

УДК 621.391.26

Х.А. Турсунходжаєв, В.О. Кошка

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## АЛГОРИТМ ТА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ОБ'ЄДНАННЯ АЗИМУТАЛЬНИХ І КУТОМІСЦЕВИХ КООРДИНАТ ЦІЛЕЙ В ТРІАНГУЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

Розглядається способи ототожнення кутових координат цілей в тріангуляційній системі локації. Стосовно їх знаходиться зв'язок ймовірностей правильного і хибного ототожнення кутових вимірів із структурою тріангуляційної системи, статистичними характеристиками первинних вимірів, а також взаємного розміщення пеленгаційних пунктів відносно об'єкту локації.

**Ключові слова:** пасивна радіолокація, тріангуляційний метод, ототожнення пеленгів.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Забезпечення військ достовірною і своєчасною інформацією про повітряну обстановку вимагає сумісного застосування як активних так і пасивних методів локації. Серед відомих методів пасивної локації найбільш економічним і доцільним являється тріангуляційний метод. При його використанні незалежність оцінюваних кутових координат призводить до виникнення хибних цілей при ототожненні пеленгів. Дублювання потоку інформації вимагає застосування алгоритмів об'єднання даних від джерел радіолокаційної інформації.

**Аналіз результатів останніх досліджень і публікацій.** Питання траскторної обробки радіолокаційної інформації розглянуті у роботах [1 – 3]. Представляє практичну корисність оцінювання умов використання алгоритмів об'єднання даних при тріангуляційному методі пасивної локації.

**Метою статті** є дослідження ефективності використання алгоритмів ототожнення пеленгів при застосуванні тріангуляційного методу пасивної локації.

### Основний матеріал

Існує ряд способів вирішення розглянутих проблем з метою зменшення потоку хибної інформації. Один із них заснований на використанні однієї з кутомісцевих координат, відомий під назвою «Метод два β плюс два ε» ( $2\beta + 2\varepsilon$ ). За відсутності надмірності кутових даних, для ототожнення пеленгів використовують азимутальні виміри 3-го пункту. Такий метод носить назву «Метод три β плюс ε» ( $3\beta + \varepsilon$ ).

Розглядають наступні показники якості ототожнення в тріангуляційній системі: ймовірності правильного і хибного ототожнення; дисперсія помилок оцінюваних просторових координат цілі.

Для оцінки розглянутих величин необхідно знати щільність ймовірності координатних складових по постановнику активних перешкод.

Розглянемо метод ( $2\beta + 2\varepsilon$ ). Відповідно йому, для кожної пари азимутальних оцінок ( $\hat{\beta}_{i1}$ ,  $\hat{\beta}_{j2}$ , тут і та j номер оціненого значення азимутальної координати в першому і другому пунктах відповідно) оцінюються проекції горизонтальної дальності ( $\hat{R}_{i1}$  і  $\hat{R}_{j2}$ ) на горизонтальну площу. Далі з урахуванням вимірних кутових значень ( $\hat{\varepsilon}_{i1}$ ,  $\hat{\varepsilon}_{j2}$ ) оцінюється значення висот ( $\hat{H}_{i1}$ ,  $\hat{H}_{j2}$ ). Це дозволяє сформувати координатні дані по постановнику активних перешкод. В випадку, коли різниця оцінок висот не перевищує деякого порогу, вважається, що розглянута точка перетину належить цілі. Якщо ж ця різниця більше порогу, то точка перетину приймається за хибну.

Значення порогу визначається похибками, що виникають при оцінці кутових координат. При відомих значеннях середньоквадратичного відхилення оцінок кутових координат ( $\sigma_{\varepsilon i1}$ ,  $\sigma_{\varepsilon j2}$ ) остаточно алгоритм ототожнення може бути записаний як [1]:

$$|\hat{H}_{i1} - \hat{H}_{j2}| \leq L \sqrt{(\hat{R}_{i1} \cdot \text{tg}(\sigma_{\varepsilon i1}))^2 + (\hat{R}_{j2} \cdot \text{tg}(\sigma_{\varepsilon j2}))^2}, \quad (1)$$

тут L – коефіцієнт, який вибирається з урахуванням потрібних значень ймовірностей правильного та хибного ототожнення розглянутих точок перетину.

В силу нелінійності зв'язків оцінюваної дальності до цілі з первинними кутовими вимірами, щільність ймовірності помилок по дальності відмінна від нормального закону. Аналогічно і алгоритм ототожнення (1) також передбачає нелінійний зв'язок з помилками первинних кутових вимірів. Перетворивши його до наступного виду, шляхом возведення в квадрат, алгоритм ототожнення матиме вид:

$$\gamma = (\hat{H}_{i1} - \hat{H}_{j2})^2 - L^2 \left[ (\hat{R}_{i1} \cdot \text{tg}(\sigma_{\varepsilon i1}))^2 + (\hat{R}_{j2} \cdot \text{tg}(\sigma_{\varepsilon j2}))^2 \right] \leq 0. \quad (2)$$

Для оцінки показників якості ототожнення необхідно знати закон розподілення випадкової величини  $\gamma$ . Щільність ймовірності для двох гіпотез (гіпотеза  $H_1$  – точка перетину істинна,  $H_2$  – точка перетину хибна), ймовірності правильного і хибного ототожнення знаходиться при заданому порозі (в розглянутому випадку поріг, рівний нулю) із співвідношень:

$$P_{\hat{\gamma}_i} = \int_{-\infty}^0 p_{H1}(\gamma)d(\gamma), \quad (3) \quad P_{\hat{\delta}_i} = \int_{-\infty}^0 p_{H2}(\gamma)d(\gamma). \quad (4)$$

Один із методів оцінки значень  $P_{\hat{\gamma}_i}$  і  $P_{\hat{\delta}_i}$  полягає в лінеаризації залежності  $\gamma$  від випадкових величин  $\hat{\beta}_{i1}, \hat{\beta}_{j2}, \hat{\varepsilon}_{i1}, \hat{\varepsilon}_{j2}$ . Це дозволить нормалізувати закони розподілу  $p_{H1}(\gamma)$  і  $p_{H2}(\gamma)$  та оцінити значення  $P_{\hat{\gamma}_i}, P_{\hat{\delta}_i}$  по відомій таблиці інтегралів ймовірностей.

Оцінку показників якості ототожнення пеленгів можна провести двома способами.

За першим способом, потрібно функцію  $\gamma$  розкласти в ряд Тейлора в точках, з вимірними значеннями. Ця процедура лінеаризує зв'язок величини  $\gamma$  з випадковими величинами  $\hat{\beta}_{i1}, \hat{\beta}_{j2}, \hat{\varepsilon}_{i1}, \hat{\varepsilon}_{j2}$ . Тобто випадкову величину  $\gamma$  можна представити як

$$\gamma = M + A(\hat{\beta}_{i1} - \hat{\beta}_{i1}) + B(\hat{\beta}_{j2} - \hat{\beta}_{j2}) + C(\hat{\varepsilon}_{i1} - \hat{\varepsilon}_{i1}) + D(\hat{\varepsilon}_{j2} - \hat{\varepsilon}_{j2}), \quad (5)$$

де  $M$  – значення  $\gamma$  в точках  $\hat{\beta}_{i1}, \hat{\beta}_{j2}, \hat{\varepsilon}_{i1}, \hat{\varepsilon}_{j2}$ ;

$$A = \partial\gamma / \partial\hat{\beta}_{i1}, \quad \text{ї дї} (\hat{\beta}_{i1} = \hat{\beta}_{i1}); \quad B = \partial\gamma / \partial\hat{\beta}_{j2}, \quad \text{ї дї} (\hat{\beta}_{j2} = \hat{\beta}_{j2}); \\ C = \partial\gamma / \partial\hat{\varepsilon}_{i1}, \quad \text{ї дї} (\hat{\varepsilon}_{i1} = \hat{\varepsilon}_{i1}); \quad D = \partial\gamma / \partial\hat{\varepsilon}_{j2}, \quad \text{ї дї} (\hat{\varepsilon}_{j2} = \hat{\varepsilon}_{j2}).$$

В зв'язку з незалежністю помилок по координатам, дисперсія величини  $\gamma$  дорівнює сумі дисперсій величин  $\hat{\beta}_{i1}, \hat{\beta}_{j2}, \hat{\varepsilon}_{i1}, \hat{\varepsilon}_{j2}$  з урахуванням коефіцієнтів, що представляють значення окремих похідних по відповідному параметру. При розрахунку дисперсії доданків  $\gamma$  слід мати на увазі наступне.

Випадкова величина  $\Delta\hat{\beta}_{i1} = (\hat{\beta}_{i1} - \hat{\beta}_{i1})$  – центруюча. Її математичне сподівання дорівнює нулю. Це ствердження справедливе і для решти складових  $\gamma$ .

Випадкові величини  $\Delta\hat{\beta}_{i1}, \Delta\hat{\beta}_{j2}, \Delta\hat{\varepsilon}_{i1}, \Delta\hat{\varepsilon}_{j2}$  незалежні між собою. Фактор випадковості зумовлений різноманітними РЛС. Виходячи з цього, дисперсія  $\gamma$  дорівнює сумі зважених значень дисперсій величин  $\Delta\hat{\beta}_{i1}, \Delta\hat{\beta}_{j2}, \Delta\hat{\varepsilon}_{i1}, \Delta\hat{\varepsilon}_{j2}$ . Іншими словами:

$$\ddot{A}_{\gamma} = A^2 \ddot{A}_{\hat{\beta}_{i1}} + B^2 \ddot{A}_{\hat{\beta}_{j2}} + C^2 \ddot{A}_{\hat{\varepsilon}_{i1}} + D^2 \ddot{A}_{\hat{\varepsilon}_{j2}}. \quad (6)$$

Виходячи з нормальності розподілу величин  $\Delta\hat{\beta}_{i1}, \Delta\hat{\beta}_{j2}, \Delta\hat{\varepsilon}_{i1}, \Delta\hat{\varepsilon}_{j2}$ , а також лінійності їх зв'язку з величиною  $\gamma$ , остання також розподілена за нормальним законом, з математичним сподіванням  $M$ .

Звідси закон розподілу  $\gamma$  має вид:

$$p(\gamma) = \left(1/\sqrt{2\ddot{A}_{\gamma}}\right) \cdot \exp\left(-(\gamma - M)^2 / (2\ddot{A}_{\gamma})\right). \quad (7)$$

Оцінка показників якості також може бути проведена шляхом статистичної оцінки подій правильної і хибної селекції, імітуючи роботу РЛС. Та-

кий спосіб передбачає:

- задання координат положення, наприклад, двох цілей у просторі;
- розрахунок істинних значень кутових координат  $\beta_{i1}, \beta_{j2}, \varepsilon_{i1}, \varepsilon_{j2}$  по цілям;
- імітація оцінок кутових координат за рахунок додавання до їх істинного значення випадкової невідомої величини, яка генерується датчиком випадкових чисел з заданою дисперсією, розподілених по нормальному закону;
- знаходження координат як істинних, так і хибних точок перетину пеленгів;
- визначення значення  $\gamma$  для даної вибірки і зрівняння її з порогом;
- багатократне звернення до датчика випадкових чисел дозволить оцінити розглянуті раніше ймовірності.

Для імітації випадкових впливів (для моделювання помилок виміру координат рухомих об'єктів, роботи різноманітних джерел інформації в умовах впливу перешкод і т.д.), необхідне формування великої кількості випадкових чисел. Їх кількість коливається в достатньо широких межах.

Далі будується модель випадкових вимірів кутових координат ПАП для фіксованих значень  $R$  – дальності та  $H$  – висоти цілей. Для кута місця розроблена наступна модель:

$$\hat{\varepsilon}_{i1} = \varepsilon_{i1} + \eta_{\varepsilon i1}, \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_{i1} = \beta_{i1} + \eta_{\beta i1}, \quad (9)$$

$$\hat{\beta}_{j2} = \beta_{j2} + \eta_{\beta j2}, \quad (10)$$

де  $\eta_{\varepsilon i1}, \eta_{\beta i1}, \eta_{\beta j2}$  – складові випадкових величин з заданою дисперсією, які розподілені за нормальним законом та генеруються датчиком випадкових чисел.

Кут місця може бути визначений згідно виразу:

$$\varepsilon_{i1} = \arctan(H_{i1} / R_{i1}). \quad (11)$$

Значення  $\beta_{i1}, \beta_{j2}$  знаходимо, вирішивши систему рівнянь:

$$\begin{cases} R_{i1} = \dot{A} \cos \beta_{j2} / \sin(\beta_{i1} - \beta_{j2}); \\ R_{j2} = \dot{A} \cos \beta_{i1} / \sin(\beta_{i1} - \beta_{j2}). \end{cases} \quad (12)$$

Потім за відомими нам співвідношеннями обчислюються значення  $\hat{R}_i, \hat{H}_j$  та підставляються в алгоритм ототожнення (1). Шляхом проведення  $N$  кількості дослідів оцінюється значення ймовірності ототожнення.

Проведений порівняльний аналіз двох методів оцінки показників якості показує, що оцінені значення ймовірностей коливаються в межах сотих величин.

Керуючись отриманими результатами можливо побудувати графік залежності ймовірності правильного ототожнення від положення цілі у просторі. Наприклад, для випадку, коли цілі рухаються паралельно базі на постійній висоті із параметром рівним 40 км, при  $L=1$  (рис. 1).

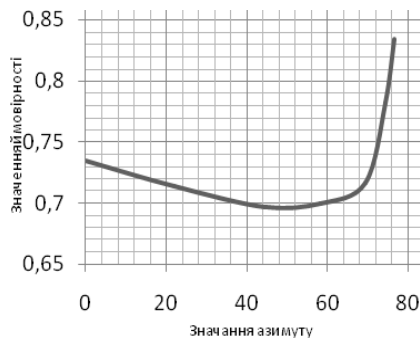


Рис. 1. Залежність ймовірності правильного ототожнення від положення цілі у просторі

Перейдемо до розгляду методу  $(3\beta + \varepsilon)$ . Відповідно йому, дані двох пунктів використовуються для одержання просторових координат цілі, наприклад  $\hat{\beta}_{i1}, \hat{\varepsilon}_{j1}$  - першого пункту і  $\hat{\beta}_{j2}$  - другого. Оцінене значення азимута третього пункту  $\hat{\beta}_{s3}$  використовується для ототожнення. Алгоритм об'єднання даних має вигляд [1]:

$$|\hat{\beta}_{s3} - \beta_{3p}| \leq L \sqrt{\sigma_{\beta s3}^2 + (\Delta\beta_{s3})^2}. \quad (13)$$

Тут  $\Delta\beta_{s3}$  - кутовий розмір області невизначеності, виникає за рахунок однократних оцінок. Розмір області невизначеності також залежить від віддалення точки перетину, щодо пунктів 1, 2 і значень середньоквадратичних відхилень  $\sigma_{\beta i1}, \sigma_{\beta j2}$ .

У випадку, коли нерівність (13) не задовольняється для обраного  $\hat{\beta}_{s3}$ , розглядається наступне значення азимутальної оцінки, отриманої в третій точці.

Разом з проведеними обчисленнями, при використуванні більше трьох пунктів прийому необхідно вибирати місце розташування пункту, використаного для ототожнення даних. Для досягнення цієї умови вибираємо пункт, для якого кут  $\beta_{3p}$  наближається до  $\pi/2$  або  $3\pi/2$ . В цьому випадку збільшується вірогідність ототожнення даних від двох пунктів прийому.

У разі, коли умова (13) виконується (на основі результатів ототожнення даних 1 і 2 пунктів), вва-

жається, що пеленги належать одній цілі. Після чого обчислюються дальності  $\hat{R}_{i1}, \hat{R}_{j2}$  та висот  $\hat{H}_{i1}, \hat{H}_{j2}$ .

Провівши оцінку показників якості даного методу ототожнення шляхом статистичної оцінки по раніше розглянутій методиці, побудуємо графік залежності ймовірності правильного ототожнення від положення цілі у просторі (ціль рухається в напрямку на 2-й пеленгаційний пункт з незмінним курсом рівним 135 градусів, на постійній висоті) при  $L=2$  (рис. 2).

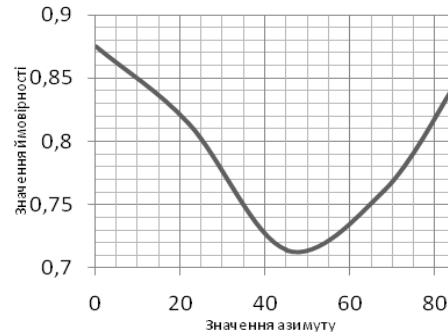


Рис. 2. Залежність ймовірності правильного ототожнення від положення цілі у просторі

## Висновки

За допомогою розглянутих вище методів можливо оцінити показники якості ототожнення пеленгів. Корегування коефіцієнту  $L$  дозволяє забезпечити потрібну якість ототожнення, яка в свою чергу також залежить від положення цілі у просторі.

## Список літератури

1. Войтович С.А. Траекторна обробка локаційної інформації: Навчальний посібник / С.А. Войтович, Х.А. Турсунходжаєв; За ред. Х.А. Турсунходжаєва. - 2-ге видання, допрацьоване. - Х.: ХУ ПС, 2008. - 112 с.
2. Турсунходжаєв Х.А. Теория цифровой обработки радиолокационной информации / Х.А. Турсунходжаєв. - Х.: ВИРТА, 1989. - 122 с.
3. Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. - М.: Сов. радио, 1974. - 432 с.

Надійшла до редколегії 25.03.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.О. Кузнецов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## АЛГОРИТМ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ОБЪЕДИНЕНИЯ АЗИМУТАЛЬНЫХ И УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Х.А. Турсунходжаев, В.О. Кошка

Рассматриваются способы отождествления угловых координат целей в триангуляционной системе локации. Относительно их находится связь вероятностей правильного и ошибочного отождествления угловых измерений со структурой триангуляционной системы, статистическими характеристиками первичных измерений, а также взаимного размещения пеленгационных пунктов относительно объекта локации.

**Ключевые слова:** пассивная радиолокация, триангуляционный метод, отождествление пеленгов.

## ALGORITHM AND QUALITY INDICES OF BEARINGS IDENTIFICATION WHILE TRIANGULATING IN PASSIVE RADIOLOCATION

K.A. Tursunhodzhaev, V.O. Koshka

The methods of identification the angular coordinates of the purposes in the triangulation location system. About their relationship is the probability of correct and incorrect identification of angular measurements to the structure triangulation system, the statistical characteristics of the primary measurements, and mutual accommodation bearing points relative to the object location.

**Keywords:** passive radiolocation, triangulation, bearings identification.