

ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ТА ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБ'ЄКТІВ ОКРЕМИМ РАДІОТЕХНІЧНИМ ЗАСОБОМ, ЩО ПРАЦЮЄ В ПАСИВНОМУ РЕЖИМІ

У статті запропоновано підхід до визначення координат рухомих повітряних об'єктів, на яких знаходяться джерела радіовипромінювання (ДРВп), окремим радіотехнічним засобом контролю (РТЗК), що працює в пасивному режимі, застосування вимірів пеленгів та апріорної інформації про його останнє положення та швидкісні параметри руху. Досліджено вплив помилок урахування апріорних даних на похибку запропонованих рішень.

Постановка проблеми. Кожна держава має цілу низку засобів спостереження чи контролю як у військовій, так і цивільній сферах. Робота засобів контролю базується на міжнародних домовленостях. Наприклад, згідно з Договором про відкрите небо Україна зобов'язується надавати дозвіл на здійснення певної кількості спостережних польотів над своєю територією як і інші країни-учасниці [1]. Даний договір визначає траєкторію руху спостережного засобу. Практика показує, що є випадки умисного або ненавмисного відхилення від визначеного маршруту руху літака. Подібні випадки мають місце як для цивільних, так і військових рухомих засобів. Розглянуті об'єкти можуть вести спостереження за наземними засобами у військовій сфері, що становить загрозу національній безпеці. Виявлення та прийняття адекватних дій щодо недопущення розглянутих ситуацій є важливим завданням. Наявність систем, які можуть визначати траєкторію руху та здійснювати повномасштабне спостереження за такими об'єктами обмежено. Окрім цього, застосування активних РТЗК призведе до їх викриття та визначення режимів роботи.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Визначенню координат та в подальшому траєкторій руху пасивними РТЗК приділено увагу у роботах [2–6]. У роботі [5] розглядається можливість визначення руху літаків окремими РТЗК, що працюють у пасивному режимі з використанням даних про роботу бортових радіолокаційних станцій (РЛС) бічного огляду поверхні. Застосування таких станцій здійснюється лише в режимі огляду земної поверхні, що обмежує застосування запропонованого підходу. Роботи [7, 8] присвячені можливості створення державної інтегрованої інформаційної системи, що поєднує у своєму складі різнотипні засоби. Розглянуті роботи вимагають для виконання поставленої задачі наявності не менше двох РТЗК.

Таким чином, *метою статті* є можливість розглянути визначення параметрів траєкторії руху повітряних об'єктів окремим РТЗК, що працює в пасивному режимі роботи і проводить вимір пеленгів.

Виклад основного матеріалу. З кожним роком збільшується кількість та ускладнюється набір радіоелектронного обладнання літаків. Більшість бортових

радіоелектронних засобів працюють з використанням власного радіовипромінювання. До бортових ДРВп належать навігаційні РЛС (із секторним оглядом передньої та задньої напівсфери), РЛС перехоплення, прицілювання та управління бортовою зброєю (як правило, з конічним оглядом), панорамні РЛС (з коловим оглядом), РЛС бічного огляду, РЛС літаків розвідки, багатофункціональні РЛС, бортові відповідачі систем радіолокаційного впізнавання IFF/SIF, запитувачі системи ближньої навігації TACAN, допоміжні радіолокаційні засоби (вимірювачі швидкості, радіовисотоміри тощо). Проведений аналіз показав, що перераховані бортові ДРВп мають параметри, за якими виявляються пасивними РТЗК та спостереження. Значний час знаходження (не менше декількох хвилин [5]) бортових засобів у зоні відповідальності РТЗК достатній для проведення їх виявлення, спостереження та багаторазового пеленгування пасивними РТЗК. Певні ділянки траєкторії руху об'єктів можуть бути визначені системою РТЗК за оцінюванням координат в окремі моменти часу. Подальший рух може бути лише передбачуваним.

Можливість визначення координат рухомих об'єктів та їх параметрів руху розглянемо з урахуванням певних обмежень, до яких слід віднести:

початкова точка місцезнаходження рухомого об'єкта апріорно відома (вимір місцезнаходження здійснюється системою РТЗК, із зони дії якої виходить літак);

рух літака вважається рівномірним та прямолінійним з відомими швидкісними показниками між двома сусідніми вимірами РТЗК (наприклад, пасажирські судна, транспортні літаки, літаки-розвідники тощо);

РТЗК здійснюється пеленгування літаків.

Пояснення отримання математичних виразів для визначення траєкторії руху буде зроблено за допомогою рис. 1, на якому показано довільно вибрану прямокутну систему координат на площині, у якій в точці O знаходиться РТЗК, що здійснює пошук та виявлення випромінювальних засобів літаків у пасивному режимі роботи.

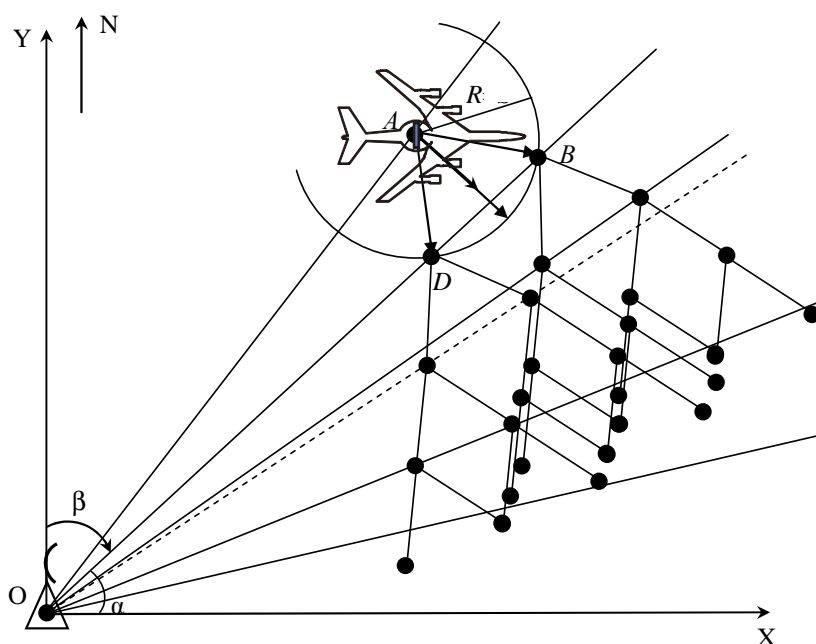


Рис. 1. Пояснення до виразу визначення напрямку руху

Останнє положення літака, яке визначено системою РТЗК, позначено точкою А на рис. 1. У момент появи літака у зоні відповідальності РТЗК разом з виявленням здійснюється його пеленгування та визначення параметрів випромінювання. Виміряні частотно-часові параметри прийнятих сигналів використовують для розпізнавання ДРВп. Пеленг, позначений через β , вимірюється як азимут, що відраховується від напрямку на Північ (позначений як N). Визначені пеленги мають лінії положення у вигляді прямих.

У зв'язку з апріорно невідомим напрямком руху об'єкта він може бути у будь-якій точці відрізка BD , який знаходиться на лінії пеленга.

Кут α визначається як $\alpha = 90^\circ - \beta$. Місцезнаходження літака визначається за перетином 2-х ліній: прямої та кола. Рівняння прямої, яка відповідає виміру пеленга, у прямокутних координатах має вигляд:

$$y = x \operatorname{tg} \beta \quad (1)$$

при знаходженні РТЗК на початку системи координат і

$$y = (x - x_1) \operatorname{tg} \beta + y_1, \quad (2)$$

якщо РТЗК знаходиться у точці з координатами (x_1, y_1) .

Рівняння кола для випадку на рис. 1 має вигляд

$$(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = R^2, \quad (3)$$

де $R = V \Delta t$ – радіус кола, що відповідає можливому переміщенню літака між останнім визначенням координат (точка А на рис. 1) і першим визначенням пеленга РТЗК (пеленг β);

V – крейсерська швидкість об'єкта;

Δt – час між сусідніми вимірами пеленгів (дискретність пеленгування);

x_A, y_A – прямокутні координати точки А.

Визначення координат імовірної точки положення літака на першому пеленгу реалізується розв'язанням системи рівнянь:

$$\begin{cases} y = x \operatorname{tg} \beta; \\ (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = R^2. \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язання системи рівнянь (4) методом підстановки приводить до квадратного рівняння, з якого отримуються два кореня, що дають точки можливого знаходження об'єкта:

$$\begin{cases} y_1 = x_1 \operatorname{tg} \beta; & x_1 = \frac{(x_a + y_a \operatorname{tg} \beta) + C}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}; \\ y_2 = x_2 \operatorname{tg} \beta; & x_2 = -\frac{(x_a + y_a \operatorname{tg} \beta) + C}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}; \\ C = \operatorname{tg} \beta \left(2x_a y_a - \operatorname{tg} \beta [x_a^2 - R^2] \right) + R^2 - y_a^2. \end{cases} \quad (5)$$

Координати точок визначають дві межі можливого знаходження об'єкта з урахуванням даних про крейсерську швидкість та прямолінійність руху.

У зв'язку з апріорною невизначеністю щодо напрямку руху об'єкта на момент входження в зону відповідальності РТЗК і можливим його знаходженням в одній з точок будуються по дві траєкторії руху з кожної. У подальшому кількість можливих траєкторій зростає (див. рис. 1), що збільшує обсяг обчислень при побудові можливих. Усунення неоднозначності і селекцію траєкторій рухомих об'єктів можна провести за умови врахування прогнозу щодо руху розпізнаних об'єктів.

У результаті отримується певна кількість відрізків маршрутів між пеленгами, що в сукупності утворюють траєкторії.

Проводити селекцію та вибір істинної траєкторії пропонується шляхом прогнозування руху об'єкта та обробки результатів вимірів.

Для прогнозування руху літака і забезпечення поточної обробки (фільтрації) результатів вимірів пеленгів РТЗК пропонується використовувати $\alpha\beta$ -фільтр [9], який забезпечить побудову траєкторії руху за кутовою координатою (пеленгом). Такий фільтр дозволяє проводити рекурентну обробку результатів вимірів у реальному масштабі часу та врахувати можливі зміни напрямку руху в зоні відповідальності РТЗК. Точність оцінювання координат літаків з використанням такого фільтра обумовлюється ступенем полінома апроксимації (екстраполяції) траєкторії руху літака та кількістю вимірів, за якими вона побудована. Наявність останнього чинника обумовлюється збільшенням динамічної помилки побудови траєкторії, усунення якої можливе збільшенням полінома апроксимації після 10–15 вимірів.

Модель траєкторії руху повітряного об'єкта визначається у вигляді полінома, ступінь якого може збільшуватися у міру супроводження літака. Модель прогнозування руху у вигляді прямолінійної моделі траєкторії руху має такий вигляд:

$$\Omega_n = \Phi \Omega_{n-1}, \quad (6)$$

де $\Omega_n = \begin{bmatrix} \beta_n \\ V_{\beta_n} \end{bmatrix}$; $\Omega_{n-1} = \begin{bmatrix} \beta_{n-1} \\ V_{\beta_{n-1}} \end{bmatrix}$ – спрогнозоване та попереднє значення пеленга β та швидкості зміни пеленга V_{β} з $n-1$ -го на n -й момент часу;

$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ – оператор, що задає апроксимацію руху і прогноз координат за інтервал

часу між сусідніми вимірами пеленга Δt .

Перерахунок помилок здійснюється за виразом

$$\Psi_n = \Phi \Psi_{n-1} \Phi^T, \quad (7)$$

де Ψ_n, Ψ_{n-1} – кореляційні матриці помилок прогнозування розміру 2×2 , у яких на головній діагоналі розташовані дисперсії оцінок пеленга та швидкості його зміни, а інші елементи є кореляційними моментами.

Проведення оцінювання кутової координати та швидкості її зміни пропонується проводити за виразами

$$\begin{cases} \hat{\Omega}_n = \Omega_n + K_n (F_n - H\Omega_n); \\ \hat{\Psi}_n = \Psi_n - K_n P_n K_n^T, \end{cases} \quad (8)$$

де $\hat{\Omega}_n, \hat{\Psi}_n$ – вектор та кореляційна матриця помилок оцінювання пеленга та його швидкості зміни;

$$P_n = [H\Psi_n H^T] + \Psi_\varepsilon, \quad \Psi_\varepsilon = \begin{vmatrix} \sigma_\beta^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \text{кореляційна матриця помилок виміру пеленга};$$

$$H = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \text{матриця перерахунку вимірів в оцінці};$$

$$K_n = \Psi_n H P_n^{-1} - \text{коефіцієнт підсилення фільтра}.$$

Початкове визначення швидкості зміни пеленга ($V_{\beta 2}$) та дисперсії ($\sigma_{V_{\beta 2}}$) пропонується провести з використанням методу максимальної правдоподібності:

$$V_{\beta 2} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\Delta t}; \quad \sigma_{V_{\beta 2}}^2 = \frac{2\sigma_\beta}{\Delta t^2}, \quad (9)$$

де β_1, β_2 – виміри пеленгів на першому та другому контакті РТЗК з активною РЛС літака під час його входу в зону відповідальності ДРВп;

σ_β – середньоквадратична помилка виміру пеленга РТЗК.

Відкидання хибних траєкторій можливе за перевіркою попадання результату прогнозу у кореляційний строб, тобто виконання нерівності [9]:

$$(\beta_\varepsilon - \beta_n) > 6\sigma_n, \quad (10)$$

де $\beta_\varepsilon, \beta_n$ – виміряне та прогнозоване значення пеленгів на ДРВп;

σ_n – значення прогнозованої помилки пеленга ДРВп на момент виміру.

При застосуванні такого підходу до визначення параметрів траєкторії руху будуть впливати помилки визначення пеленга РТЗК та відхилення реальної швидкості руху літака від врахованої у розрахунках.

Реальний рух літака пов'язаний із можливим відхиленням швидкості руху всередині зони відповідальності РТЗК від врахованої. Помилка, що виникає при цьому, має систематичний характер та буде присутня у всіх розрахунках координат. Коефіцієнт, що враховує збільшення помилки, обумовлюватиметься значенням часового інтервалу між вимірами пеленга. Розрахунок коефіцієнта збільшення помилки визначення дальності до ДРВп можливий за виразом

$$K_{зб} = \frac{\sum V_{зб}}{\sum V_{кр}}, \quad (11)$$

де m – кількість визначень координат літаків у зоні відповідальності РТЗК;

$V_{кр}$ – крейсерська швидкість розпізнаного літака;

$V_{зб}$ – реальна швидкість руху (у міру симетричності нормального закону розподілу помилок враховуються помилки щодо збільшення значення швидкості).

Результати обчислення даного коефіцієнта подані в табл. 1, а залежність зміни помилки визначення координат наведено на рис. 2.

Таблиця 1

Коефіцієнти похибки визначення параметрів

Швидкість	Коефіцієнт похибки
500 км/год	1,018
600 км/год	1,023
700 км/год	1,043
800 км/год	1,049
900 км/год	1,056
1000 км/год	1,067
1100 км/год	1,089

За отриманими значеннями побудовано графік залежності помилки визначення координат рухомих об'єктів (σ) від помилки значення використаної швидкості (σ_V).

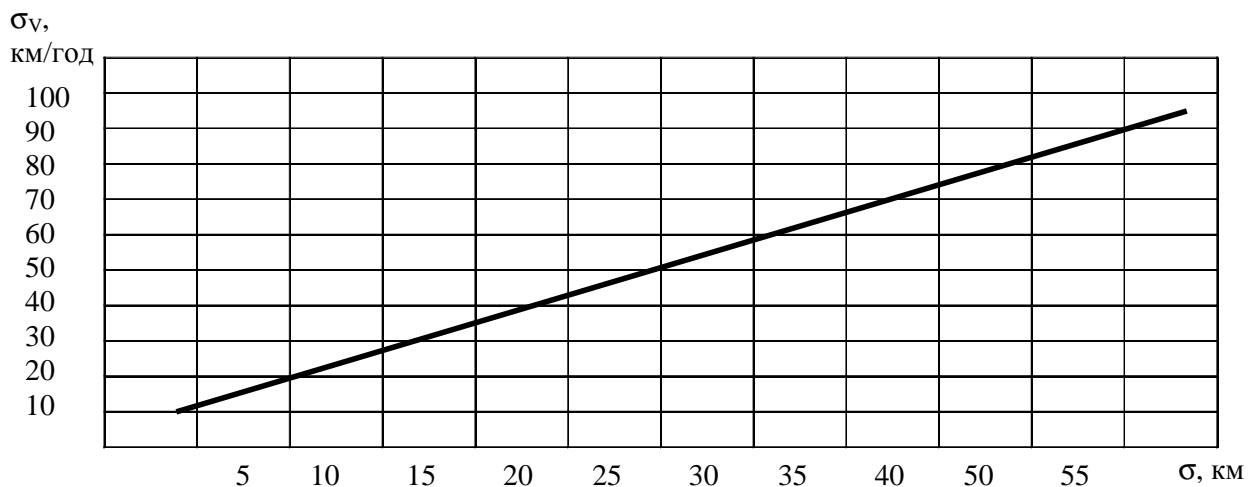


Рис. 2. Графік залежності похибки врахування швидкості руху на помилку визначення місцезнаходження

З графіка видно, що залежність має пряmolінійний характер. Моделювання та аналіз моделі руху літаків показав, що дискретність пеленгування повинна бути в межах від 2 до 8 хв. Нижня межа залежить від мінімально необхідного часу виявлення та розпізнавання випромінювального засобу літака РТЗК. Величина верхньої межі пеленгування обумовлюється можливістю втрати контакту з літаком за рахунок збільшення помилки прогнозу і виходу останнього за межі діаграми спрямованості РТЗК. При виконанні даних вимог імовірність правильної ідентифікації траєкторії руху буде не менше 0,95. Величина проміжку повинна вибиратися залежно від дальності до ДРВп.

Висновки. У статті запропоновано підхід до визначення координат та побудови траєкторії руху літальних апаратів окремим пасивним РТЗК. Розроблене математичне забезпечення та імітаційне моделювання довело, що найбільш суттєво на точність запропонованого підходу впливають похибки, викликані неточністю допущення на крейсерську швидкість літака та похибки визначення пеленга даного ДРВп. Розглянутий вплив дискретності вимірів пеленга показав, що величина сусідніх вимірів повинна знаходитись у межах 2–8 хв.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Договір з відкритого неба (постатейна характеристика) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/994_316.
2. Смирнов Ю. А. Радиотехническая разведка / Ю. А. Смирнов. – М. : Воениздат, 2001. – 456 с.
3. Принципи створення пасивної багатопозиційної радіолокаційної просторово рознесеної системи в зоні дії радіолокаційної станції дальнього виявлення / [Г. В. Певцов, А. Я. Яцуценко, Д. В. Карлов та ін.] // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2010. – Вип. 2 (4). – С. 91–97.
4. Жовноватюк Р. М. Визначення параметрів рухомих джерел радіовипромінювання пасивними системами радіомоніторингу / Р. М. Жовноватюк // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ. – 2007. – № 8. – С. 72–80.
5. Підхід до визначення параметрів руху повітряного об'єкта окремим радіотехнічним засобом, що працює в пасивному режимі / С. В. Петраш, Р. В. Дзюбчук, А. О. Хабчук, С. А. Григорчук // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ ДУТ. – 2013. – Вип. 7. – С. 137–144.
6. Сащук І. М. Методика визначення модуля вектора лінійної швидкості джерела радіовипромінювання пасивною системою радіомоніторингу / І. М. Сащук, Р. М. Жовноватюк, С. І. Болобан // Вісник ЖДТУ. – 2011. – № 1 (56). – С. 72–74.
7. Писарчук О. О. Методика визначення координат рухомих об'єктів за інформацією від несинхронізованих у часі та просторі вимірювачів / О. О. Писарчук, А. Л. Мельник // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ НАУ. – 2009. – Вип. 2. – С. 175–182.
8. Створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження) України – виклик ХХІ століття / В. В. Корнієнко, М. Ф. Бондаренко, В. Т. Гандабура, Я. С. Яцків // Наука та інновації. – 2007. – Т. 3. № 1. – С. 4–32.
9. Кузмин С. З. Алгоритмы фильтрации параметров воздушных целей : учеб. пособ / С. З. Кузьмин. – Житомир : ЖВИРЭ, 2003. – 64 с.

С. В. Петраш, Ю. И. Запорожченко

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ОТДЕЛЬНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ СРЕДСТВОМ, РАБОТАЮЩИМ В ПАССИВНОМ РЕЖИМЕ

В статье предложен подход к определению координат подвижных воздушных объектов по находящимся на них источникам радиоизлучения отдельным радиотехническим средством контроля, работающим в пассивном режиме, использованию измерений пеленгов и априорной информации о его последнем местоположении и скоростных параметрах движения. Исследовано влияние ошибок учета априорных данных на ошибку предложенных решений.

S. V. Petrash, Y. I. Zaporozhchenko

OBJECT MOTION PARAMETERS DETERMINING APPROACH BY WORKED IN PASSIVE MODE SEPARATE TECHNICAL MEAN

It is suggested the variant of mobile object's sources of radio emission movement trajectory coordinates and parameters determination by worked in passive mode separate technical mean. The necessary conditions for the calculations are the priory information about the last location and speed of the sources of radio emission. It is investigated the influence of errors assumptions about the cruising speed of the aircraft and the bearings measurement resolution on the overall accuracy of the proposed approach.