

УДК 621.396

Б.А. Лісогорський, І.А. Таран, Г.В. Худов

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ОЦІНКА ПОТЕНЦІЙНОЇ ТОЧНОСТІ ТРАЄКТОРНИХ ВИМІРЮВАНЬ В БАГАТОПОЗИЦІЙНІЙ СИСТЕМІ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ КОНТРБАТАРЕЙНОЇ БОРОТЬБИ

В роботі для підвищення точності траєкторних вимірювань цілей в радіолокаційній станції контрбатареї боротьби запропоновано використання багатопозиційної системи радіолокаційних станцій. Проведена оцінка потенційної точності траєкторних вимірювань в багатопозиційній системі радіолокаційних станцій контрбатареї боротьби. Проведено порівняльний аналіз кореляційної матриці точності при однопозиційному прийомі та використанні багатопозиційної системи радіолокаційних станцій контрбатареї боротьби.

Ключові слова: радіолокаційна станція, контрбатареїна боротьба, кореляційна матриця помилок, траєкторні вимірювання, кочівний міномет, координати.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Досвід участі Збройних Сил (ЗС) України в антитерористичній операції свідчить про використання противником тактики кочівних мінометів [1]. При цьому вогневі позиції обладнуються поруч з житловими будинками [1]. Розвідка вогневих позицій кочівних мінометів може здійснюватися декількома способами [1-3]:

- повітряна та космічна розвідка;
- звукова розвідка;
- наземна радіолокаційна розвідка;
- оптична розвідка;
- фізична розвідка (засилання розвідників або використання агентури).

Але найбільш ефективним способом розвідки вогневих позицій кочівних мінометів є використання радіолокаційних станцій (РЛС) контрбатареїної боротьби (КББ) [4].

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Аналіз потенційної точності методів визначення координат об'єктів проводився в роботах [5-8] при визначенні координат повітряних цілей радіолокаційними засобами розвідки повітряного противника, в роботі [9] при визначенні координат космічних об'єктів та в роботах [10, 11] при визначенні координат джерел сейсмічних збурень. Основні підходи, запропоновані в роботах [5-11], можливо застосувати для оцінювання потенційної точності визначення позицій стріляючих вогневих засобів РЛС КББ. В той же час вирішення цієї задачі має певну специфіку, що потребує розробки відповідної методики. Проведені дослідження вказали на необхідність послідовного вирішення двох завдань: спочатку необхідно оцінити потенційну точність вимірювання координат снаряду (міни) на траєкторії польоту в залежності від точності первинних вимірювань та

просторової структури угруповання станцій прийому (далі – приймачів) РЛС КББ, після цього необхідно оцінити точність визначення координат позицій вогневих засобів з використанням результатів, отриманих при вирішенні першого завдання.

Мета статті – розробити методику оцінки потенційної точності траєкторних вимірювань в багатопозиційній системі РЛС КББ.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Точність вимірювання координат позиції вогневого засобу противника артилерійським розвідувальним комплексом (типу «Зоопарк», «Зоопарк-1», АН/ТРQ-48) буде залежати від точності вимірювань комплексом координат снаряда (міни) на траєкторії польоту (далі – від точності траєкторних вимірювань). Ця точність може бути підвищена шляхом застосування багатопозиційної локації. Запропонована методика визначення потенційної точності траєкторних вимірювань, з використанням якої проведені відповідні розрахунки при використанні як одного, так і декількох засобів комплексу.

Нехай снаряд чи міна в момент часу t_c знаходиться на траєкторії польоту в точці С з координатами (x_c, y_c, z_c) . (рис. 1). Радіолокаційний сигнал приймається приймачами комплексу, розташованими в точках A_i з координатами (x_i, y_i, z_i) , $i=1, \dots, N$, де N – загальна кількість приймачів комплексу (рис. 1). Розглянемо випадок, коли приймачі синхронізовані в часі, тобто вимірювання всіма приймачами здійснюються одночасно в момент часу t_c . В результаті спостережень на кожному з N приймачів вимірюється азимут α_i , кут місця β_i та похила дальність D_i до джерела сигналу (снаряду чи міни). Маємо вибірку незалежних вимірювань або вектор спостережень, який надаємо в вигляді (1):

$$U = (\alpha_1, \beta_1, D_1, \alpha_2, \beta_2, D_2, \dots, \alpha_N, \beta_N, D_N)^T, \quad (1)$$

де елементи вектора спостережень можна визначити як (рис. 1):

$$\alpha_i = \arctg \frac{y_c - y_i}{x_c - x_i}, \quad (2)$$

$$\beta_i = \arctg \frac{z_c - z_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}}, \quad (3)$$

$$D_i = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}. \quad (4)$$

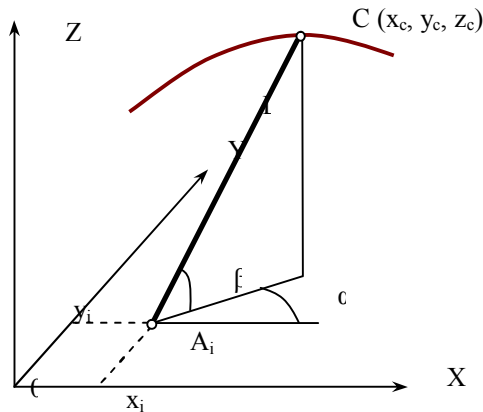


Рис. 1. Визначення елементів вектору спостережень

В результаті проведення траекторних вимірювань визначається вектор траекторних вимірювань $\xi = (x_c, y_c, z_c)$. При цьому помилки визначення елементів вектору ξ залежать від помилок траекторних вимірів:

$$\begin{cases} \Delta\alpha_i \approx \left(\frac{\partial\alpha_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial\alpha_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial\alpha_i}{\partial z_c} \delta z_c \right) \\ \Delta\beta_i \approx \left(\frac{\partial\beta_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial\beta_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial\beta_i}{\partial z_c} \delta z_c \right) \\ \Delta D_i \approx \left(\frac{\partial D_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial D_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial D_i}{\partial z_c} \delta z_c \right) \end{cases}, \quad (5)$$

Вираз (5) перепишемо у матричному вигляді таким чином:

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \Delta\beta_1 \\ \Delta D_1 \\ \Delta\alpha_2 \\ \dots \\ \Delta D_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial\alpha_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\beta_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial D_1}{\partial x_c} & \frac{\partial D_1}{\partial y_c} & \frac{\partial D_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\alpha_2}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial z_c} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial D_N}{\partial x_c} & \frac{\partial D_N}{\partial y_c} & \frac{\partial D_N}{\partial z_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta x_c \\ \delta y_c \\ \delta z_c \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Введемо такі позначення:

$$F_\Delta = \begin{pmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \Delta\beta_1 \\ \Delta D_1 \\ \Delta\alpha_2 \\ \dots \\ \Delta D_N \end{pmatrix}, \quad \Delta_c = \begin{pmatrix} \delta x_c \\ \delta y_c \\ \delta z_c \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial\alpha_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\beta_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial D_1}{\partial x_c} & \frac{\partial D_1}{\partial y_c} & \frac{\partial D_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\alpha_2}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial z_c} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial D_N}{\partial x_c} & \frac{\partial D_N}{\partial y_c} & \frac{\partial D_N}{\partial z_c} \end{pmatrix}$$

Матриця B має розмірність $(m \times 3)$, де m - число незалежних вимірювань.

Після диференціювання рівнянь (2) – (4) по x_c , y_c і z_c , відповідно, отримуємо вирази:

$$\frac{\partial\alpha_i}{\partial x_c} = \frac{y_c - y_i}{\left(1 + \frac{(y_c - y_i)^2}{(x_c - x_i)^2}\right) \cdot (x_c - x_i)^2},$$

$$\frac{\partial\alpha_i}{\partial y_c} = \frac{1}{\left(1 + \frac{(y_c - y_i)^2}{(x_c - x_i)^2}\right) \cdot (x_c - x_i)},$$

$$\frac{\partial\alpha_i}{\partial z_c} = 0,$$

$$\frac{\partial\beta_i}{\partial x_c} = \frac{(x_c - x_i)(z_c - z_i)}{\left(1 + \frac{(z_c - z_i)^2}{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}\right)} \times$$

$$\frac{1}{((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2)^{3/2}},$$

$$\frac{\partial\beta_i}{\partial y_c} = \frac{(y_c - y_i)(z_c - z_i)}{\left(1 + \frac{(z_c - z_i)^2}{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}\right)} \times$$

$$\frac{1}{((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2)^{3/2}},$$

$$\frac{\partial\beta_i}{\partial z_c} = \frac{1}{1 + (z_c - z_i)^2 / \left((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2\right)} \times$$

$$\frac{1}{\left(\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}\right)^{-1}},$$

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_c} = \frac{x_c - x_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}}$$

$$\frac{\partial D_i}{\partial y_c} = \frac{y_c - y_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}}$$

$$\frac{\partial D_i}{\partial z_c} = \frac{z_c - z_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}}$$

Рівняння (6) с урахуванням (7) перепишемо в наступному вигляді (8):

$$F_{\Delta} = B \Delta_c \quad (8)$$

Після перемноження лівої і правої частини рівняння (8) на транспоновані цим частинам матриці і взяття середнього результату отримуємо:

$$\overline{F_{\Delta} F_{\Delta}^T} = \overline{B \Delta_c (B \Delta_c)^T},$$

$$\overline{F_{\Delta} F_{\Delta}^T} = \overline{B \Delta_c \Delta_c^T B^T}.$$

Позначимо через K_r – кореляційну матрицю ($m \times m$) помилок вимірювань азимутів, кутів місця та похильних дальностей:

$$K_r = \overline{F_{\Delta} F_{\Delta}^T}.$$

При незалежних вимірюваннях та використанні однакових приймачів ця матриця буде діагональною і мати наступний вигляд:

$$K_r = \begin{pmatrix} \sigma_{\alpha}^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_D^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\alpha}^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_D^2 \end{pmatrix},$$

де σ_{α} , σ_{β} , σ_D – середньоквадратичні відхилення помилок вимірювання приймачами, відповідно, азимуту, куту місця, та нахильної дальності.

Позначимо через $K_c(3 \times 3)$ – кореляційну матрицю помилок визначення вектора траєкторних вимірювань ξ :

$$K_c = \overline{\Delta_c \Delta_c^T}.$$

Із врахуванням введених позначень отримуємо рівняння (9):

$$K_r = B K_c B^T \quad (9)$$

В рівнянні (9) матриця B являється прямокутною розмірності ($m \times 3$), що ускладнює безпосереднє знаходження матриці K_c . Для подолання вказаних

труднощів перемножимо обидві частини рівняння (9) з лівої сторони на B^T , а з правої на B . Отримаємо (10):

$$B^T K_r B = B^T B K_c B^T B \quad (10)$$

Зауважимо, що в правій частині рівняння (10) отримана квадратна матриця $(B^T B)$ розмірності (3×3).

Після перемноження обох частин рівняння (10) з лівої і правої сторони на матрицю $(B^T B)^{-1}$, обернену $(B^T B)$, отримуємо:

$$\begin{aligned} (B^T B)^{-1} B^T K_r B (B^T B)^{-1} = \\ (B^T B)^{-1} B^T B K_c B^T B (B^T B)^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

С урахування того, що

$$(B^T B)^{-1} (B^T B) = I,$$

де I – одинична матриця, знайдемо рівняння для розрахунку кореляційної матриці помилок визначення вектору траєкторних вимірювань (вираз (12)):

$$K_c = (B^T B)^{-1} B^T K_r B (B^T B)^{-1} \quad (12)$$

Розрахунки проведемо для двох варіантів побудови угруповання приймачів РЛС КББ. Перший варіант (рис. 2):

- кількість приймачів РЛС КББ $N=3$;
- координати точки траєкторії, для якої оцінювалась точність: $x_c=2$ км, $y_c=2$ км, $z_c=2$ км;
- координати приймачів: $x_1=2$ км, $x_2=1$ км, $x_3=3$ км; $y_1=1$ км, $y_2=1$ км, $y_3=1$ км;
- значення середньоквадратичних відхилень вимірювань: $\sigma_{\alpha}=0,3^\circ$, $\sigma_{\beta}=0,3^\circ$, $\sigma_D=10$ м.

Другий варіант відрізняється від першого наявністю тільки одного приймача, розташованого в точці A_1 (рис. 2).

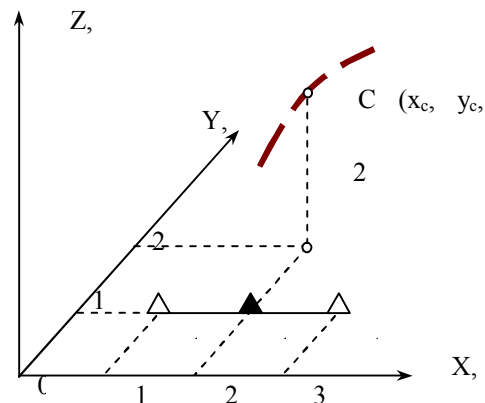


Рис. 2. Вихідні дані для розрахунків

В результаті розрахунків за виразом (12) отримані наступні кореляційні матриці помилок визначення вектору траєкторних вимірювань:

Для першого варіанту:

$$Kc = \begin{pmatrix} 699.994232 & 0.084743 & -0.048329 \\ 0.084743 & 256.147712 & -192.151649 \\ -0.048329 & -192.151649 & 192.914323 \end{pmatrix},$$

для другого варіанту:

$$Kc1 = \begin{pmatrix} 109.662277 & 0.099293 & -0.071216 \\ 0.099281 & 1875.963167 & -1423.975443 \\ -0.071199 & -1423.975443 & 1209.316960 \end{pmatrix}.$$

Таким чином, використання багатопозиційної системи РЛС КББ дозволяє підвищити потенційну точність траєкторних вимірювань угрупованням приймачів РЛС КББ. В наведеному прикладі продемонстровано підвищення точності траєкторних вимірювань при застосуванні багатопозиційної локації (застосуванні трьох приймачів замість одного).

Висновки і напрямки подальших досліджень

Таким чином, запропоновано для підвищення точності траєкторних вимірювань цілей в РЛС КББ використання багатопозиційної системи РЛС КББ. Проведена оцінка потенційної точності траєкторних вимірювань в багатопозиційній системі РЛС КББ.

У подальшому необхідно провести оптимізацію геометричної побудови багатопозиційної системи РЛС КББ на місцевості.

Список літератури

1. Худов Г.В. Радиолокаційні засоби розвідки позицій кочівних мінометів / Г.В.Худов, Б.А.Лисогорський, В.Я.Борульнич // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2014. – № 3 (39). – С. 68–72.
2. Мусиенко А. Опыт боевого применения минометов / А.Мусиенко. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://fastmarksman.ru/1_pyt/2_spechnaz_8.php.

3. Красюк О.П. Розвідувальне забезпечення артилерії в локальних війнах та збройних конфліктах кінця ХХ – початку ХХІ століття / О.П.Красюк // Військово-науковий вісник Академії Сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного. – 2012. – Вип. 18. – С. 339–347.

4. Худов Г.В. Аналіз характеристик радіолокаційних станцій контрбатареїної боротьби // Г.В. Худов, Б.А. Лисогорський / Системи озброєння і військова техніка, 2014. – Х.: ХУПС. – № 4 (40). – С. 50-54.

5. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

6. Черняк В.С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе ММО РЛС / В.С. Черняк // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – №8. – С. 29 – 46.

7. Дудуи А.С. Определение пространственных координат целей в многопозиционных радиолокационных системах на основе ММО РЛС / А.С.Дудуи // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 5 (112). – С. 29-33.

8. Седишев Ю.М. Об'єднання РЛС метрового діапазону хвиль в багатопозиційній радіолокаційній системі / Ю.М.Седишев, А.С.Дудуи // Наука і техніка Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – № 3 (12). – С. 83-88.

9. Березина С.И. Оценка ошибок определения местоположения сейсмического источника с использованием имитационного статистического моделирования / С.И.Березина, И.А.Таран // Восточный европейский журнал передовых технологий. – Вип. 4 (4)., 2003. – С. 13-15.

10. Таран И.А. Оценка потенциальной точности совместного определения координат источника сейсмических возмущений и скорости распространения сейсмической волны сейсмическими разведывательно-сигнализационными приборами / И.А.Таран // Збірник наукових праць ХВУ. – Вип.3(46), 2003. – С. 84-86.

11. Пастушенко Н.С. Совершенствование методов определения местоположения сейсмического источника / Н.С.Пастушенко, А.И.Солонец, И.А.Таран // Системи обробки інформації / Х.: ХВУ, 2004. – Вип..10 (37). – 248 с.

Надійшла до редколегії 24.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Васюта, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ КОНТРБАТАРЕЙНОЙ БОРЬБЫ

Б.А. Лисогорский, И.А.Таран, Г.В. Худов

В работе для повышения точности траекторных измерений целей в радиолокационной станции контрбатареїной борьбы предложено использование многопозиционной системы радиолокационных станций. Проведена оценка потенциальной точности траекторных измерений в многопозиционной системе радиолокационных станций контрбатареїной борьбы. Проведен сравнительный анализ корреляционной матрицы точности при однопозиционном приеме и использовании многопозиционной системы радиолокационных станций контрбатареїной борьбы.

Ключевые слова: радиолокационная станция, контрбатареїная борьба, корреляционная матрица ошибок, траекторные измерения, кочующий миномет, координаты.

EVALUATION OF POTENTIAL ACCURACY OF TRAJECTOR MEASUREMENTS IN MULTIPOSITION SYSTEM OF RADAR LOCATION STATIONS OF COUNTER-BATTERY STRUGGLE

B.A. Lisogorskiy, I.A. Taran, G.V. Khudov

In order to improve the accuracy of trajectory target measurements, a multi-position system of radar stations has been proposed in the radar station for counterbattery combat. The estimation of the potential accuracy of trajectory measurements in the multi-position system of radar stations of the counter-battalion fight was carried out. A comparative analysis of the correlation accuracy matrix is performed for a single-point reception and use of a multi-position system of radar stations for counterbattery combat.

Keywords: radars, counterbattery fight, correlation error matrix, trajectory measurements, wandering mortar, coordinates.