\tau < t$, $i = 1, \dots, l$.

Ефективність функціонування даної системи комплексування дозволяє пояснити два крайні характерні випадки. В першому випадку вимірювані параметри $\lambda_{i\tau}$, $i = 1, \dots, l$, вважаємо статистично незалежними, як і супроводжуючі їх адитивні перешкоди, які спостерігаються в реалізаціях $\gamma_{iv}^t = \{\gamma_{iv}^t, 0 \leq v \leq t\}$, $i = 1, \dots, l$, що спостерігаються в реалізаціях, які також вважаємо статистично незалежними по i . Для характерної ситуації, що розглядається, можна показати з використанням теореми Байеса, що для апостеріорного розподілів (3) мають місце співвідношення [12]

$$w(\lambda_{i\tau} | y_0^t) = w(\lambda_{i\tau} | y_{i0}^t) \equiv p_{it\tau}(\lambda_i), \tau > t, \tau < t, i = 1, \dots, l.$$

Відповідно для оцінок (5) можна записати

$$v_{it\tau}^* = f_{i\tau}^*(y_{i0}^t) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda_i p_{it\tau}(\lambda_i) d\lambda_i, \tau > t, \tau < t, i = 1, \dots, l.$$

В даному випадку оптимальна система комплексування розпадається на l незв'язаних між собою окремих вимірників інформаційних каналів.

В іншому характерному випадку, при

$$\lambda_{it} \equiv \lambda_t, i = 1, \dots, l, \quad (8)$$

у всіх інформаційних каналах оцінюється один і той же скалярний параметр λ_t . Внаслідок структурної та інформаційної надмірності результатів вимірювань середньоквадратична похибка σ_{tt} оцінювання параметра λ_t з використанням комплексної оптимальної системи фільтраційного типу буде задовольняти виразу

$$\sigma_{tt} \leq \sigma_{jt} = \min_{i \in \{1, \dots, l\}} \{\sigma_{it}\}, t > 0, \quad (9)$$

в якому середньоквадратичні помилки окремих вимірників σ_{it} визначаються співвідношенням (7). Рівність в співвідношенні (9) матиме місце в тому випадку, коли шуми

вимірювань для всіх каналів комплексної системи будуть однаковими, а кожен j -й вимірвач комплексної системи формує оптимальну фільтраційну оцінку параметра λ_t .

Моделі вхідних сигналів

Для більш детального розгляду загальних алгоритмів оптимального комплексування інформаційних каналів систем спостереження БПЛА необхідно визначити моделі спостереження, тобто моделі вхідних процесів для використовуваних каналних вимірників $\gamma_{1t}, \dots, \gamma_{lt}$ інформативних параметрів $\lambda_{1t}, \dots, \lambda_{lt}$, а також для похибок одержуваних на їх виходах результатів вимірювань, які виконують роль випадкових адитивних завадових коливань.

Зауважимо, що в загальному випадку при синтезі оптимальних пристроїв початковими є два положення: чітке математичне формулювання завдання, що враховує всі апріорні відомості (вибір моделей сигналів і перешкод); вибір математично продуктивного критерію оптимальності відповідно до фізичного змісту та цільовим змістом практичного завдання, що розв'язується [21].

Сформуємо в досить загальному вигляді рівняння спостереження для вхідних процесів інформаційних каналів

$$\gamma_{it} = F_i(\lambda_{it}, \eta_{it}, t) + \xi_{it}, \quad i = 1, \dots, l, \quad (10)$$

де η_{it}, ξ_{it} – перешкоджаючі коливання, що маскують вхідні сигнали та спотворюють інформативні параметри λ_{it} , що треба знайти. Функції $F_i (i = 1, \dots, l)$ визначають характер взаємодії перешкоди η_{it} і спостережуваного векторного сигналу, що містить параметр λ_{it} , який може бути адитивним або мультиплікативним. Функції $F_i (i = 1, \dots, l)$ будемо вважати відомими. Адитивні перешкоди ξ_{it} та η_{it} в (10) в загальному випадку мають різні статистичні характеристики. Якщо перешкоди η_{it} мають адитивний характер, то функції F_i будуть мати такий вигляд

$$F_i(\lambda_{it}, \eta_{it}, t) = s_i(\lambda_{it}, t) + \eta_{it}, \quad i = 1, \dots, l,$$

де $s_i (i = 1, \dots, l)$ – детерміновані функції. Якщо $s_i(\lambda_{it}, t) \equiv \lambda_{it}, \eta_{it} \equiv 0, i = 1, \dots, l$, то отримуємо досить просту модель вхідних інформаційних процесів, $\gamma_{it} = \lambda_{it} + \xi_{it}, i = 1, \dots, l$, яка часто застосовується на практиці. Має місце також така модель

$$\gamma_{it} = \begin{cases} s(\lambda_t, t) + \xi_{it}, & i = 1, \dots, m, \\ \lambda_t + \xi_{it}, & i = m + 1, \dots, l, \end{cases} \quad (11)$$

яка є окремим випадком розглянутої моделі (10). Модель (11) застосовується в тому випадку, коли λ_t – скалярний параметр, при цьому в частині інформаційних каналів виконується фільтрація сигналу $s(\lambda_t, t)$, а в іншій частині каналів здійснюється оцінювання його параметра.

Залежно від використовуваних технічних засобів в інформаційних каналах і типів вимірників (цифрові, аналогові) вихідні дані каналів, що формуються, надходять безперервно або дискретно в часі та мають безперервну або дискретну безліч своїх значень. У цьому випадку доцільно використовувати в якості адекватних математичних моделей інформативних параметрів і маючих місце перешкод марківські випадкові процеси. Вони адекватно описують широкий клас реальних процесів і сигналів, а також досить зручні в процесі проведення теоретичних математичних (аналітичних) досліджень. У процесі синтезу оптимальних комплексних фільтраційних, інтерполяційних і екстраполяційних систем виміру параметрів на практиці в різних областях широко застосовуються добре розроблені математичні методи теорії оцінювання векторних марківських процесів [12, 13, 23].

Співвідношення для синтезу та аналізу систем

На практиці досить широко поширений випадок, коли компоненти спостережуваного векторного процесу змінюються в часі безперервно і визначаються співвідношенням (9) при $t \geq 0$. Інформативні параметри $\lambda_{1t}, \dots, \lambda_{lt}$ вхідних коливань і супроводжуючі їх перешкоди $\eta_{1t}, \dots, \eta_{lt}$ (перешкоди з метою спрощення запису позначимо як $\eta_{it} \equiv \lambda_{l+i,t}$, $i = 1, \dots, l$) утворюють $2l$ -мірний безперервний марківський процес $(\lambda_{1t}, \dots, \lambda_{2lt})$, $t \geq 0$, який характеризується в цьому випадку коефіцієнтами переносу $a_i(\lambda, t)$ і дифузії $b_{ij}(\lambda, t)$, $i, j = 1, \dots, 2l$; λ – $2l$ -мірний вектор. Адитивні перешкоди ξ_{it} досить часто на практиці можуть бути апроксимовані білими гаусівськими шумами, для яких справедливо співвідношення

$$\mathbf{M}\xi_{it}\xi_{jt+\tau} = \begin{cases} \frac{N_{0i}}{2} f(\tau), & i = j \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (12)$$

Достатньою статистикою в розглянутих задачах синтезу оптимальних структур комплексних систем спостереження БПЛА може виступати апостеріорний розподіл ймовірностей спостережуваного інформаційного процесу. З використанням [21], можуть бути отримані вирази для апостеріорного розподілу параметрів

$$p_t(\lambda) = \omega(\lambda_{1t}, \dots, \lambda_{2lt} | \gamma_{10}^t, \dots, \gamma_{l0}^t),$$

які представляються в симетризованій формі запису

$$p_i(\lambda) = [\zeta - \bar{\zeta}(p_t(\lambda))] p_t(\lambda), \quad (13)$$

де

$$\zeta = - \sum_{i=1}^{2l} \frac{\partial}{\partial \lambda_i} a_i(\lambda, t) + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{2l} \frac{\partial^2}{\partial \lambda_i \partial \lambda_j} b_{ij}(\lambda, t) + \sum_{i=1}^l \frac{2}{N_{0i}} F_i(\lambda_i, \lambda_{l+i}, t) \left[y_{it} - \frac{1}{2} F_i(\lambda_i, \lambda_{l+i}, t) \right];$$

$$\bar{\zeta}(p_t(\lambda)) = \sum_{i=1}^l \frac{2}{N_{0i}} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} F_i(\lambda_i, \lambda_{l+i}, t) \left[y_{it} - \frac{1}{2} F_i(\lambda_i, \lambda_{l+i}, t) \right] p_t(\lambda) d\lambda_1 \dots d\lambda_{2l}.$$

Вирази, що визначають формування оптимальних оцінок v_{itt}^* інформативних параметрів λ_{it} , $i = 1, \dots, l$, а також маючих місце перешкод λ_{it} , $i = l + 1, \dots, 2l$, при використуванні квадратичних функціях втрат мають вигляд

$$v_{itt}^* = \int_{\Theta} \lambda_i p_t(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, \dots, 2l. \quad (14)$$

Алгоритм формування розглянутих оцінок визначає структуру оптимальної ФСКІК і містить послідовність операцій, які в ній реалізуються.

На практиці досить широко використовується метод гаусівського наближення, що дозволяє конкретизувати вираз (13). В цьому випадку апостеріорна щільність ймовірностей інформативного параметра апроксимується багатовимірним гаусівським законом

$$p_t(\lambda) = (2\pi)^{-l} \det^{-\frac{1}{2}} \|K_{ijt}\| \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{2l} h_{ijt} (\lambda_i - m_{it}) (\lambda_j - m_{jt}) \right\}, \quad (15)$$

$$\text{де } \|h_{ijt}\| = \|K_{ijt}\|^{-1}.$$

Шляхом підстановки (15) в (13), можна отримати рівняння, що описують процедури багатовимірної нелінійної фільтрації в гаусівському наближенні [12]:

$$m_{it} = a_{it} + \sum_{n=1}^l \frac{2}{N_{0n}} (y_{nt} - F_{nt}) \sum_{p=1}^{2l} K_{pi} \frac{\partial F_{nt}}{\partial \lambda_p}; \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
K_{ijt} &= b_{ijt} + \sum_{n=1}^{2l} K_{njt} \frac{\partial a_{it}}{\partial \lambda_n} + \sum_{n=1}^{2l} K_{nit} \frac{\partial a_{jt}}{\partial \lambda_n} + \\
&+ \sum_{q=1}^l \frac{2}{N_{0q}} (\gamma_{qt} - F_{qt}) \sum_{n,p=1}^{2l} K_{njt} K_{pit} \frac{\partial^2 F_{qt}}{\partial \lambda_n \partial \lambda_p} - \\
&- \sum_{q=1}^l \frac{2}{N_{0q}} \sum_{n,p=1}^{2l} K_{njt} K_{pit} \frac{\partial F_{qt}}{\partial \lambda_n} \frac{\partial F_{qt}}{\partial \lambda_p},
\end{aligned} \tag{17}$$

де

$$\begin{aligned}
\alpha_{it} &= \alpha_i(\lambda, t) | \lambda = m_t, \quad m_t = m_{1t}, \dots, m_{2lt}; \\
b_{ijt} &= b_{ij}(\lambda, t) | \lambda = m_t, \quad F_{nt} = F_n(m_{nt}, m_{l+n,t}, t); \\
\frac{\partial^2 F_{qt}}{\partial \lambda_n \partial \lambda_p} &= \frac{\partial^2 F_q(\lambda_q, \lambda_{l+q}, t)}{\partial \lambda_n \partial \lambda_p} \Big|_{\lambda_q = m_{qt}} \\
&\quad \Big|_{\lambda_{l+q} = m_{l+q}, t}.
\end{aligned}$$

Апостеріорні середні m_{it} , одержувані з використанням виразів (16), (17), за умови досить великого співвідношення корисний сигнал-перешкода, що відповідає режиму роботи зі значною точністю, можна вважати приблизно рівними оптимальним оцінками (14) спостережуваних інформативних процесів: $m_{it} \approx v_{it}^*$, $i = 1, \dots, 2l$.

Вирази (16), (17) визначають структуру нелінійної системи ФСКІК, яка є квазіоптимальною. Якщо функції F_i в (10) є лінійними функціями марківських гаусівських процесів λ_{it}, η_{it} , $i = 1, \dots, l$, то вирази (16), (17) визначають точне рішення задачі формування оцінок і описують оптимальну ФСКІК, в основі якої лежить використання багатовимірної лінійної фільтра Калмана.

Якість функціонування синтезованої інтегральної системи інформаційних каналів характеризується апостеріорними дисперсіями K_{itt} , які при використанні гаусівського наближення описуються виразами (16), (15). Середньоквадратичні похибки оцінювання інформативних параметрів

$$\sigma_{itt} = \sqrt{\mathbf{M}[\lambda_{it} - f_{it}^*(y_0^t)]^2} \approx \sqrt{\mathbf{M}K_{itt}}, \quad i = 1, \dots, l. \tag{18}$$

У приватному лінійному випадку, коли комплексна система будується на основі фільтра Калмана, апостеріорні дисперсії записуються у вигляді

$$\sigma_{itt} = \sqrt{K_{itt}}, \quad i = 1, \dots, l. \tag{19}$$

Співвідношення для комплексування виявлювачів

Інформаційна і структурна види надмірності сигналів, які надходять в багатоканальних системах, дозволяють при використанні комплексування підвищити не тільки точність результатів вимірювань, але й якісні показники виявлення спостережуваних об'єктів. Розглянемо загальну задачу оптимального комплексування виявлювачів БПЛА інформаційних каналів.

Вважаючи, що маємо l каналних виявлювачів, розглянемо задачу їх оптимального комплексування в інтегрованій системі на етапах первинної та вторинної обробки інформації.

При розгляді комплексування окремих виявлювачів на етапі первинної обробки необхідно математично описати спостережуваний процес γ_{it} на вході кожного з каналів ($i = 1, \dots, l$). Модель спостереження в цьому випадку має вигляд

$$\gamma_{it} = \theta s_{it} + \eta_{it} + \xi_{it}; \quad \theta = 0, 1; \quad 0 \leq t \leq T; \quad i = 1, \dots, l, \tag{20}$$

де відповідно $s_{it}, \eta_{it}, \xi_{it}$ – корисні сигнали, зовнішні перешкоджаючі коливання і власні внутрішні шуми каналних виявлювачів. Вхідні сигнали можуть бути як однаковими: $s_{it} = s_t, i = 1, \dots, l$, так і різними. Навіть в тому випадку, якщо корисні сигнали надходять

в канали від одного сенсора, то на входах схем виявлення вони можуть мати різні значення параметрів, зокрема, як, наприклад, значення часу запізнювання в багатопозиційних системах. Крім того, сигнали в ряді каналів можуть бути відсутніми: $s_{it} \equiv 0, 0 \leq t \leq T$, тобто деякі канали призначені для компенсації перешкод і є «перешкоджаючими».

Якщо щільності розподілу ймовірностей перешкод, шумів і сигналів в (22) апріорі відомі, то розглянута задача виявлення зводиться до формування відношення правдоподібності. Якщо корисні сигнали s_{it} і перешкоди η_{it} стохастичні, з відомими розподілами ймовірностей, а шуми ξ_{it} є білими гаусівськими, то логарифм відношення правдоподібності записується у вигляді [21]

$$z = \sum_{i=1}^l \frac{1}{N_{oi}} \left[2 \int_0^T (\hat{s}_{it} + \hat{\eta}_{it1} + \hat{\eta}_{it0})(\gamma_{it} - \hat{\eta}_{it0}) dt - \int_0^T (\hat{s}_{it} + \hat{\eta}_{it1} - \hat{\eta}_{it0})^2 dt \right] \quad (21)$$

Перший член у виразі (23) – інтеграл Іто, а

$$\hat{s}_{it} = \mathbf{M}[s_{it}|y_0^T, \theta = 1]; \quad \hat{\eta}_{it\theta} = \mathbf{M}[\eta_{it}|y_0^T, \theta], \quad \theta = 0, 1,$$

являють собою апостеріорні математичні очікування. Вони є баєсівськими оцінками сигналів і перешкод.

Отримані вирази визначають рішення загальної задачі синтезу оптимальної системи комплексування виявлювачів на етапі первинної обробки інформації. Аналіз якості роботи такої системи полягає в розрахунку ймовірностей правильного виявлення та помилкової тривоги.

Висновки

1. Проаналізовано відомі в літературі комплексні системи спостереження БПЛА, реалізовані у вигляді сукупності взаємопов'язаних між собою інформаційних каналів, системні і технічні рішення, що використовуються в них, апаратно-програмні засоби, методи обробки многомодальних інформаційних сигналів і зображень. Зроблено висновок, що відомі системи виявлення БПЛА і існуючі методи обробки інформації не дозволяють вирішувати актуальні для практики завдання, які полягають, наприклад, у захисті життєво важливих елементів інфраструктури з необхідною ефективністю, тож це потребує їх подальшого вдосконалення.

Завдання спостереження й ефективної протидії БПЛА (особливо малим БПЛА) до теперішнього часу не має задовільного рішення, є складною, багатогранною, та вимагає комплексного, системного підходу з використанням сучасних наукових методів при її вирішенні.

2. Статистична теорія оптимізації радіоелектронних систем, заснована на використанні марківських випадкових процесів, в гаусівському наближенні, дозволяє здійснювати оптимізацію структур обробки сигналів інтегрованих комплексних систем виявлення та спостереження безпілотних літальних апаратів, що включають інформаційні канали, побудовані з використанням різних фізичних сенсорів.

Використання теорії радіосистем дозволяє синтезувати алгоритми оптимальної обробки каналних інформаційних сигналів при вирішенні задач виявлення, вимірювання просторових координат, розпізнавання типів БПЛА. За допомогою теорії здійснюється оптимальний синтез пристроїв первинної обробки сигналів в кожному каналі, а також об'єднання інформації каналних сигналів. Такий підхід дозволяє синтезувати оптимальну (відповідно до обраного критерію якості) комплексну систему обробки інформації, що забезпечує отримання максимальної кількості інформації з векторного процесу, що спостерігається на входах інформаційних каналів.

Показана можливість побудови оптимального детектора БПЛА з використанням пізньої стратегії об'єднання інформації на рівні рішень, прийнятих в окремих каналах системи (на етапі вторинної обробки інформації).

3. Використання запропонованих підходів і методів комплексної обробки й об'єднання багатомодальної інформації в інтегрованих системах спостереження БПЛА забезпечить гнучке поєднання різної інформації, одержуваної по використовуваних каналах, з урахуванням можливостей наявних технічних засобів і специфіки вирішуваних завдань.

4. Актуальні завдання даного напрямку – синтез оптимальних структур і алгоритмів комплексної обробки багатомодальних сигналів із використанням математичних засобів оптимізації теорії радіосистем, евристичний синтез комплексних інтегрованих систем обробки, а також оцінка ефективності різних варіантів побудови систем і порівняння їх показників на практиці.

Список літератури:

1. Кошкин Р. Беспилотные авиационные системы. Москва : Стратегические приоритеты, 2016.
2. Макаренко С., Тимошенко А., Васильченко А. Противодействие 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. Oleynikov V., Zubkov O., Kartashov V., Koryttsev I., Sheiko S. and Babkin S. Experimental Estimation of Direction Finding to Unmanned Air Vehicles Algorithms Efficiency by Their Acoustic Emission // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), 2019, pp. 175-178, doi: 10.1109/PICST47496.2019.9061337.
4. Sergiyenko O., Rodríguez-Quiñonez J. Developing and applying optoelectronics in machine vision // IGI Global, 2016.
5. Rivas-Lopez M., Sergiyenko O., Flores-Fuentes W. and Rodríguez-Quiñonez J. Optoelectronics in machine vision-based theories and applications // Hershey, PA: Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global), 2019. pp. 373-391.
6. Murrieta-Rico F. et al. Pulse width influence in fast frequency measurements using rational approximations // Measurement, vol. 86. pp. 67-78, 2016, doi: 10.1016/j.measurement. 2016.02.032.
7. Avalos-Gonzalez D. et al. Constraints definition and application optimization based on geometric analysis of the frequency measurement method by pulse coincidence // Measurement. 2018. Vol. 126. P. 184-193, 2018, doi: 10.1016/j.measurement. 2018. 05. 025.
8. Ivanov M. et al. Individual Scans Fusion in Virtual Knowledge Base for Navigation of Mobile Robotic Group with 3D TVS // IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018. P. 3187-3192, doi: 10.1109/IECON.2018.8591442.
9. Avalos-Gonzalez D. et al. Application of Fast Frequency Shift Measurement Method for INS in Navigation of Drones // IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2018, pp. 3159-3164, doi: 10.1109/IECON.2018.8591377.
10. Карташов В., Куля Д., Кушнир М., Толстых Ю. Выбор модели изменения скорости звука для оптимального линейного фильтра систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. 173. С. 63-78. Режим доступа: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/1130>.
11. . Карташов В., Куля Д., Пащенко С. Алгоритм автоматического слежения за изменением параметра сигнала радиоакустических информационных систем // Восточно-Европейский журнал корпоративных технологий. 2012. Вып. 4, №. 9(58), pp. 57-61. Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/5747>
12. Кащеев Б., Прошкин Е., Лагутин М. Дистанционные методы и средства изучения процессов в атмосфере Земли. Харьков : Бизнес Информ, 2002.
13. Сосулин Ю.В. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. Москва : Радио и связь, 1992.
14. W. Koch, J. Koller and M. Ulmke. Ground target tracking and road map extraction // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 61, no. 3-4, pp. 197-208, 2006, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2006.09.013.
15. F. Kloeppel et al. Multimodal UAV detection: study of various intrusion scenarios // Electro-Optical Remote Sensing XI, 2017, doi: 10.1117/12.2278212.
16. F. Giovanneschi et al. An adaptive sensing approach for the detection of small UAV: first investigation of static sensor network and moving sensor platform // Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXVII, 2018, doi: 10.1117/12.2304758.
17. S. Park et al. Combination of radar and audio sensors for identification of rotor-type Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // 2015 IEEE SENSORS, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSENS.2015.7370533.
18. G. L. Charvat, A. J. Fenn and B. T. Perry. The MIT IAP radar course: Build a small radar system capable of sensing range, Doppler, and synthetic aperture (SAR) imaging // 2012 IEEE Radar Conference, 2012, pp. 0138-0144, doi: 10.1109/RADAR.2012.6212126.

19. H. Liu, Z. Wei, Y. Chen, J. Pan, L. Lin and Y. Ren. Drone Detection Based on an Audio-Assisted Camera Array // 2017 IEEE Third International Conference on Multimedia Big Data (BigMM), pp. 402-406, 2017, doi: 10.1109/bigmm.2017.57.
20. Басов О., Карпов А. Анализ стратегий и методов объединения многомодальной информации // Обработка информации и управления. 2015. Вып. 2. С. 7-14, , doi: 10.15217/issn1684-8853.2015.2.7.
21. Фалькович С., Хомяков Е. Статистическая теория измерительных радиосистем. Москва : Радио и связь, 1981.
22. Ширман Ю., Манжос В. Теория и методика обработки радиолокационной информации на фоне помех. Москва : Радио и связь, 1981.

Надійшла до редколегії 28.10.2021

Відомості про авторів:

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

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

Колісник Вікторія Іванівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна, e-mail: viktoria.kolisnyk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2382-9124>

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>

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

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>

Кізка Валерій Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Україна, e-mail: kizkavaleri@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1007-5295>