

УДК 621.399

М.П. Багуринський, Д.Ю. Свистунов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТА СУПРОВОДЖЕННЯ ЗАСОБАМИ АКТИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ АЕРОДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЇХ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПАРАМЕТРІВ ПОЛЬОТУ

Запропоновано метод оцінювання якості виявлення та супроводження засобами активної радіолокації аеродинамічних об'єктів. Метод враховує особливості їх конструкції та параметри польоту. За допомогою математичної моделі аеродинамічного об'єкту, яка побудована з використанням методу найпростіших компонентів, були отримані закони розподілення відбитих сигналів для різних об'єктів та умов польоту. З використанням чисельних методів були розраховані ймовірності виявлення, дальності виявлення та побудовані залежності дальності виявлення від ракурсу спостереження. Для розрахунку якості супроводження за критерієм M з N запропоновано використання дерева подій. Показано найпростішу побудову дерева та наведений порядок розрахунку показників, що характеризують якість виявлення.

Ключові слова: засоби активної радіолокації, якість виявлення та супроводження, дерево подій.

Вступ

Постановка проблеми. Задача оцінювання якості виявлення та супроводження аеродинамічних

об'єктів (АДО) засобами активної радіолокації є однією з основних задач в теорії і практиці радіолокації. Крім того ця задача є невід'ємною складовою при виконанні великої кількості штабних розрахункових задач.

Характеристикою цілі, що визначає можливості щодо її виявлення є ефективна поверхня розсіювання (ЕПР). Найчастіше розрахунок дальності проводиться за відомою формулою радіолокації для цілі з фіксованою ЕПР. Значенням ЕПР тут виступає її медіанне значення, що дає змогу отримати оцінку дальності виявлення для ймовірності правильного виявлення $D=0,5$ [1]. Оцінювання дальності для інших значень D потребує інформації про закон розподілення флуктуацій ЕПР, який залежить від типу аеродинамічного об'єкту, умов його польоту та ракурсу спостереження. Відомо, що ймовірність правильного виявлення може бути обчислена за формулою [2]:

$$D = \int_{U_{\text{пор}}}^{\infty} W_{\text{сп}}(y) dy, \quad (1)$$

де $W_{\text{сп}}(y)$ – щільність ймовірності адитивної суміші корисного сигналу та шуму;

$U_{\text{пор}}$ – поріг виявлення, що фіксує рівень хибних тривог на завданому рівні.

Для можливості використання співвідношення (1) необхідна інформація про розподілення $W_{\text{сп}}(y)$. Тут найчастіше виходять з певних припущень щодо параметрів цього розподілення, і на базі висунутих припущень проводять розрахунки.

Огляд чисельних джерел показує, що для опису $W_{\text{сп}}(y)$ використовуються досить багато припущень. Так в [3, 4] встановлено, що для більшості аеродинамічних об'єктів величина $y = \sigma/\bar{\sigma}$, де $\bar{\sigma}$ – середнє значення ЕПР, розподілена за законом, близьким до закону χ^2 -квадрат з $2k$ ступенями свободи: $p_k(y) = A_k y^{k-1} e^{-ky}$, де $A_k = k^k / (k-1)!$. При цьому для різних цілей змінюється значення коефіцієнту k . В роботі [5] було показано, що використання закону χ^2 -квадрат неадекватно при опису суттєво асиметричних об'єктів, наприклад, ракети або корабля. Для таких об'єктів було запропоновано використовувати логнормальне розподілення.

Означені вище допущення справедливі для розгляду певного гіпотетичного об'єкту, скажемо, класу літак. Але при розгляді параметрів закону розподілення від конкретних об'єктів, вони можуть суттєво відрізнятися від зазначених вище припущень. Більше того, параметри можуть змінюватися від ракурсу спостереження об'єкту, параметрів та умов його польоту [11, 12]. Тому для виконання розрахунків бажано використовувати закон розподілення відбитого сигналу саме від об'єкту того типу, для якого проводяться розрахунки. Необхідну інформацію можливо отримати шляхом натурних експериментів або шляхом моделювання. Проведення натурних експериментів потребує великих матеріальних витрат, та все одно не дозволяє отримати інформацію про закон розподілення відбитого сигналу для всіх можливих умов польоту, що представляють

інтерес для аналізу. Другий шлях позбавлений таких недоліків, хоча точність отриманих результатів суттєво залежить від адекватності використаної для розрахунків моделі. Використовувати математичне моделювання для розрахунку щільності ймовірності відбитого сигналу запропоновано в [6]. Урахування законів розподілення відбитих сигналів від конкретних цілей дозволяє підвищити точність оцінок якості виявлення.

Для штабних розрахунків та систем підтримки рішення командира оцінювання якості виявлення аеродинамічних об'єктів це лише проміжний етап в розрахунках. Наступним етапом є проведення аналізу якості супроводження аеродинамічних об'єктів засобами радіолокації. Це актуальна задача для оцінювання функціонування стрільбових комплексів, для засобів радіолокації, що видають інформацію для стрільбових комплексів тощо. Провести оцінку якості супроводження можливо маючи інформацію про якість виявлення та алгоритми роботи засобів радіолокації.

Ціллю статті є отримання методу розрахунку показників якості виявлення та супроводження аеродинамічних об'єктів засобами активної радіолокації з урахуванням конструктивних особливостей об'єктів, параметрів та умов їх польоту а також особливостей функціонування засобів радіолокації.

Метод розрахунку якості виявлення

В якості моделі аеродинамічного об'єкту використовувалась модель, запропонована в [7,8]. Модель припускає апроксимацію складної поверхні аеродинамічної цілі набором тіл простої форми (еліпсоїди, циліндри, пластини т.д.), для яких відомі наближені методи розрахунку розсіювання електромагнітних хвиль. При цьому відбитий від всього об'єкту сигнал знаходиться за принципом суперпозиції відбиттів від кожної з поверхонь, якими апроксимується об'єкт, з врахуванням ефекту затінення.

Для отримання статистики відбитого сигналу використовувалась програмна реалізація вказаного вище методу [8]. З її допомогою були отримані значення амплітуди відбитого сигналу для різних ракурсів спостереження та умов польоту. Закон розподілення амплітуди відбитого сигналу знаходився за допомогою метода Парзенівського вікна [9]. В цьому випадку шукана щільність ймовірностей знаходилась відповідно до виразу:

$$W_c(y) = \sum_{k=1}^n p_k \frac{1}{h_n} \varphi\left(\frac{y-y_k}{h_n}\right), \quad (2)$$

де n – об'єм вибірки; $\varphi(y)$ – функція вікна; h_n – параметр вікна; p_k – вага окремого значення вибірки,

причому $\sum_{k=1}^n p_k = 1$.

Функція вікна повинна мати всі властивості щільності розподілення: невід'ємна, площа під кри-

вою повинна дорівнювати одиниці. В випадку що розглядається в якості функції вікна була обрана функція узагальненого розподілення Релея, адже цією функцією найчастіше описують закони розподілення відбитих сигналів в радіолокації:

$$\varphi(y) = \frac{y}{\sigma^2} e^{-\frac{y^2 + \alpha^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{\alpha y}{\sigma^2}\right). \quad (3)$$

Розрахунок цієї функції також проводився чисельними методами.

Розрахунок щільності ймовірностей суміші відбитого сигналу та шуму $W_{\text{сп}}(y)$ проводився за відомим співвідношенням композиції законів розподілення [10]:

$$W_{\text{сп}} = \int_{-\infty}^{\infty} W_c(x)N(y-x)dx, \quad (4)$$

де $W_c(x)$ – щільність розподілення амплітуди відбитого сигналу, що обчислена відповідно (2);

$N(x)$ – щільність розподілення шуму. В зазначеному випадку для $N(x)$ обирався закон розподілення Релея.

Співвідношення (4) та вибір релеєвського закону розподілення для шуму справедливо для лінійного детектору, коли схему отримання та обробки суміші сигналу і шуму, наведену на рис. 1, а можливо замінити на схему 1, б. В цьому випадку нормальний закон розподілення на виході детектору дасть розподілення Релея.



Рис. 1. Припущення для розрахунку щільності розподілення суміші сигналу і шуму

На рис. 2 наведені приклади графіків отриманих законів розподілення. Вказані щільності ймовірностей отримані для літака МіГ-29, довжині хвилі 10 см та відношенні сигнал/шум 20дБ.

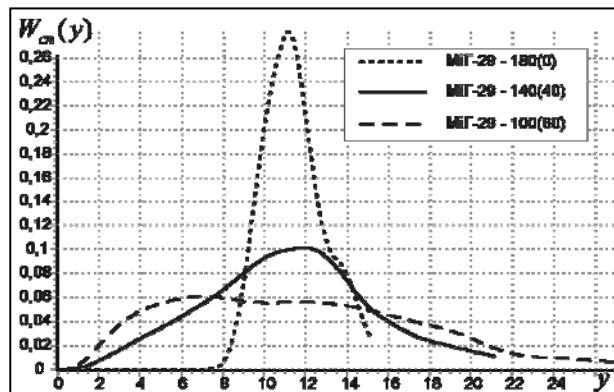


Рис. 2. Щільності розподілення суміші відбитого сигналу і шуму для різних ракурсів спостереження літака МіГ-29

Графіки наведені для різних ракурсів спостереження: 180, 140 та 100 градусів. Рух літака на спостерігача відповідає 180 градусам.

Більшість отриманих законів розподілення виявилися близькими до Релеєвського (або узагальненого Релеєвського). Однак в ряді випадків результат оцінювання закону розподілення виявилось досить складно апроксимувати будь-яким відомим законом.

Розраховуючи функціями щільності розподілу $W_{\text{сп}}(y)$ можливо, користуючись (1), розрахувати значення ймовірності правильного виявлення та побудувати криві виявлення. Але на практиці уявляє більший інтерес не залежність ймовірності виявлення від дальності, а сама дальність для різних умов спостереження. Провести такі розрахунки легко зробити за допомогою співвідношення:

$$r = 4 \sqrt{\frac{K_c \cdot \sigma_m}{Q_D}}, \quad (5)$$

де σ_m – медіанне значення ЕПР об'єкту, яке знаходиться за експериментальними даними або результатами моделювання (як в випадку, що розглядається); Q_D – відношення сигнал/шум, що забезпечує ймовірність правильного виявлення D , величина якого знаходиться з отриманих кривих виявлення; K_c – коефіцієнт, що враховує потенціал радіолокаційної станції (РЛС). Цей коефіцієнт знаходиться через паспортні дані на РЛС, що зв'язують дальність виявлення, ймовірність виявлення та ЕПР цілі.

Так на рис. 3 наведено графік залежності дальності виявлення літака МіГ-21 від ракурсу його спостереження. Залежність розрахована для довжини хвилі 10 см. та РЛС що виявляє ціль з ЕПР 1 м^2 на дальності 270 км.

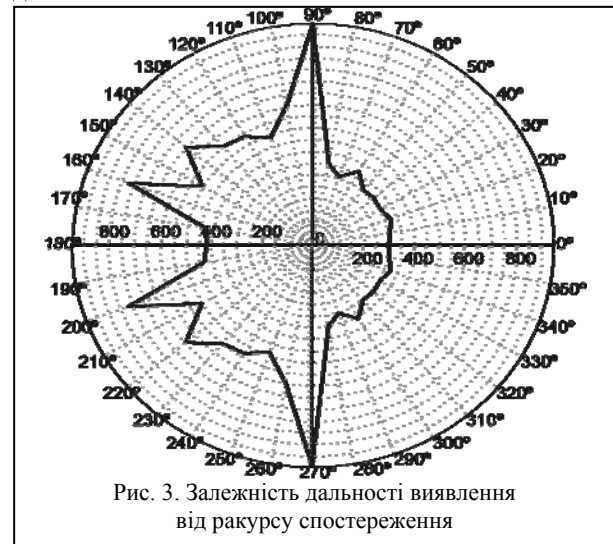


Рис. 3. Залежність дальності виявлення від ракурсу спостереження

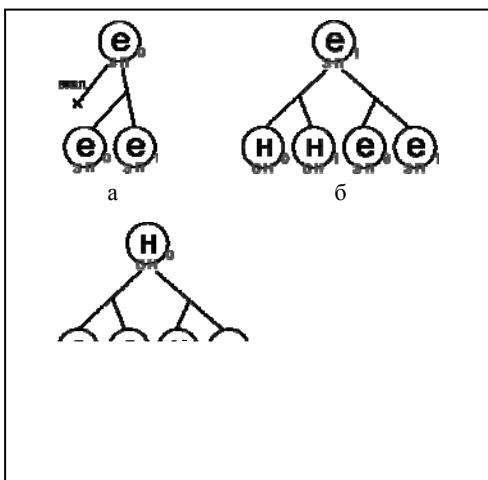
Метод розрахунку якості супроводження

Маючи оцінки ймовірності правильного виявлення D можливо розрахувати ймовірність зв'язки траси, ймовірність скидання траси з супроводження і

ймовірність існування траси для будь-якого моменту часу. Аналіз проведемо для алгоритму роботи М з N.

Зав'язка траси (подія Z) відбувається при виявленні аеродинамічного об'єкту не менше, ніж у $M_{зав}$ суміжних оглядах РЛС з $N_{зав}$. Умовою супроводження (подія А) є виявлення АДО не менше ніж в $M_{пров}$ оглядах з $N_{пров}$. Найчастіше для рішення подібних задач використовують формули біноміального розподілення. Але у випадку, що розглядається, ці формули застосовувати неможливо з кількох причин, а саме, ймовірність виявлення не є постійною величиною, а змінюється від огляду до огляду. Крім того, не кожна комбінація М виявлень з N приводить до зав'язки траєкторії. Так, траєкторія при поточному зондуванні зав'язується лише при наявності виявлення АДО в цьому зондуванні, а скидається з супроводження тільки при відсутності виявлення.

Для врахування вищезазначених особливостей запропоновано використання дерев подій, що уявляє собою графічне зображення можливих варіантів подій, які виникають при виявленні аеродинамічних об'єктів. Сказане проілюстровано на рис. 4, де у верхньому рядку відображені 4 результати для поточного зондування, а на нижньому можливі події, які передували кожному з результатів на попередньому зондуванні. При кожному зондуванні існує повна група, яка складається з 4 подій: виявлення відбулося і АДО супроводжується (літера "Е" та "1" праворуч (рис. 4, б), виявлення відбулося і АДО не супроводжується (літера "Н" та "1" праворуч), рис. 4, г, виявлення не відбулося а АДО супроводжується (літера "Е" та "0" праворуч), рис. 4, а, виявлення не відбулося і АДО не супроводжується (літера "Н" та "0" праворуч), рис. 4, в. Для кожного з припущень для попереднього зондування існує два варіанти: наявність виявлення та його відсутність. Позначки "викл." відображають неможливі події і виключаються з подальшого аналізу цієї гілки подій. Аналогічним чином можливо продовжити побудову на необхідну глибину.



Як показав аналіз, для виконання розрахунків з прийнятною точністю, побудову дерев подій необхідно проводити щонайменше глибиною $2N_{пров}$.

Перед розрахунком необхідно провести нормування. Для цього обчислюється ймовірність існування кожного піддерева P_{sw} усіх варіантів результату поточного зондування:

$$P_{sw} = \sum_{i=1}^{N_{sw}} P_i, \quad (6)$$

де s – один з варіантів поточного зондування ($s \in \{a, б, в, г\}$);

$w = 0$ для лівого піддерева, та 1 для правого піддерева; N_{sw} – кількість варіантів на останньому рівні побудови, що відповідають припущенню sw ; P_i – ймовірність виконання ланцюжка подій, починаючи від події s поточного зондування до події i зондування, яке розглядалось останнім.

Ланцюжок подій визначається літерним індексом самої останньої події. Наприклад, індекс "аабг" визначає: для поточного зондування – варіант а), для попереднього – варіант а), два зондування назад – варіант а), три зондування назад – варіант б), і чотири зондування назад – варіант г). Ймовірність одного ланцюжка визначається як добуток ймовірностей перерахованих подій:

$$P_i = \prod_{j=N_{ш}}^0 P_{j,k_j(i)}, \quad (7)$$

де $P_{j,k_j(i)}$ – ймовірність події, що знаходиться на рівні j в дереві подій та має порядковий номер k в межах цього рівня.

Номер $k_j(i)$ обирається таким чином, щоб цій події обов'язково передувала подія останнього зондування з індексом i .

Ймовірність будь-якої події у дереві подій на рівні j обчислюється як D_j , якщо вона передувала наступній події за варіантами б) або г), як $1 - D_j$, якщо за варіантами а) або в).

Далі обчислюється нормуючий коефіцієнт:

$$k = 1 / \left(\sum_{q=a}^g \sum_{w=0}^1 P_{sw} \right). \quad (8)$$

Тепер можуть бути знайдені шукані ймовірності. Ймовірність зав'язки траєкторії – $P(Z)$, ймовірність супроводження – $P(A)$ і ймовірність зриву траєкторії з супроводження $P(T)$ визначаються:

$$P(Z) = kP_{б,0}, P(A) = k(P_{а,1} + P_{б,1}), P(T) = kP_{в,0}. \quad (9)$$

На рис. 5 наведені залежності ймовірності виявлення та супроводження (існування зв'язаної траєкторії) від часу.

Розрахунки проводились для РЛС, яка на протязі часу проводила огляд простору в той час, як заданий аеродинамічний об'єкт із складу нальоту виконував політ за задуманою траєкторією. Початок відліку часу відмінний від нуля з причини відсутності радіовидимості з об'єктом до цього моменту.