

УДК 621.391.26

Х.А. Турсунходжаєв, В.О. Кошка

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## АЛГОРИТМ ТА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Розглядається різницево-далекомірний метод визначення просторових координат джерела радіовипромінювання. Стосовно нього приведено дві методики оцінки показників якості визначення координат цілі, досліджено залежність цих показників якості від положення цілі у просторі.

**Ключові слова:** пасивна радіолокація, джерело радіовипромінювання, різницево-далекомірний метод, показники якості.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Поява протирадіолокаційних ракет і високоточної зброї значно знизило живучість активних радіолокаційних станцій. Тому забезпечення військ достовірною і своєчасною інформацією про повітряну обстановку вимагає сумісного застосування активно-пасивних методів локації.

Статистичні методи ототожнення радіолокаційної інформації від двох джерел передбачають наявність точнісних характеристик оцінок координат, які надходять від них на пункт третинної обробки.

Так як різницево-далекомірний метод пасивної локації є одним з найбільш перспективних і може бути використаний в пасивно-активних системах [1], необхідно розробити методику оцінки статистичних характеристик просторових координат цілей, вимірюваних даним методом, та дослідити яким чином вони залежать від положення цілі у просторі.

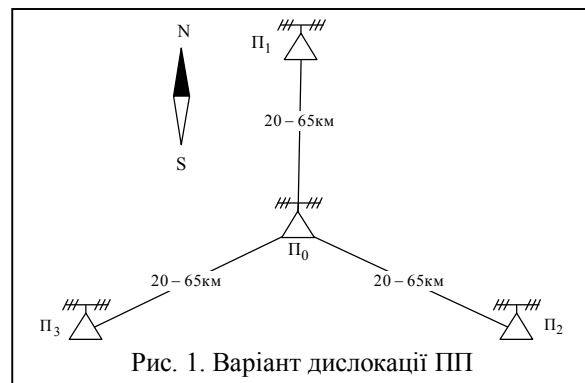
**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання третинної обробки радіолокаційної інформації розглянуті у роботах [1 – 3]. Представляє практичну користь оцінювання умов використання різницево-далекомірного методу.

**Метою статті** є розробка методики та дослідження точності виміру просторових координат джерела радіовипромінювання (ДРВ) за допомогою різницево-далекомірного методу пасивної локації.

### Основний матеріал

Проведемо аналіз алгоритму визначення просторових координат за вимірними різницями часу приходу сигналу від ДРВ для конкретної дислокації прийомних пунктів. Для цього симетрично розмістимо чотири приймальні пункти, далі ПП. Варіант їх дислокації показано на рис. 1. Задамо координати точок стояння ПП в декартовій системі:

$$\begin{aligned} \Pi_0(x_0, y_0, z_0) &= (0, 0, 0), \\ \Pi_1(x_1, y_1, z_1) &= (x_1, 0, 0), \\ \Pi_2(x_2, y_2, z_2) &= (-1/2x_1, y_2, 0), \\ \Pi_3(x_3, y_3, z_3) &= (-1/2x_1, -y_2, 0), \end{aligned} \quad (1)$$



де пункт  $\Pi_0$  є головним, вісь  $OX$  направлена на північ.

Сигнал, що випромінює ДРВ, фіксується в кожному з приймальних пунктів  $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  в моменти часу  $t_0, t_1, t_2, t_3$ . Потім вимірюються три різниці часу  $\Delta t_{0j} = t_0 - t_j, j = 1, 2, 3$  прийому сигналу парами антен, що утворюють вимірювальні бази ( $t_0$  – час прийому сигналу приймачем в головному пункті  $\Pi_0$ ), та визначаються різниці відстаней ходу сигналу від ДРВ до прийомних пунктів відносно головного:

$$\Delta r_{0j} = \Delta t_{0j} \cdot c, \quad (2)$$

де  $c$  – швидкість розповсюдження сигналу в атмосфері. Далі складають систему нелінійних рівнянь, що зв'язують шукані координати цілі ( $x_{ц}, y_{ц}, z_{ц}$ ) з координатами точок стояння ПП ( $x_j, y_j, z_j$ ) та вимірними різницями дальності  $\Delta r_{0j}, j = 1, 2, 3$ :

$$\begin{aligned} \Delta r_{0j} = & \sqrt{(x_j - x_{ц})^2 + (y_j - y_{ц})^2 + (z_j - z_{ц})^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_{ц})^2 + (y_0 - y_{ц})^2 + (z_0 - z_{ц})^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Другий доданок співвідношення (3) представляє собою дальність ( $r_{ц}$ ) до ДРВ відносно початку координат:

$$r_{ц} = \sqrt{(x_0 - x_{ц})^2 + (y_0 - y_{ц})^2 + (z_0 - z_{ц})^2}. \quad (4)$$

З урахуванням введеної  $r_{\text{ц}}$  співвідношення (3) можна представити в вигляді системи рівнянь [4].

$$\begin{aligned} x_{\text{ц}}(x_j - x_0) + y_{\text{ц}}(y_j - y_0) + z_{\text{ц}}(z_j - z_0) = \\ = 1/2(B_{0j}^2 - \Delta r_{0j}^2) - \Delta r_{0j} \cdot r_{\text{ц}}, j = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $B_{0j}$  – значення відстані (бази) від головного до інших ПП. З врахуванням співвідношень (1) значення баз рівні і дорівнюють  $B = \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2}$ .

Якщо підставити в систему рівнянь (5) координати пунктів прийому (1), зможемо привести її до наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{1/2(B^2 - \Delta r_{01}^2) - \Delta r_{01} \cdot r_{\text{ц}}}{x_1} = x_{\text{ц}}, \\ \frac{(1/2(B^2 - \Delta r_{02}^2) - \Delta r_{02} \cdot r_{\text{ц}}) - x_{\text{ц}}x_2}{y_2} = y_{\text{ц}}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$x_{\text{ц}}x_3 + y_{\text{ц}}y_3 - (1/2(B^2 - \Delta r_{03}^2) - \Delta r_{03} \cdot r_{\text{ц}}) = 0.$$

Далі знаходиться рішення системи лінійних рівнянь (6) відносно невідомого  $r_{\text{ц}}$ :

$$r_{\text{ц}} = \frac{0.5 \cdot (3B^2 - \Delta r_{01}^2 - \Delta r_{02}^2 - \Delta r_{03}^2)}{\Delta r_{01} + \Delta r_{02} + \Delta r_{03}}. \quad (7)$$

Звідси, знаючи час затримки приходу сигналу й бази між ПП, можливо знайти чому дорівнює  $r_{\text{ц}}$ , а потім визначити значення координат  $x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}$ .

Далі з формули (4) знаходимо висоту ДРВ:

$$z_{\text{ц}} = \sqrt{r_{\text{ц}}^2 - x_{\text{ц}}^2 - y_{\text{ц}}^2}, \quad (8)$$

одночасно з цим можливо визначити напрямок (азимут) на нього:

$$\beta_{\text{ц}} = \arctg(y_{\text{ц}}/x_{\text{ц}}). \quad (9)$$

В результаті маємо алгоритм, що дозволяє оцінювати одночасно як декартові, так і полярні координати ДРВ.

Для оцінки якості радіолокаційної інформації (РЛІ) отриманої даним методом було проведено оцінку статистичних характеристик визначення просторових координат ДРВ. В силу нелінійності зв'язків оцінюваних координат з первинними вимірами (часові затримки приходу сигналу) для вирішення цієї задачі були використані методи лінеаризації та статистичного моделювання на ЕВМ. Представимо випадкові величини  $x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}, z_{\text{ц}}, r_{\text{ц}}, \beta_{\text{ц}}$ , показники якості яких треба оцінити, у вигляді випадкової величини  $\gamma$ . Один із методів полягає в лінеаризації залежності  $\gamma$  від випадкових величин  $\Delta r_{01}, \Delta r_{02}, \Delta r_{03}$ . Для цього функцію  $\gamma$  потрібно розкласти в ряд Тейлора в точках з вимірними значеннями, тобто представити в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \gamma = M + A_1(\Delta r_{01} - \bar{\Delta r}_{01}) + \\ + A_2(\Delta r_{02} - \bar{\Delta r}_{02}) + A_3(\Delta r_{03} - \bar{\Delta r}_{03}), \end{aligned} \quad (10)$$

де  $M$  – значення  $\gamma$  при  $\Delta r_{0j} = \bar{\Delta r}_{0j}$  в точках  $\bar{\Delta r}_{01}, \bar{\Delta r}_{02}, \bar{\Delta r}_{03}$ ;  $A_j = \partial\gamma / \partial\Delta r_{0j}$ .

При розрахунку дисперсії слід мати на увазі:

- випадкові величини  $\delta r_{0j} = \Delta r_{0j} - \bar{\Delta r}_{0j}$  центруючі. Їх математичне сподівання дорівнює нулю,
- випадкові величини  $\delta r_{0j}$  залежні між собою.

$$D_{\gamma} = 2c^2 (A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_1A_2 + A_1A_3 + A_2A_3) \sigma_{\tau}^2. \quad (11)$$

При цьому мається на увазі, що точність вимірювання часу затримки в кожному ПП однакова, її середньоквадратичне відхилення дорівнює  $\sigma_{\tau}$ . Таким чином, коли  $\gamma$  представляє собою дальність до ДРВ (7), оцінка показників якості проводиться наступним чином. Для вибраної точки у просторі розраховуються значення похідних  $(A_1, A_2, A_3)$  і далі задавшись значенням  $\sigma_{\tau}$  розраховується дисперсія помилок по дальності. Змінюючи положення ДРВ у просторі можливо отримати сімейство залежностей дисперсії.

Для оцінки якості РЛІ можливо також скористатись методом статистичного моделювання на ЕВМ. Він передбачає формування великої кількості випадкових чисел. За допомогою генератора випадкових чисел, які розподілені за нормальним законом, генеруються чотири незалежні послідовності з дисперсіями  $\sigma_{\tau}^2$ , середнім рівним нулю. Потім будуються послідовності, які представляють собою оцінені значення часу приходу сигналу в пункти  $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ :

$$\xi_i = \{\xi_{i1} + t_i, \xi_{i2} + t_i, \dots, \xi_{iN} + t_i\}. \quad (12)$$

Тут  $t_i$  – розраховуються відносно заданої точки положення ДРВ у просторі,  $\xi_i$  – генеровані числа генератором випадкових чисел,  $N$  – об'єм вибірки.

Далі відповідно алгоритму знаходяться часові затримки приходу сигналу відносно головного пеленгаційного пункту  $\Pi_0$ , розраховуються різниці відстаней та знаходяться оцінки випадкових величин  $\xi_{\text{ц}}, \xi_{\text{ц}}, \xi_{\text{ц}}, \xi_{\text{ц}}, \xi_{\text{ц}}$ . Шляхом проведення  $N$  кількості дослідів оцінюється їх середньоквадратичне відхилення за відомою формулою:

$$\sigma_{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\gamma - \bar{\gamma})^2}, \quad (13)$$

де  $\bar{\gamma}$  – середнє значення випадкової величини  $\gamma$  (математичне очікування).

Описані методи дозволяють провести оцінку роботи розглянутого алгоритму визначення просторових координат ДРВ, а саме дослідити за яких умов ефективність його роботи буде найбільшою.

Заодно можливо провести порівняльний аналіз цих методів. Для цього точність оцінки моменту приходу сигналу приймачами на ПП задамо рівною  $\sigma_t = 0.071 \mu\text{с}$  при  $B = 30 \text{ км}$ .

Спершу дослідимо як точність оцінки координат залежить від дальності до ДРВ в межах від 0 до 100 км. Розглянемо випадок коли ДРВ рухається повз головний ПП на висоті 2 км, з курсом  $60^\circ$ . За таких умов методи лінеаризації та статистичного моделювання видають однакові результати, які в залежності від положення ДРВ змінюються наступним чином:

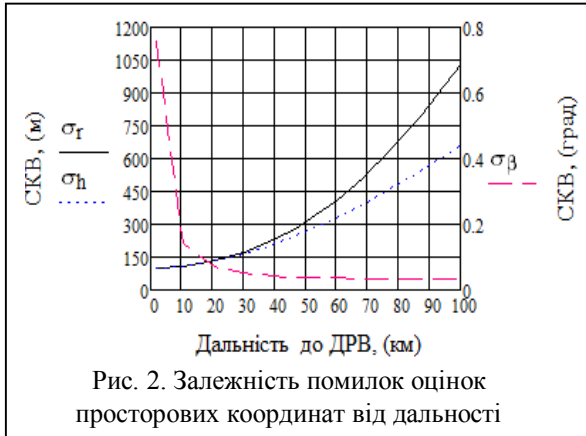


Рис. 2. Залежність помилок оцінок просторових координат від дальності

Графіки, зображені на рис. 2, показують, що зі збільшенням дальності до цілі середньоквадратичне відхилення по дальності збільшується. Водночас покращується точність оцінки азимутальної координати. При цьому практично зберігається роздільна здатність ДРВ в просторі.

Проведемо ще один дослід який покаже: як якість оцінюваної РЛІ залежить від положення ДРВ відносно головного ПП? Задамо відповідні умови. Наша ціль рівновіддалено рухається повз головний ПП на відстані 60 км з висотою 2 км. Таким чином напрямок на неї змінюється від 0 до  $120^\circ$ .

При таких умовах методи лінеаризації та статистичного моделювання також видають ідентичні оцінки показників якості вимірюваних координат, залежності яких показано на рис. 3.

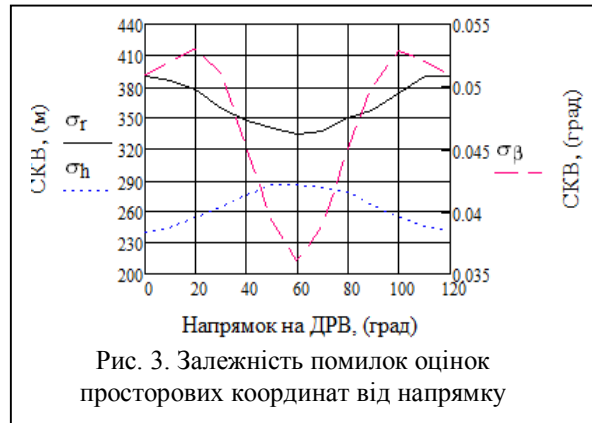


Рис. 3. Залежність помилок оцінок просторових координат від напрямку

### Висновки

Дослідження умов використання алгоритму визначення координат різницево-далекомірним методом показало, що не у всіх випадках він може забезпечити потрібну якість РЛІ. Тому дані отримані від пасивних джерел радіолокації, в основі роботи яких лежить цей алгоритм, доцільно було б об'єднувати з інформацією яка надходить від активних джерел локації. Створення багатопозиційних радіолокаційних систем, в яких будуть поєднуватися активний і пасивний режими роботи, дозволить компенсувати їх недоліки, таким чином підвищити інформативність системи ППО.

### Список літератури

1. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512.
2. Траскторна обробка локаційної інформації: Навчальний посібник / С.А. Войтович, Х.А. Турсунходжаєв / За ред. Х.А. Турсунходжаєва. – Х.: ХУПС, 2008. – 112 с.
3. Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1974. – 432 с.
4. Сайбель А.Г., Вайгель К.И., Михайлов М.И. Дальномерно-разностно-дальномерный способ определения координат источника радиоизлучения и реализующее его устройство. Патент РФ 2363010 от 06.06.2007.

Надійшла до редколегії 1.04.2013

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

### АЛГОРИТМ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Х.А. Турсунходжаев, В.О. Кошка

Рассматривается разностно-дальномерный метод определения пространственных координат источника радиоизлучения. Относительно него приведены две методики оценки показателей качества определения координат цели, исследована зависимость этих показателей качества от положения цели в пространстве.

**Ключевые слова:** пассивная радиолокация, источник радиоизлучения, разностно-дальномерный метод, показатели качества.

### ALGORITHM AND QUALITY DETERMINE THE SPATIAL COORDINATES OF RADIO SOURCES

K.A. Tursunhodzhaev, V.O. Koshka

Considered path-difference method for determining the spatial coordinates of the radio source. For it has developed two methods for estimating the quality positioning of the air facility, investigated dependence of the quality of the position of the target in space.

**Keywords:** passive radar, radio source, path-difference method, quality.