

УДК 004.045:621.396.96

І.І. Обод, Г.Е. Заволодько, А.Е. Горюшкіна

Національний технічний університет «ХПІ», Харків

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЯВЛЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ БАГАТООГЛЯДОВОМУ НЕКОГЕРЕНТНОМУ НАКОПИЧЕННІ СИГНАЛІВ

У статті наводиться алгоритм виявлення траєкторії повітряних об'єктів, який засновано на багатооглядовому некогерентному накопиченні прийнятих сигналів. Алгоритм реалізує перевірку всіх можливих траєкторій руху повітряного об'єкту на декількох циклах огляду, що потребує використання інформаційних технологій. Отримано основні статистичні характеристики даного методу: ймовірність хибної траєкторії і ймовірність правильного виявлення траєкторії повітряних об'єктів.

**Ключові слова:** виявлення траєкторії, некогерентне накопичення сигналів, інформаційні технології, ймовірність хибної тривоги, ймовірність правильного виявлення.

### Вступ

**Постановка проблеми й аналіз літератури.** Інформаційне забезпечення (ІЗ), яке базується на системах спостереження (СС), значною мірою визначає рішення задач, які стоять перед споживачами. Досвід провідних держав світу свідчить, що в них вже доволі тривалий строк існують національні єдині системи контролю повітряного простору (ПП) як військовою, так і цивільною авіацією. Очевидно, що при цьому досягається максимальна ефективність використання ПП при порівняно низьких матеріальних, технічних та людських затратах. Однією з складових системи контролю ПП є єдина інформаційна мережа (ЕІМ) на базі існуючих СС. Мережевій побудові інформаційних засобів приділяється значна увага [1 – 2]. Як правило, в ЕІМ реалізується розподілена обробка інформації. Це призводить до реалізації вторинної обробки інформації в кожній СС.

Підвищення надійності (ІЗ) користувачів системи контролю ПП неможливо без використання інформаційних технологій (ІТ) у процесі отримання, збору, обробки, зберігання й розповсюдження аеронавігаційних даних. При цьому слід зазначити, що використання ІТ може здійснюватися з етапу первинної обробки інформації СС, тобто з етапу накопичення та виявлення сигналів, виявлення повітряних об'єктів (ПО) та виявлення траєкторії ПО.

Процедура виявлення траєкторії ПО, як правило, здійснюється на основі багатооглядової обробки інформації. Сучасні алгоритми [3] виявлення траєкторії ПО здійснюються на процедурах динамічного програмування. Метод, який використовує динамічне програмування, наведений в роботі [3], полягає в аналізі на кожному огляді всіх елементів дозволу, в яких може перебувати ПО, і виборі тільки одного з них з максимальною амплітудою прийнятого сигналу. Потім відбувається накопичення інформації і

порівняння отриманої суми з порогом для прийняття рішення про наявність траєкторії ПО. В [4 – 6] запропоновано алгоритми виявлення траєкторії ПО за основи аналізу результатів прийняття попередніх рішень, щодо виявлення сигналів та ПО. Особливістю запропонованих алгоритмів виявлення траєкторії ПО є те, що попередні рішення накопичуються за час кількох оглядів спостереження.

Цікаво розглянути можливість некогерентного багатооглядового накопичення сигналів з урахуванням всіх можливих переміщень ПО від огляду до огляду.

**Мета роботи.** Отримання статистичних характеристик виявлення траєкторії ПО при некогерентному багатооглядовому накопиченні сигналів з урахуванням всіх можливих переміщень ПО від огляду до огляду

### Основний матеріал

Розглянемо задачу виявлення траєкторії ПО, що рухається в просторі, за  $K$  оглядів. У кожному огляді ПО може перебувати в певному елементі дозволу  $z_k$  де  $k$  – номер поточного огляду.

Таким чином, траєкторія ПО являє собою набір елементів дозволу, в яких ПО знаходиться у відповідних оглядах, тобто  $(z_1, z_2, \dots, z_K)$ .

Нехай  $x_1, x_2, \dots, x_K$  – вектори комплексних амплітуд прийнятих сигналів за  $K$  оглядів, що містять компоненти корисного сигналу і шуму. Шумові компоненти прийнятого сигналу задаються векторами комплексних амплітуд:  $n_1, n_2, \dots, n_K$ . Будемо враховувати, що шум білий і підкоряється нормальному закону розподілу з нульовим математичним очікуванням і одиничною дисперсією. Виявлення траєкторії ПО зводиться до перевірки гіпотези  $H_0(z_1, z_2, \dots, z_K)$  про те, що в  $K$  оглядах спостереження в елементах дозволу ПО була відсутня проти

альтернативи  $H_1(z_1, z_2, \dots, z_K)$  про наявність ПО в елементах дозволу  $(z_1, z_2, \dots, z_K)$ :

$$\begin{aligned} H_0(z_1, z_2, \dots, z_K): x_k(z_k) &= n_k(z_k), k=1 \dots K; \\ H_1(z_1, z_2, \dots, z_K): x_k(z_k) &= a_k + n_k(z_k), k=1 \dots K, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $a_k$  – випадкова комплексна амплітуда сигналу, відбитого від ПО в  $k$ -му огляді.

Будемо вважати, що амплітуда прийнятого сигналу флукує за законом Релея, флукуації амплітуди сигналів статистично незалежні в різних оглядах і середнє відношення с/ш  $q$  не змінюється від огляду до огляду.

Для сигналів з незалежними флукуаціями амплітуди і випадковими фазами може бути використане некогерентне накопичення прийнятої послідовності. Це еквівалентно обчисленню наступного логарифма відношення правдоподібності:

$$L(z_1, z_2, \dots, z_K) = \sum_{k=1}^K L_k(z_k), \quad (2)$$

де  $L_k(z_k)$  – логарифм відношення правдоподібності для  $z_k$ -го елемента дозволу в  $k$ -му огляді спостереження:

$$L(z_k) = |x_k(z_k)|^2. \quad (3)$$

Вважаємо, що пошук ПО проводиться в заданому секторі простору, що складається з  $N_1$  елементів дозволу. Безліч елементів дозволу заданого сектора позначимо  $S_1$ , що має розмірність  $N_1$ . У перший момент часу ПО знаходиться в елементі дозволу  $z_1 \in S_1$ . Для будь-якого елемента дозволу  $z_1 \in S_1$  на другий огляд формується деякий строб, що складається з елементів безлічі  $S_2(z_1)$  розмірністю  $N_2$ , який в загальному випадку залежить від  $z_1$ . Строб на другий огляд відповідає всіляким гіпотетичним переміщенням ПО, що знаходиться в перший момент часу в елементі  $z_1$ . Це означає, що об'єкт від елемента  $z_1$  до другого огляду може переміститися по  $N_2$  передбачуваним траєкторіям.

Отже, для перших двох оглядів розглядаються гіпотези про траєкторії  $(z_1, z_2)$ , що задовольняють наступним умовам:

$$(z_1, z_2): z_1 \in S_1, z_2 \in S_2(z_1). \quad (4)$$

У третьому огляді для кожної гіпотетично можливої траєкторії  $(z_1, z_2)$ , побудованої за першими двома оглядами, формується строб, що складається з елементів  $S_3(z_1, z_2)$  розмірністю  $N_3$ . Аналогічно на  $k$ -й огляд для кожної можливої траєкторії  $(z_1, z_2, \dots, z_{k-1})$ , побудованої по попереднім  $(k-1)$  оглядам, формується строб  $S_k(z_1, z_2, \dots, z_{k-1})$  роз-

мірністю  $N_k$ , тобто передбачувана траєкторія повинна відповідати таким умовам:

$$\begin{aligned} (z_1, z_2, \dots, z_K): z_1 \in S_1, z_2 \in S_2(z_1), \\ z_K \in S_k(z_1, z_2, \dots, z_{K-1}). \end{aligned} \quad (5)$$

Таким чином, на останньому етапі відбувається порівняння для кожної можливої траєкторії відношення правдоподібності, яке є вирішальною статистикою, з порогом. Рішення про наявність траєкторії приймається у разі перевищення цього порога. Алгоритм прийняття рішення про наявність чи відсутність траєкторії ПО  $(z_1, z_2, \dots, z_K)$  для багатооглядового накопичення має вигляд:

$$\begin{aligned} H_0(z_1, z_2, \dots, z_K): L(z_1, z_2, \dots, z_K) < L_K, \\ H_1(z_1, z_2, \dots, z_K): L(z_1, z_2, \dots, z_K) > L_K. \end{aligned} \quad (6)$$

Загальне число гіпотез, яке необхідно перевірити, визначається кількістю всіх можливих траєкторій руху ПО, тобто добутком розмірів стробів  $N_1, N_2, \dots, N_K$ .

Визначимо характеристики виявлення траєкторії ПО (імовірність хибної тривоги і імовірність правильного виявлення) для розглянутого методу багатооглядового некогерентного накопичення. При однооглядовому спостереженні імовірність хибної тривоги дорівнює

$$F_K = f/N_1,$$

де  $f$  – частота появи хибної траєкторії за один цикл видачі інформації.

Імовірність хибного виявлення траєкторії по  $K$  оглядам дорівнюватиме

$$F_K = f/(N_1, N_2, \dots, N_K).$$

При відсутності сигналу (подія  $H_0$ ) знайдемо імовірність хибної тривоги, яка є імовірністю перевищення порога  $L_K$  на останньому  $K$ -му кроці, тобто

$$F_K = P\{L(z_1, z_2, \dots, z_K) > L_K | H_0\}. \quad (7)$$

Тому шум вважається білим з нормальним законом розподілу з нульовим математичним очікуванням і одиничною дисперсією, випадкова величина (3) підпорядковується експоненціальному закону. Тоді при відсутності сигналу вирішальна статистика (2) є розподіленою за законом  $\chi^2$  з  $2K$  ступенями свободи:

$$W_{L(z_1, z_2, \dots, z_K)}(\xi | H_0) = \frac{\xi}{2^K \cdot \Gamma(K)} \exp\left[-\frac{\xi}{2}\right], \quad (8)$$

де  $\Gamma(\xi)$  – гамма-функція, яка у разі цілочисельного аргументу може бути вираженою через факторіал  $\Gamma(\xi) = (\xi-1)!$ .

У цьому разі імовірність хибної тривоги (7) може бути записана як:

$$F_K = \frac{\Gamma\left(K, \frac{L_K}{2}\right)}{(K-1)!}, \quad (9)$$

де  $\Gamma(\xi, \zeta)$  – неповна гамма-функція.

Таким чином, по заданій частоті появи хибної траєкторії  $f$  за один цикл видачі інформації може бути отримана імовірність хибної тривоги, знаючи яку за допомогою виразу (9) можна отримати значення порога  $L_K$ .

Визначимо ймовірність правильного виявлення ПО, яка є імовірністю перевищення порога  $L_K$  на останньому  $K$ -му кроці при наявності ПО:

$$D_K = P\{L(z_1, z_2, \dots, z_K) > L_K | H_1\}. \quad (10)$$

Так як щільність розподілу випадкової величини (3) для будь-якого огляду має експоненціальний вигляд, то вирішальна статистика (2) підпорядковується розподілу  $\chi^2$  з  $2K$  ступенями свободи:

$$W_{L(z_1, z_2, \dots, z_K)}(\xi | H_1) = \frac{\xi^{K-1}}{2^K (1+q^2)^K \cdot \Gamma(K)} \cdot \exp\left[-\frac{\xi}{2(1+q^2)}\right]. \quad (11)$$

Тоді імовірність правильного виявлення ПО виглядає наступним чином:

$$D_K = \frac{\Gamma\left(K, \frac{L_K}{2(1+q^2)}\right)}{(K-1)!}. \quad (12)$$

## Висновки

Розглянутий алгоритм виявлення траєкторії ПО, який засновано на некогерентному накопиченні

сигналів та реалізації перевірки всіх можливих траєкторій руху ПО, практично неможливо реалізувати без широкого застосування інформаційних технологій.

Аналітично знайдені статистичні характеристики даного алгоритму дозволяють розрахувати криві виявлення траєкторії ПО та в подальшому провести порівняльний аналіз з другими алгоритмами виявлення траєкторій ПО.

## Список літератури

1. Lok J.J.  $C^2$  for the air warrior / J.J. Lok // *Jane's International Defense Review*. – October 1999. – V.2. – P. 53-59.
2. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 319 с.
3. Buzzi S. Track-before-detect produces for early detection of moving target from airborne radars / S. Buzzi, M. Lops, L. Venturino // *IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems*. – 2005. – V.41, № 3. – P. 937-954.
4. Патент № 51281. Спосіб розподіленої обробки інформації / Обод І.І., Заволодько Г. Е., Охрименко М.Ю.
5. Обод И.И. Обнаружение траекторий воздушных объектов по данным запросных систем наблюдения единой информационной сети / И.И. Обод, А.Э. Заволодько // *Вестник НТУ «ХПИ»: Сборник научных трудов. Тематический выпуск „Информатика и моделирование”*. – Х.: НТУ „ХПИ”, 2009. – Вып. 13. – С. 104-108.
6. Обод И.И. Синтез квазиоптимального обнаружителя трасс воздушных объектов запросными системами наблюдений единой информационной сети / И.И. Обод, А.Э. Заволодько // *Системы обработки информации: Сборник научных работ*. – Х.: ХУПС, 2009. – Вып. 2(76). – С. 72-74.

Надійшла до редколегії 23.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Єрмаков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫЯВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ МНОГООБЗОРНОМ НЕКОГЕРЕНТНОМ НАКОПЛЕНИИ СИГНАЛОВ

И.И. Обод, А.Э. Заволодько, А.Е. Горюшкина

В статье приводится алгоритм выявления траектории воздушных объектов, который основан на многообзорном некогерентном накоплении принятых сигналов. Алгоритм реализует проверку всех возможных траекторий движения воздушного объекта на нескольких циклах обзора, который требует использования информационных технологий. Получены основные статистические характеристики данного метода: вероятность ложной траектории и вероятность правильного обнаружения траектории воздушных объектов.

**Ключевые слова:** обнаружение траектории, некогерентное накопление сигналов, информационные технологии, вероятность ложной тревоги, вероятность правильного обнаружения.

## INFORMATION TECHNOLOGIES OF AIR OBJECTS TRAJECTORY IDENTIFICATION AT MULTISURVEY NOT COHERENT ACCUMULATION OF SIGNALS

I.I. Obod, G.E. Zavolodko, A.E. Goryushkina

The algorithm of air objects trajectory identification which is based on multisurvey not coherent accumulation of the accepted signals is given in article. The algorithm realizes checking of all possible trajectories of air object movement on several cycles of the review which demands use of information technologies. The main statistical characteristics of this method are received: probability of a false trajectory and probability of the correct detection of air objects trajectory.

**Keywords:** trajectory detection, not coherent signals accumulation, information technologies, false alarm probability, correct detection probability.