

Киричук Ю. В.

## СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНІ ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТА В СИСТЕМІ ПРЯМОКУТНИХ КООРДИНАТ

Запропоновано оригінальний метод визначення координат об'єктів до нанесення їх на топографічні карти в прямокутній системі координат шляхом візування кутового положення об'єкта навігаційною системою (комплексом) з рухомого носія та отримано математичні вирази для розрахунку координат об'єкта в системі прямокутних координат на основі багаторазового вимірювання тільки однієї координати курсу.

**Ключові слова:** координата, об'єкт пошуку, носій, візування, математична модель, середньоквадратична похибка, система керування.

### 1. Вступ

Навігаційна безпека великим чином залежить від точності засобів та методів вимірювання механічних величин (кут, швидкість, прискорення та інші) інерціальних навігаційних систем (НС) сучасних рухомих об'єктів (вертольоти, безпілотні літальні апарати, аерокосмічні апарати та інші).

Сучасні рухомі об'єкти (РО) мають значно більші швидкості, на них діють значно більші перевантаження та неконтрольовані механічні збурення (удари, вібрації). Ці фактори призводять до зниження точності визначення координат об'єктів пошуку. Вимоги до точності визначення зазначених вище навігаційних параметрів інерціальних НС останнім часом значно зросли.

Тому забезпечення підвищення точності сучасних інерціальних навігаційних систем рухомих об'єктів і визначення координат об'єктів пошуку є найважливішою проблемою сучасності, вирішення якої забезпечує навігаційну безпеку держави.

### 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Навігаційна система або комплекс, встановлений на рухомому носії — вертольоті або літаку, має забезпечувати швидке виявлення та розпізнавання об'єктів на значній відстані та визначати кутові координати для точної прив'язки об'єкта у системі прямокутних координат (СПК).

Відомі роботи Малишева В. В., Ружицького Е. І. та ін. [1–11], в яких описуються статичні методи вимірювання кутових координат у системі СПК по двох координатах візування при точній прив'язці кожної з крапок у прямокутній системі координат. Якщо ж координати об'єкта вимірюються рухомою системою, виникають додаткові труднощі, що вимагають використання точних методів реєстрації координат об'єкта носія під час візування об'єкта пошуку, розроблення спеціальних алгоритмів розрахунку координат об'єкта.

**Метою роботи є дослідження методу та спрощеного алгоритму визначення координат об'єктів локації у СПК на підставі багаторазового вимірювання кута візування об'єкта за курсом з рухомого носія.**

При створенні сучасних бортових навігаційних систем спостереження з чутливими оптичними електронними

комплексами, призначених для вирішення задач пошуку об'єктів, виникають такі **задачі**, що вимагають:

- розробити методи та спрощені алгоритми визначення координат об'єктів у системі прямокутних координат (СПК) на основі вимірювання кутів візування об'єкта пошуку за курсом з рухомого носія, з траєкторією руху, що забезпечує багаторазове візування об'єкта;
- оцінити середньоквадратичні похибки візування, спричинені похибками датчиків кута системи керування НС і визначити вимоги до точності вимірювання датчиків кута.

### 3. Результати досліджень методу визначення координат об'єкту

Для визначення координат об'єкта у СПК використовується інформація, що надходить від НС і системи бортових навігаційних приладів (БНП) у бортових центральних обчислювальних машин. Система БНП дає змогу визначити положення носія НС і РО у СПК у будь-який момент часу, тобто видає інформацію  $x_B = x_B(t)$ ,  $y_B = y_B(t)$ , а НС визначає кути візування об'єкта, тобто його кутові координати щодо рухомої системи координат, пов'язаної з носієм. Для визначення координат об'єкта слід мати хоча б дві різні точки зчитування кутів візування, а відстань між цими точками — базу локації пеленгації — використати в якості відсутнього лінійного елемента обчислення координат.

Загальна ідея вирішення завдання прив'язки координат об'єкта у СПК полягає в наступному: нехай  $B_1$ ,  $B_2$  — точки візування на базі  $B_1B_2$ ;  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $x_2$ ,  $y_2$  — їх координати;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  — кути візування. Тоді  $X_{Ц}$ ,  $Y_{Ц}$  — координати, об'єкта (цілі) однозначно визначаються шляхом обчислень (рис. 1). Безпосередньо з геометричних співвідношень:

$$\begin{aligned} X_{Ц} &= x_2 + D_2 \cos \beta_2; \\ Y_{Ц} &= y_2 + D_2 \sin \beta_2, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $D_2$  — дальність  $B_2O$ .

На підставі теореми синусів, запишемо:

$$\frac{D_2}{\sin \alpha} = \frac{B}{\sin(\beta_1 - \beta_2)}, \quad B = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (2)$$

де  $B = B_1, B_2$  — лінійна база пеленгації, що може бути реалізована за допомогою траєкторії руху носія типу «віраж-∞».

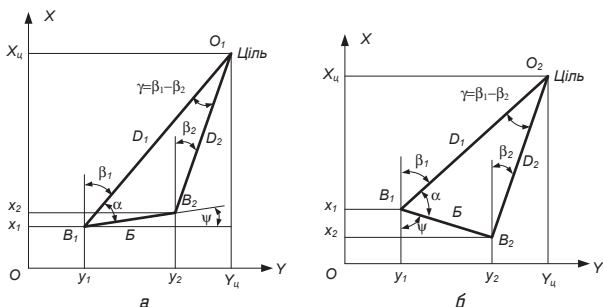


Рис. 1. Обчислення координат об'єкта у СПК: а — рух носія в напрямку  $B_1B_2$  до Цілі; б — рух носія в напрямку  $B_1B_2$  від Цілі

Звідси координати об'єкта пошуку у СПК визначаються за формулами:

$$X_{Ц} = x_2 + \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} [(y_2 - y_1) \cos \beta_1 - (x_2 - x_1) \sin \beta_1] \cos \beta_2, \quad (3)$$

$$Y_{Ц} = y_2 + \frac{1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)} [(y_2 - y_1) \cos \beta_1 - (x_2 - x_1) \sin \beta_1] \sin \beta_2.$$

Отже, на підставі отриманих виразів можна зробити такі висновки:

1. Вираз (3) — розв'язання задачі прив'язки координат нерухомого спостережуваного об'єкта в СПК за даними  $x_1, x_2, y_1, y_2, \beta_1, \beta_2$ , визначального положення точок візування та лінії візування. Отримані формули дають змогу отримати співвідношення, що визначають похибки прив'язки залежно від похибок даних.

2. Розв'язання аналогічної задачі у разі рухомого з певною швидкістю об'єкта є складнішим завданням, що вимагає спеціального дослідження. У загальному випадку, рух носія стосовно вимірюваного об'єкта дуже впливає на точність прив'язки як у динамічному (з описом руху об'єкта), так та у статистичному (з визначенням миттєвого положення об'єкта) варіантах розв'язання задачі.

Грубе оцінювання положення об'єкта можна отримати однією візирною точкою. Розглянемо такий випадок.

Нехай  $B$  — нерухома точка візування;  $O_1, O_2$  — два положення об'єкта, що рухається зі швидкістю  $V$  за час  $t$ . Тоді за теоремою синусів запишемо:

$$\frac{O_2 B}{\sin(\beta_2 - \beta_1)} = \frac{Vt}{\sin(\beta_2 - \beta_1)}; \quad O_2 B = \frac{Vt \cos \beta_1}{\sin(\beta_2 - \beta_1)};$$

$$x_2 = x_B + O_2 B \cos \beta_2 = x_B + \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\sin(\beta_2 - \beta_1)} Vt,$$

$$y_2 = y_B + \frac{\cos \beta_1 \sin \beta_2}{\sin(\beta_2 - \beta_1)} Vt.$$

Будемо розглядати питання точності розв'язання задачі прив'язки в системі СПК, виходячи з формул (5) для визначення координат об'єкта пошуку. Вважаючи вихідними функціональні залежності:

$$X_{Ц} = f(x_1, x_2, y_1, y_2, \beta_1, \beta_2);$$

$$Y_{Ц} = \phi(x_1, x_2, y_1, y_2, \beta_1, \beta_2),$$

і ґрунтуючись на лінійній теорії чутливості, отримаємо вираз для похибок координат, які обчислюватимемо за формулами:

$$\Delta X_{Ц} = f'_{x_1} \Delta x_1 + f'_{y_1} \Delta y_1 + f'_{x_2} \Delta x_2 + f'_{y_2} \Delta y_2 + f'_{\beta_1} \Delta \beta_1 + f'_{\beta_2} \Delta \beta_2;$$

$$Y_{Ц} = \phi'_{x_1} \Delta x_1 + \phi'_{y_1} \Delta y_1 + \phi'_{x_2} \Delta x_2 + \phi'_{y_2} \Delta y_2 + \phi'_{\beta_1} \Delta \beta_1 + \phi'_{\beta_2} \Delta \beta_2,$$

де  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_1, \Delta y_2, \Delta \beta_1, \Delta \beta_2$  — похибки вихідних даних;  $f'_{x_1}, f'_{y_1}, f'_{x_2}, f'_{y_2}, f'_{\beta_1}, f'_{\beta_2}, \phi'_{x_1}, \phi'_{y_1}, \phi'_{x_2}, \phi'_{y_2}, \phi'_{\beta_1}, \phi'_{\beta_2}$  — похідні функцій  $f$  і  $\phi$  по відповідній змінній.

Середньоквадратичне значення похибок визначення координат об'єкта по кожній з координат можна обчислити з виразів:

$$\sigma(x_{Ц}) = \sigma_B \frac{1}{\sin^2 \gamma} \sqrt{\sin^2 \gamma \sin^2(2\alpha + \gamma) + \sin^4 \alpha};$$

$$\sigma(y_{Ц}) = \sigma_B \frac{1}{\sin^2 \gamma} \sqrt{\sin^2 \gamma \cos^2(2\alpha + \gamma) + \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}.$$

Аналіз середньоквадратичних значень похибок методом моделювання проводився за умови зміни дальності  $D$  і бази  $B$  від 1000 м до 20000 м і точності знімання кутових координат  $\sigma = 0,1$  мрад ( $20''$ ),  $0,2$  мрад ( $41''$ ),  $0,3$  мрад ( $62''$ ). Результати розрахунків наведено на рис. 2, а — для  $\sigma(x_{Ц})$  та рис. 2, б — для  $\sigma(y_{Ц})$ .

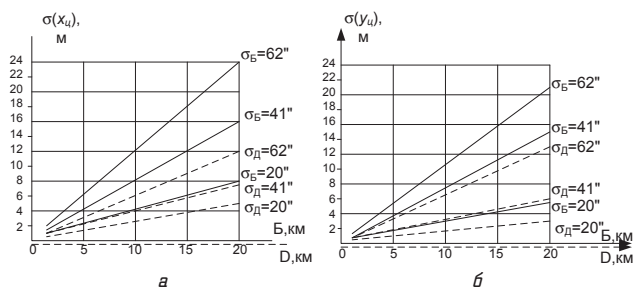


Рис. 2. Залежність середньоквадратичної похибки обчислення координат об'єкта в СПК від зміни дальності  $D$  і бази  $B$  при різних точності знімання кутових координат: а — середньоквадратична похибка  $\sigma(x_{Ц})$  по осі  $x$ ; б — середньоквадратична похибка  $\sigma(y_{Ц})$  по осі  $y$ ;  $D$  — дальність;  $B$  — база

Результати дослідження показують, що при точності визначення координат  $20''$  максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 5 м або  $0,025\%$  від дальності на відміну од відомих НС, у яких при точності визначення координат  $60''$  максимальна похибка визначення координат об'єкта не перевищує 12 м або  $0,06\%$  від дальності.

#### 4. Висновки

1. Запропоновано методику розрахунку координат об'єкта, яка полягає у вимірюваннях кутових координат візування тільки кутів курсу НС, встановленого на рухомому носії, вона спрощує алгоритм обчислення координат об'єкта пошуку, зменшує завантаження БЦОМ в 2–3 рази, але вимагає робити рух стосовно об'єкта за вибраним законом типу «віраж-∞».

2. Отримано вирази оцінювання середньоквадратичних похибок визначення координат об'єкта в СПК, які дозволили знизити вимоги до точності датчиків кута візування за курсом у 2 рази, чим знижено вартість НС і підвищено технологічність серійного виготовлення.

3. Отримано результати, які можна застосувати при розроблені нових оптичних приладів, встановлюваних на рухомих носіях для вимірювання координат об'єктів у СПК або в інших системах координат.

#### Література

1. Малков, М. А. Танковые прицелы и приборы наблюдения [Текст] / М. А. Малков. — М.: Военное издательство МО СССР, 1961. — 274 с.
2. Малышев, В. В. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов [Текст] / В. В. Малышев и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 311 с.
3. Безвесільна, О. М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів [Текст] / О. М. Безвесільна, Ю. В. Киричук, С. С. Ткаченко. — Житомир: ЖДТУ, 2010. — 174 с.
4. Мясоєдов, Г. Б. Проектирование навигационных систем управляющих комплексов [Текст] / Г. Б. Мясоєдов, В. М. Тимофеев. — Л., 1990. — 53 с.
5. Хомченко, А. Я. Система индикации положения линии визирования панорамного прибора наблюдения [Текст] / А. Я. Хомченко, И. В. Мазурин, В. И. Гордиенко, В. Н. Замосенчук // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2005. — № 1(14). — С. 42–45.
6. Гусев, Д. И. Оценка параметров системы определения взаимных координат перспективных самолетов при реализации режима группового самолетовождения [Электронный ресурс] / Д. И. Гусев // Электронный журнал «Труды МАИ». — М.: МАИ, 2011. — № 44. — Режим доступа: [www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24996](http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24996)
7. Биньковская, А. Б. Измерение координат подвижного объекта с помощью инерциальной навигационной системы [Текст] / А. Б. Биньковская // XIII міжнародна конференція з автоматичного управління (Автоматика-2006). — Вінниця: ВНТУ, 2006. — С. 265.
8. Петров, Н. Н. Системы и комплексы технических средств местоопределения подвижных объектов [Текст] / Н. Н. Петров // Специальная техника. — М., 1998. — № 3. — С. 7–11.
9. Буряга, А. В. Сравнительный анализ пассивных методов измерения дальности для малого беспилотного летательного аппарата [Электронный ресурс] / А. В. Буряга, В. М. Костю-

ков // Электронный журнал «Труды МАИ». — М.: МАИ, 2012. — Вып. № 53. — Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29624>

10. Прохорцов, А. В. Методы определения координат и скорости подвижных объектов с помощью спутниковых радионавигационных систем [Текст] / А. В. Прохорцов, В. В. Савельев // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2011. — № 2. — С. 264–274.
11. Roller, D. Model-based object tracking in monocular image sequences of road traffic scenes [Text] / D. Roller, Daniilidis Kostas, Nagel Hans-Hellmut // International Journal of Computer. — 1993. — Vision 10.3. — P. 257–281.

#### СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В СИСТЕМЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КООРДИНАТ

Предложен оригинальный метод определения координат объектов до нанесения их на топографические карты в прямоугольной системе координат путем визирования углового положения объекта навигационной системой (комплексом) с подвижного носителя и получены математические выражения для расчета координат объекта в системе прямоугольных координат на основе многократного измерения только одной координаты курса.

**Ключевые слова:** координата, объект поиска, носитель, визирование, математическая модель, среднеквадратичная погрешность, система управления.

*Киричук Юрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет», Україна, e-mail: kirichuky@email.ua.*

*Киричук Юрій Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра приборостроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический университет», Украина.*

*Kyrychuk Yuri, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: kirichuky@email.ua*

УДК 53.088.6:681.7.014.7:57.034(045)

Оникієнко Ю. Ю.

## МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ ВІДЕОКАМЕРИ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ КООРДИНАТ РУХУ БІООБ'ЄКТУ

*Представлено аналіз результатів визначення внутрішніх та зовнішніх параметрів відеокамери для кефалографічної системи. Виявлено критичний параметр, що впливає на безпосереднє визначення центру координат досліджуваного об'єкта. Розроблена методика калібрування відеокамер для кефалографічної системи, що базується на використанні плоского калібрувального об'єкта у вигляді шахової дошки.*

**Ключові слова:** кефалографічна система, процедура калібрування, сумарна дисторсія, модель камери, калібрувальний об'єкт.

### 1. Вступ

Сучасні системи технічного зору та відео датчики являються одним з найбільш ефективних інструментів в задачах безконтактного вимірювання біометричних параметрів тіла людини, геометричних розмірів об'єктів в просторі, виявлення різноманітних дефектів продукції тощо. При чому для вирішення таких задач можуть ви-

користуватись відносно недорогі цифрові відеокамери. Зазвичай, такі відеокамери по точності результатів не в змозі конкурувати зі спеціалізованою апаратурою, як наприклад для фотограмметрії, та незважаючи на це існує велике коло задач, де вони можуть успішно використовуватись.

Однією з таких задач є модифікація методики дослідження позних рефлексів людини — кефалографії [1].