

УДК 621.396.06

Б.В. Бакуменко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ОБ'ЄДНАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПЕРВИННОГО РАДІОЛОКАТОРА ТА СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ОПІЗНАВАННЯ

Розглянуті показники якості об'єднання інформації первинного радіолокатора та системи радіолокаційного опізнання при автоматичному виявленні та вимірюванні координат цілей.

система радіолокаційного опізнання, показники якості, роздільна здатність

Вступ

Постановка проблеми та аналіз літератури. Рішення задач, поставлених перед Повітряними Силами, в значному ступені визначається інформаційним забезпеченням, яке базується на системах первинної та вторинної радіолокації. Системи вторинної радіолокації, до яких відноситься система радіолокаційного опізнання (РЛО), призначені для опізнання об'єктів (визначення їх державної належності) та отримання координатної та іншої польотної інформації від своїх об'єктів. Система РЛО вирішує задачу опізнання виявлених повітряних об'єктів як в інтересах визначення ступеня їх небезпечності, так і при безпосередньому застосуванні зброї. Система РЛО потребує цілевказування (ЦВ) від первинної РЛС і її інформація видається у систему обробки первинної РЛС. На етапі первинної обробки інформація від первинних РЛС та системи РЛО об'єднується автоматично на координатному рівні [1], що потребує аналізу питань автоматичної обробки інформації систем РЛО [2]. Однак принцип побудови систем РЛО та система сигналів, які використовуються в них, призводять до суттєвих матеріальних затрат. Дійсно, роздільні здатності систем РЛО перевищують роздільні здатності деяких первинних РЛС, що не завжди потрібно, оскільки при обмеженій кількості цілей імовірність знаходження „свого” та „чужого” літака на такій малій відстані незначна.

Метою роботи є дослідження якості об'єднання координатної інформації систем первинної РЛС та систем РЛО.

Основна частина

Процес об'єднання інформації від первинних РЛС і систем РЛО аналогічний процесу цілевказування. При цьому ЦВ можна розглядати, власне кажучи, як заявку на обслуговування визначеного об'єкта системою РЛО. Задачею системи РЛО є визначення координат повітряних цілей (ПЦ), які відповідають на сигнали запиту. У подальшому координати ПЦ, визначені первинною РЛС та системою РЛО, порівнюються. Якщо вони співпадають, ПЦ привласнюється ознака „своя”; якщо ж система РЛО

не визначила координати ПЦ, об'єкту привласнюється ознака „чужа”.

Одним із основних показників системи об'єднання інформації є імовірність правильного опізнання своїх P_{cc} і чужих $P_{чч}$ об'єктів. Розглянемо показники якості системи РЛО для двох випадків:

1) об'єм невизначеності (ОН) системи первинної РЛС та системи РЛО однакові;

2) ОН системи РЛО значно перевищує ОН системи первинної РЛС і в ОН системи РЛО знаходяться декілька цілей.

Розглянемо перший випадок, коли в ОН системи РЛО знаходиться одна ціль (при наявності декількох цілей вони все рівно не розпізнаються). Згідно з алгоритмом обробки, координатна інформація первинної РЛС і системи РЛО об'єднуються, якщо різниця між оцінками азимуту та дальності цілей в двох системах не перевищує роздільних здатностей первинної РЛС за відповідними координатами.

В припущенні, що похибки вимірювання координат в первинному радіолокаторі і системі РЛО незалежні і розподілені за нормальним законом з нульовим середнім, імовірність об'єднання оцінок визначається формулою

$$P_{об} = \frac{1}{4} \left[1 + \Phi \left(\frac{\delta\theta}{\sqrt{2}\sqrt{\sigma_{\theta 1}^2 + \sigma_{\theta 2}^2}} \right) \right] \times \left[1 + \Phi \left(\frac{\delta r}{\sqrt{2}\sqrt{\sigma_{r 1}^2 + \sigma_{r 2}^2}} \right) \right],$$

де $\Phi(x)$ – інтеграл імовірностей; $\delta\theta$ і δr – роздільні здатності за азимутом та дальністю; $\sigma_{\theta 1}$ та $\sigma_{\theta 2}$ (та $\sigma_{r 2}$) – похибки вимірювання азимуту (дальності) первинної РЛС та системи РЛО відповідно.

Розрахунки за наведеним виразом представлені на рис. 1, де крива I відповідає $\sigma_{\theta 1} = 0,1\delta\theta$; $\sigma_{r 1} = 0,1\delta r$; крива II – $\sigma_{\theta 1} = 0,2\delta\theta$; $\sigma_{r 1} = 0,2\delta r$; крива III – $\sigma_{\theta 1} = 0,3\delta\theta$, $\sigma_{r 1} = 0,3\delta r$, а $k = \sigma_{\theta 2} / 0,1\delta\theta = \sigma_{r 2} / 0,1\delta r$. Наведені розрахунки показують, що для забезпечення прийнятної якості об'єднання інформації первинної РЛС і системи РЛО необхідно, щоб точність вимірювання координат ПЦ первинною РЛС в чотири рази перевищувала точність визначення координат системою РЛО.

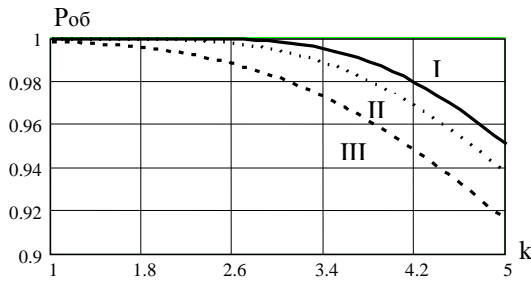


Рис. 1. Імовірність об'єднання інформації первинного і вторинного каналів

Розглянемо методику оцінювання якості опізнання для другого випадку. Будемо вважати, що первинні РЛС проводять огляд заданої області простору з деяким періодом оновлення інформації про цільову обстановку. Якщо в ОН системи опізнання з'являється відразу декілька об'єктів, через недостатню високу роздільну здатність системи РЛО неможливо однозначно прив'язати їх до ЦВ від інформаційного засобу. Для аналізу ефективності опізнання цілей розглянемо таку логіку опізнання виявлених цілей:

- первинна РЛС формує цільову обстановку в цілому в усій зоні відповідальності за поточний період огляду;

- зона відповідальності розбивається на декілька підзон, які не перекриваються. Кожна з них збігається з ОН системи РЛО з таким розрахунком, щоб охопити всі виявлені об'єкти;

- проводиться опізнання всіх ПЦ, які знаходяться в кожній підзоні. Для цього на кожну групу цілей видається одне ЦВ, яке і визначає конкретне розташування ОН dV в межах зони.

Таким чином, задача зводиться до прийняття рішення системою опізнання (при необхідності - разом з первинними РЛС) у поточному циклі опізнання по всім N цілям, які потрапили у визначений ОН dV. При цьому загальна кількість цілей в ОН в даному циклі огляду складається з N_c своїх та N_q чужих повітряних цілей.

З загального визначення імовірності правильного опізнання своїх P_{cc} і чужих P_{cq} цілей як умовних імовірностей прийняття "свого за свого" і "чужого за чужого" витікає:

$$P_{cc} = \frac{\bar{N}_{опс}}{\bar{N}_c}; \quad P_{cq} = \frac{\bar{N}_{опч}}{\bar{N}_q}, \quad (1)$$

де $\bar{N}_{опс}$, $\bar{N}_{опч}$ – математичне очікування кількості правильно опізнаних і прив'язаних до ЦВ своїх і чужих цілей в ОН, \bar{N}_c , \bar{N}_q – математичне очікування кількості своїх та чужих цілей в ОН.

З врахуванням (1), імовірність правильного опізнання своїх цілей можна представити у вигляді

$$P_{cc} = \frac{\bar{N}_{опс}}{\bar{N}_c} = \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} iP_{cc}(i, j)P(i, j) / \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} iP(i, j), \quad (2)$$

де $P_{cc}(i, j)$ – імовірність опізнання "свій приймається за свого" і правильної прив'язки мітки "свій" до ЦВ при рівно i своїх та j чужих цілях, пред'явлених до опізнання (поданих на вхід системи РЛО); $P(i, j)$ – імовірність пред'явлення рівно i своїх та j чужих цілей; i, j – кількість своїх та чужих цілей, пропонованих для опізнання.

Величину $P_{cc}(i, j)$ можна представити у вигляді

$$P_{cc}(i, j) = \frac{\bar{N}_{опс}(i, j)}{i} = \sum_{k=1}^i P_{опс}(k, j),$$

де $\bar{N}_{опс}(i, j)$ – математичне очікування кількості правильно опізнаних та прив'язаних до ЦВ своїх цілей при пред'явленні рівно i своїх та j чужих цілей; $k = 1, 2, \dots, i$ – поточна вихідна кількість опізнаних і прив'язаних до ЦВ своїх цілей; $P_{опс}(k, j)$ – імовірність опізнання і прив'язки до ЦВ рівно k своїх цілей при подачі на вхід системи РЛО рівно i своїх та j чужих цілей, яка чисельно дорівнює імовірності появи на виході системи РЛО рівно k опізнаних і прив'язаних своїх цілей при подачі на вхід системи РЛО рівно i своїх та j чужих цілей (диференціальна імовірність опізнання рівно k з i своїх цілей).

Отже, можна відзначити, що процес опізнання містить, як мінімум, три фази: 1) виявлення і вимірювання координат ПЦ системою РЛО; 2) селекція ПЦ; 3) прив'язка ПЦ до ЦВ, яка включає порівняння координат ПЦ, визначених системами первинної РЛС та РЛО, з наступною ідентифікацією виявленої ПЦ.

У загальному випадку кожна з фаз носить випадковий характер і може бути описана числовим параметром:

перша фаза – імовірністю вимірювання $P_{вим}$ ознаки цілі, за якою буде проводитися її селекція;

друга фаза – імовірністю селекції $P_{сел}$, яка характеризує здатність системи РЛО класифікувати цілі на свої і чужі за вимірюною в першій фазі ознакою;

третья фаза – імовірністю правильної прив'язки $P_{пр. прив.}$ ознаки „свій-чужий” до ЦВ (залежить від роздільної здатності системи РЛО).

Розглянемо особливості розрахунку відповідних ймовірностей.

В якості ознаки селекції або прив'язки цілей використовують, як правило, просторові координати. Для розрахунку $P_{вим}$ доцільно застосовувати математичну модель реального фізичного каналу з врахуванням зовнішніх і внутрішніх умов функціонування СО [3]. Таким же способом розраховується $P_{сел}$, причому при моделюванні системи РЛО необхідно враховувати як власні фізичні параметри селектора, так і алгоритми прийняття рішення "свій-чужий" системи РЛО в цілому.

Цільову обстановку в зоні огляду первинної РЛС рекомендується моделювати в дискретно-точ-

ковому імовірнісному уявленні з застосуванням пуассонівських законів розподілу. Для випадку незалежних випадкових пуассонівських просторових полів точок (де точками позначаються ПЦ, які необхідно опізнати), імовірність появи рівно i своїх та j чужих цілей в ОН визначається співвідношеннями:

$$P(i, j) = P(i)P(j); \quad P(i) = \frac{n_c^i e^{-n_c}}{i!}; \quad P(j) = \frac{n_q^j e^{-n_q}}{j!},$$

де $n_c = \bar{N}_c$, $n_q = \bar{N}_q$ – середні кількості своїх та чужих цілей, які знаходяться в розглянутому ОН, причому $n_c = a_c dV$, $n_q = a_q dV$; a_c, a_q – об'ємні щільності своїх та чужих цілей, обумовлені поточною тактичною ситуацією в зоні відповідальності.

За аналогією з (2), імовірність правильного опізнання чужих цілей можна представити у вигляді:

$$P_{чч} = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} j P_{чч}(i, j) P(i, j) / \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} j P(i, j),$$

або, враховуючи незалежність випадкових полів своїх і чужих цілей:

$$P_{чч} = \sum_{i=0}^{\infty} P(i) \sum_{j=1}^{\infty} j P_{чч}(i, j) P(j) / \sum_{i=0}^{\infty} P(i) \sum_{j=1}^{\infty} j P(j),$$

де i, j – індекси, що відносяться до своїх і чужих цілей; $P_{чч}(i, j)$ – імовірність правильного опізнання чужих цілей і прив'язки ознаки "чужий" до ЦВ при подачі на вхід системи РЛО рівно j чужих та i своїх цілей; $P(i), P(j)$ – імовірності появи рівно i своїх та j чужих цілей на вході системи РЛО.

Відзначимо також, що імовірність $P_{чч}$ і імовірність прийняти чужу ціль за свою $P_{чс}$ утворюють повну групу випадкових подій, звідки $P_{чс} = 1 - P_{чч}$.

Проведемо короткий аналіз ефективності каналу РЛО, об'єм невизначеності якого значно перевищує ОН первинного радіолокатора. В цьому випадку основним засобом опізнання є запитувач системи РЛО, суміщений з первинною РЛС. Радіолокаційній цілі присвоюється ознака "своя", якщо ціль відповіла на сигнал запиту і за просторовими координатами, визначеними системою РЛО, ціль ототожnilась з відміткою - цілевказуванням від первинної РЛС. При відсутності ознаки "своя" на виході системи РЛО повітряна ціль буде сприйнятий як "чужа". Таким чином, в системі РЛО вимірювач видає інформацію про просторові координати об'єкту, який відповідає (свій літак). На основі цих вимірювань цілі селектуються за просторовими координатами. Здатність з просторової селекції цілей характеризується об'ємом невизначеності dV системи опізнання. Таким чином, ОН системи РЛО можна назвати область простору, в кожній точці якого дальність та кутові координати повітряного об'єкту, виміряні системою РЛО, остаються незмінними.

Координати цілі вимірювач системи РЛО видає тільки в тому випадку, якщо система опізнання виявила ПЦ. Отже, імовірність визначення ознаки "свій", тобто видачі просторових координат цілі на виході запитувача при опізнанні свого літака $P_{вим.с}$, залежить від технічних рішень, прийнятих у системі РЛО, кількості запитувачів і відповідачів, які працюють у єдиному просторі і створюють внутрішньосистемні перешкоди досліджуваній системі РЛО, та наявності й інтенсивності навмисних корельованих і некорельованих завад [2].

Істотним параметром інформаційного каналу відповіді системи РЛО вважається його пропускна здатність – кількість відповідей $i_{кр}$, що можуть одночасно опрацьовуватися в одному ОН. Звичайно пропускна здатність становить лише одну відповідь, причому одночасний прихід двох і більше відповідей може призвести до їх взаємного спотворення і придушення сигналів відповіді, що виключає вимірювання координат цілей системою РЛО.

Розглянемо останню фазу процесу опізнання - прив'язку ознаки "свій-чужий" до цілевказування при перебуванні в ОН декількох цілей. В основному будемо орієнтуватися на алгоритм прив'язки, який використовує випадковий вибір (призначення) свого об'єкта із сукупності пред'явлених цілей.

При зазначених умовах часткові імовірності правильного опізнання своїх літаків становлять:

$$P_{cc}(1_c, 0_q) = P_{вим.с}; \quad P_{cc}(1_c, j_q) = P_{изм.с} \frac{1}{j+1};$$

$$P_{cc}(1_c, 0_q) = P_{изм.с} \quad P_{cc}(1_c, j_q) = P_{вим.с} \frac{1}{j+1};$$

$$P_{cc}(0_c, j_q) = P_{cc}(i_c > 1, j_q) = 0,$$

а інтегральна імовірність опізнання своїх літаків для пуассонівського поля цілей визначається зг

$$P_{cc} = P_{изм.с} \frac{n_c e^{-n_c}}{1 - e^{-n_c}} e^{-n_c} \sum_{j=0}^N \frac{n_q^j}{(j+1)!}, \quad (3)$$

де n_c, n_q – середня кількість своїх і чужих цілей, що знаходяться в ОН; N_q – кількість чужих цілей.

Результати розрахунку $P_{cc}(n_c, n_q)$ при різних співвідношеннях n_c та n_q наведені на рис. 2.

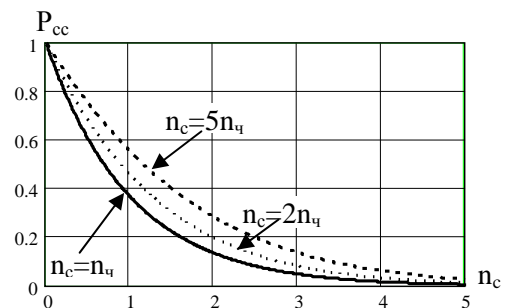


Рис. 2. Імовірність опізнання «своїх» ПЦ

З рис. 2 видно, що якість опізнання своїх цілей суттєво залежить від наявності „своїх” та „чужих” ПЦ в ОН. Для підвищення якості опізнання своїх цілей можливо запропонувати адаптивне управління ОН СО при використанні методів опізнання, заснованих на принципах обслуговування запитувачів чи мережі загалом.

Висновки

Вищерозглянуте дозволяє стверджувати, що при об'єднанні інформації первинного радіолокатору та системи РЛО можливо суттєвим чином знизити роздільну здатність системи РЛО (зробити її керованою) без істотного зменшення імовірності правильного опізнання ПЦ.

Список літератури

1. Теоретичні основи побудови заводозахищених систем інформаційного моніторингу повітряного простору / В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 271 с.
2. Обод І.І., Овсянников П.В., Булай А.Н. Обнаружение воздушных целей системой радиолокационного опознавания // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 3 (9). – С. 122-124.
3. Обод І.І. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. – М.: ЦНТИ, 1998. – 119 с.

Надійшла до редколегії 9.10.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.І. Обод, Національний технічний університет „ХПІ”, Харків.