

О. Бєляков, А. Колєнніков, В. Корольов, В. Макаревич
Національний університет «Львівська політехніка»

ОЦІНКА ТОЧНОСТИХ ВИМОГ ДО СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ НАЗЕМНИХ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ КООРДИНАТ ТОЧОК МІСЦЕВОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНИМ КОМПЛЕКСОМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

© Бєляков О., Колєнніков А., Корольов В., Макарович В., 2007

Приведен алгоритм и результаты априорной оценки точности определения координат ориентиров и целей для дальнейшего конструирования мобильных навигационных систем. Подчеркивается важность и необходимость использования данных систем при проведении антитеррористических и миротворческих операциях.

Algorithm and results of a priory accuracy of determination of coordinates of orientation points and targets for following constructing of mobile navigation systems is presented. It is underlined the importance and necessity of application of mentioned systems for implementation of antiterrorist and peace-making operations.

Постановка проблеми

Стримуючі дії миротворчих підрозділів на сьогоднішній момент являють собою один з основних факторів боротьби з незаконними озброєними формуваннями терористичних організацій. У той же час виконання миротворчої діяльності має досить багато проблем та не розв'язаних задач [1]. Однією з основних є всебічне забезпечення власного військового контингенту та організація безперервної гуманітарної допомоги цивільному населенню конфліктуючих сторін. Під час виконання цієї задачі основні зусилля миротворців полягають в організації охорони перевезень вантажів та оборони пересувань підрозділів та цивільного персоналу. Але, світовий досвід партизанської боротьби свідчить, що за допомогою засідок на шляхах пересування можливо малими силами нанести важке ураження протилежній стороні. Проблема полягає в тому, що сучасні військові засоби виявлення об'єктів та визначення їх координат розраховані на роботу зі стаціонарних позицій (крім систем, встановлених на бронетанковій техніці та спряжених з засобами ураження). А це означає, що під час маршу колони вантажівок миротворців, оперативно визначити координати об'єктів (цілей) при нападі, стає проблематичним. Що, безумовно, потребує вдосконалення існуючих та розробки новітніх засобів технічного забезпечення миротворців, а відтак не тільки підвищення безпеки населення, а також безпеки виконавців [2].

Зв'язок із важливими науковими й практичними завданнями

Застосовуючи електронно-оптичний комплекс спостереження (ЕОКС) [3] спряжений з системою навігації наземного рухомого об'єкту (СН НРО) [4] можливо проводити виявлення об'єктів (подій) під час пересування миротворчих підрозділів, не зупиняючи руху, оперативно визначити їх координати та передавати до старшого начальника для організації відповідного впливу. У результаті визначення координат орієнтирів і цілей із допомогою пересувних

стереофотограмметричних комплексів можна більш оперативніше локалізувати ті або інші небезпечні події які можливі в зонах конфліктуючих сторін [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій присвячених розв'язанню даної проблеми

Вивчення й аналіз опублікованих у вітчизняних і зарубіжних виданнях матеріалів дозволяють зробити висновок, що в період 2000 – 2006 р. оснащення НРО різноманітними системами спостереження проводиться в арміях усіх провідних країн світу [2,6,7]. Також розроблені цивільні мобільні системи автоматизованого цифрового знімання [8]. (Рис. 1)



Рис 1 Мобільні системи автоматизованого цифрового знімання

Достатньо багато робіт на цю тему було опубліковано у збірниках наукових праць XXXV конгресу ISPRS який проходив у Стамбулі у літку 2004 року [9].

Але необхідно зазначити, що в цих системах НРО призначений тільки для транспортування системи спостереження до місця проведення робіт та, в кращому випадку, для визначення координат місцеположення точки спостереження. Причому, ще раз зазначимо, – спостереження ведеться під час зупинки транспортного засобу (тобто в стаціонарному режимі).

Невирішені частини загальної проблеми

Застосування спряженого ЕОКС та СН НРО дозволить:

- використовувати дані СН НРО для роботи ЕОКС.
- проводити виявлення подій та визначення їх координат в режимі часу наближеного до реального, під час руху НРО;
- оперативно подавати дані до старшого начальника для організації відповідного впливу.

Доцільно дослідити залежність точності визначення координат об'єктів ЕОКС від точносних характеристик СН НРО. Розрахунок апріорної оцінки точності навігаційної системи надасть можливість у подальшій конструкторській розробці вирішити питання щодо максимальної точності цієї системи та відкриє перспективи підвищення точності визначення координат орієнтирів та цілей при виконанні миротворчих та анти терористичних операцій та заходів.

Постановка завдання

Виконати розрахунки попередньої точності навігаційної системи наземного рухомого об'єкту, як основи до відпрацювання тактико-технічних вимог її створення.

Викладення основного матеріалу

Розташуємо на двох наземних рухомих об'єктах, які оснащено системами навігації електронно-оптичний комплекс спостереження з метою визначення координат окремих точок.

При проведенні відеомоніторингу місцевості під час руху НРО проведемо з визначеним інтервалом одночасне фотографування місцевості. Розглянемо два одночасних знімки з двох НРО як стереопару. Схематично це представлено на рис. 2.

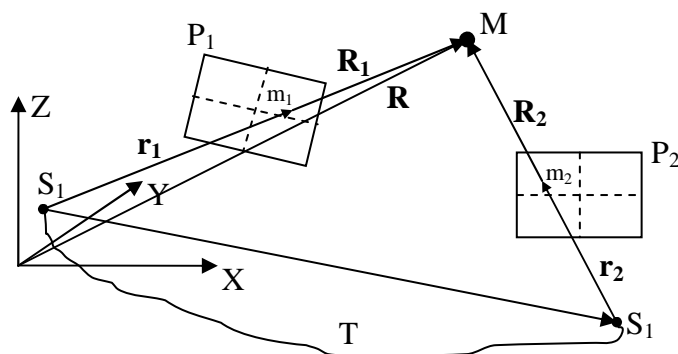


Рис.2 Схема розташування точок знімання та точок місцевості.

Де T – маршрут руху наземних рухомих об’єктів, S_1, S_2 – точки знімання, точка M – об’єкт (подія) на місцевості, P_1, P_2 – пара знімків, m_1, m_2 – зображення точки M на знімках, R – утворюючий вектор точки M в загальній системі координат, R_1, R_2 – утворюючі вектори точки M в системах координат лівого та правого знімків відповідно,

Залежність між просторовими координатами точки M і її відображеннями на знімках у векторній формі має вигляд [10]:

$$R = R_{S1} + Nr_1. \tag{1}$$

УВ координатній формі цей вираз має вигляд:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{S1} \\ Y_{S1} \\ Z_{S1} \end{bmatrix} + N \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{S1} \\ Y_{S1} \\ Z_{S1} \end{bmatrix} + N \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \tag{2}$$

де $N = \frac{B_x(Y_2 - Z_2) + B_y(Z_2 - X_2) + B_z(X_2 - Y_2)}{X_1(Y_2 - Z_2) + Y_1(Z_2 - X_2) + Z_1(X_2 - Y_2)} \approx \frac{B_x Y_2 - B_y X_2}{X_1 Y_2 - Y_1 X_2}$,

а X_1, Y_1, Z_1 й координати точок m_1 та m_2 в системах $S_1(XYZ)$ і $S_2(XYZ)$ відповідно і $B_x = X_{S2} - X_{S1}, B_y = Y_{S2} - Y_{S1}, B_z = Z_{S2} - Z_{S1}$.

Напрямні косинуси вираховують за формулами

- $a_1 = \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa,$
- $a_2 = \sin \alpha \cos \omega,$
- $a_3 = -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega \cos \kappa,$
- $b_1 = -\sin \alpha \cos \kappa - \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa,$
- $b_2 = \cos \alpha \cos \omega,$
- $b_3 = \sin \alpha \sin \kappa - \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa,$
- $c_1 = \cos \omega \sin \kappa,$
- $c_2 = \sin \omega,$
- $c_3 = \cos \omega \cos \kappa.$

Знайдемо оцінку точності визначення координат точок місцевості, а саме $m_R = \{m_X, m_Y, m_Z\}$, які обумовлені похибками елементів орієнтування знімків. Користуючись відомим співвідношенням [11]:

(3)

$$\Phi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon_i} \right)^2 m_i^2,$$

де Φ – функція багатьох аргументів, ε_i – аргумент функції, m_i – середня квадратична помилка аргументу, n – кількість аргументів.

Застосуємо (3) до рівняння (1), що записане в скалярному вигляді, тоді будемо мати

$$\begin{aligned} (X')^2 &= N^2 (X_1')^2 + \left(\frac{A'B - AB'}{B^2} \right)^2 X_1^2 = N^2 (X_1')^2 + \left(\frac{A'}{B} X_1 - \frac{NX_1}{B} \right)^2, \\ (Y')^2 &= N^2 (Y_1')^2 + \left(\frac{A'B - AB'}{B^2} \right)^2 Y_1^2 = N^2 (Y_1')^2 + \left(\frac{A'}{B} Y_1 - \frac{NY_1}{B} \right)^2, \\ (Z')^2 &= N^2 (Z_1')^2 + \left(\frac{AB' - AB'}{B^2} \right)^2 Z_1^2 = N^2 (Z_1')^2 + \left(\frac{A'}{B} Z_1 - \frac{NZ_1}{B} \right)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

де

$$\begin{aligned} A &= B_X Y_2 - B_Y X_2, \\ B &= X_1 Y_2 - Y_1 X_2. \end{aligned}$$

Розрахуємо складову виразу (3) по аргументу α_1 , тоді

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_i}{\partial \alpha_1} &= b_{i1} x_i + b_{i2} f + b_{i3} z_i = Y_i, & \frac{\partial X_2}{\partial \alpha_1} &= 0, \\ \frac{\partial Y_i}{\partial \alpha_1} &= -a_{i1} x_i - a_{i2} f - a_{i3} z_i = -X_i, & \frac{\partial Y_2}{\partial \alpha_1} &= 0, \\ \frac{\partial Z_1}{\partial \alpha_1} &= 0, & \frac{\partial Z_2}{\partial \alpha_1} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Підставляючи (5) у формули (4) отримуємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial \alpha_1} &= (Y - Y_{S1}) + \frac{(X - X_{S1}) \cdot (Y_1 Y_2 + X_1 X_2)}{X_1 Y_2 - Y_1 X_2}, \\ \frac{\partial Y}{\partial \alpha_1} &= (X - X_{S1}) + \frac{(Y - Y_{S1}) \cdot (Y_1 Y_2 + X_1 X_2)}{X_1 Y_2 - Y_1 X_2}, \\ \frac{\partial Z}{\partial \alpha_1} &= \frac{(Z - Z_{S1}) \cdot (Y_1 Y_2 + X_1 X_2)}{X_1 Y_2 - Y_1 X_2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для апріорної оцінки точності достатньо врахування похибок першої величини мализни, тоді

$$\begin{aligned} X_i &= x_i, \\ Y_i &= f, \\ Z_i &= z_i. \end{aligned}$$

Ураховуючи це та обмежуючись першою величиною мализни вирази (6) приймуть вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial \alpha_1} &= (Y - Y_{s1}) - \frac{(X - X_{s1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp}, \\ \frac{\partial Y}{\partial \alpha_1} &= (X - X_{s1}) + \frac{(Y - Y_{s1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp}, \\ \frac{\partial Z}{\partial \alpha_1} &= \frac{(Z - Z_{s1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp}. \end{aligned} \quad (7)$$

де $p = x_1 - x_2$.

Аналогічні формули знайдемо для похідних, що обумовлені іншими кутовими елементами зовнішнього орієнтування

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial \omega_1} &= \frac{(X - X_{s1})z_1 x_2}{fp}, \quad \frac{\partial Y}{\partial \omega_1} = (Z - Z_{s1}) + \frac{(Y - Y_{s1})z_1 x_2}{fp}, \quad \frac{\partial Z}{\partial \omega_1} = Nf - \frac{(Z - Z_{s1})z_1 x_2}{fp}, \\ \frac{\partial X}{\partial \kappa_1} &= Nz_1 + \frac{(X - X_{s1})q}{p}, \quad \frac{\partial Y}{\partial \kappa_1} = -\frac{Y - Y_{s1}}{p}, \quad \frac{\partial Z}{\partial \kappa_1} = Nx_1 - \frac{(Z - Z_{s1})q}{p}, \\ \frac{\partial X}{\partial \alpha_2} &= \frac{(X - X_{s1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) - (B_x x_2 + B_y f)x_1}{fp}, \\ \frac{\partial Y}{\partial \alpha_2} &= \frac{(Y - Y_{s1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) + (B_x x_2 + B_y f)f}{fp}, \\ \frac{\partial Z}{\partial \alpha_2} &= \frac{(Z - Z_{s1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) - (B_x x_2 + B_y f)z_1}{fp}, \\ \frac{\partial X}{\partial \omega_2} &= \frac{(X - X_{s2})x_1 z_2}{fp}, \quad \frac{\partial Y}{\partial \omega_2} = \frac{((X - X_{s1})x_1 - B_x f)z_2}{fp}, \quad \frac{\partial Z}{\partial \omega_2} = \frac{((X - X_{s1})x_1 - B_x z_2)z_2}{fp}, \\ \frac{\partial X}{\partial \kappa_2} &= \frac{(B_y x_1 - (X - X_{s1})f)z_2}{fp}, \quad \frac{\partial Y}{\partial \kappa_2} = -\frac{(Y - Y_{s2})z_2}{p}, \quad \frac{\partial Z}{\partial \kappa_2} = \frac{(B_y z_1 - (Z - Z_{s1})f)z_2}{fp}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для середніх квадратичних помилок, що обумовлені лінійними елементами зовнішнього орієнтування, формули мають вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial X_{s1}} = \frac{\partial Y}{\partial Y_{s1}} = \frac{\partial Z}{\partial Z_{s1}} &= 1, \\ \frac{\partial X}{\partial Y_{s1}} = \frac{\partial X}{\partial Z_{s1}} = \frac{\partial Y}{\partial X_{s1}} = \frac{\partial Y}{\partial Z_{s1}} = \frac{\partial Z}{\partial X_{s1}} = \frac{\partial Z}{\partial Y_{s1}} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Підставляючи вирази (7), (8) та (9) у формулу (3) отримуємо

$$\begin{aligned} m_X^2 &= m_{Xs1}^2 + \left((Y - Y_{s1}) - \frac{(X - X_{s1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp} \right)^2 m_{\alpha_1} + \left(\frac{(X - X_{s1})z_1 x_2}{fp} \right)^2 m_{\omega_1}^2 + \\ &+ \left(Nz_1 + \frac{(X - X_{s1})q}{p} \right)^2 m_{\kappa_1}^2 + \left(\frac{(X - X_{s1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) - (B_x x_2 + B_y f)x_1}{fp} \right)^2 m_{\alpha_2}^2 + \\ &+ \left(\frac{(X - X_{s2})x_1 z_2}{fp} \right)^2 m_{\omega_2}^2 + \left(\frac{(B_y x_1 - (X - X_{s1})f)z_2}{fp} \right)^2 m_{\kappa_2}^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_Y^2 = & m_{Y_{S1}}^2 + \left((X - X_{S1}) + \frac{(Y - Y_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp} \right)^2 m_{\alpha 1}^2 + \left((Z - Z_{S1}) + \frac{(Y - Y_{S1}) z_1 x_2}{fp} \right)^2 m_{\omega 1}^2 + \\
& + \left(Nz_1 + \frac{(X - X_{S1})q}{p} \right)^2 m_{\kappa 1}^2 + \left(\frac{(Y - Y_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) - (B_X x_2 + B_Y f)f}{fp} \right)^2 m_{\alpha 2}^2 + \\
& + \left(\frac{((X - X_{S1})x_1 - B_X f)z_2}{fp} \right)^2 m_{\omega 2}^2 + \left(\frac{(Y - Y_{S2})z_2}{p} \right)^2 m_{\kappa 2}^2,
\end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
m_Z^2 = & m_{Z_{S1}}^2 + \left(\frac{(Z - Z_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2)}{fp} \right)^2 m_{\alpha 1}^2 + \left(Nf - \frac{(Z - Z_{S1})z_1 x_2}{fp} \right)^2 m_{\omega 1}^2 + \left(\frac{(Z - Z_{S1})q}{p} \right)^2 m_{\kappa 1}^2 + \\
& + \left(\frac{(Z - Z_{S1}) \cdot (f^2 + x_1 x_2) - (B_X x_2 + B_Y f)z_1}{fp} \right)^2 m_{\alpha 2}^2 + \left(\frac{((X - X_{S1})x_1 - B_X z_2)z_2}{fp} \right)^2 m_{\omega 2}^2 + \\
& + \left(\frac{(B_Y z_1 - (Z - Z_{S1})f)z_2}{fp} \right)^2 m_{\kappa 2}^2.
\end{aligned}$$

Розрахуємо за формулами (10) точність визначення координат точок об'єкта, що визначаються з рухомого носія. Для прикладу візьмемо відстань до об'єкту 1000 м, а базис знімання (відстань між НРО в момент знімання) $B=100$ м. ($B_X=99$ м, $B_Y=10$ м, $B_Z=4$ м). Похибки визначення координат центрів проєкцій знімальної системи із допомогою GPS-приймача складає 0,20 м, похибки кутів крену, розвороту й тангажу запропонованою системою - 8'. Оскільки планується застосування цифрових знімальних систем (наприклад цифрова камера Canon EOS-350D) відповідно параметрам камери значення координат на знімку та елементи внутрішнього орієнтування: $f=53$ мм, $x_1=7$ мм, $x_2=-1$ мм., $p=6$ мм, $z_1=7$ мм, $z_2=5$ мм, $q=2$ мм. Значення скаляра - $N=17000$. Тоді середні квадратичні похибки визначення просторових координат точок об'єкту будуть: $m_x = 1,8$ м; $m_y = 6,2$ м; $m_z = 0,3$ м. В залежності від відстані до об'єкту дані середніх квадратичних похибок зведені в таблицю.

Таблиця

Значення СКП визначення координат об'єктів на місцевості

Значення СКП	Відстань (в м.)			
	1000	1500	2000	2500
m_x	1.8	2.7	3.6	4.5
m_y	6.2	9.3	12.4	15.5
m_z	0.3	0.45	0.6	0.75

Висновки

1. Проведений аналіз літературних джерел виявив, що в існуючих системах НРО призначений тільки для транспортування системи спостереження до місця проведення робіт та, в кращому випадку, для визначення координат місцеположення точки спостереження.

2. Отримані аналітичні вирази, що дозволяють оцінити точність визначення координат точок місцевості запропонованим комплексом за відомими томностями системи навігації та навпаки.

3. Розрахунок за отриманими аналітичними виразами для типологічної системи навігації дає апіорну оцінку точності визначення координат точки місцевості, що задовольняє військових користувачів.

1. Гесно Ж.-М. виступ на Раді Безпеки Четвертого комітету Генеральної Асамблеї ООН 25.10.2004р.
2. Панасюк В.В. Технічні засоби розвідки та їх бойове застосування: підручник. – 2-ге вид. – К.: ГУР, 2002. – 152с.
3. Глотов В.М., Макаревич В.Д. Аналіз можливостей цифрового стереофотограмметричного комплексу стосовно виявлення подій в районах відповідальності миротворчих підрозділів // Збірн. наук. праць «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва». - Л. – 2006(І). – С. 159-167.
4. Волчко П.І., Іванов В.І., Корольов В.М., Макаревич В.Д. й др. Система управління машинами підрозділу на базі навігаційної системи «ТІУС - Н» // Збірник матер. V Міжнар. наук.-техн. симпозиуму. “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища - GPS і GIS технології”. – Львів. - 2000. - С. 80-83.
5. Глотов В.М., Макаревич В.Д. Оперативне виявлення об’єктів цифровим стереофотограмметричним комплексом під час виконання миротворчих операцій // Збірник матер. X Міжнар. наук.-техн. симпозиуму. “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища - GPS і GIS технології”. – Львів. - 2005. - С. 210-214.
6. XXI век: оружие, военная техника, средства обеспечения // ЗВО. – 2000. - №9. – С.65.
7. Волин С. Израильская оптоэлектронная система разведки и наблюдения большой дальности "ЛОПРОС" // ЗВО. – 2003. - №4. – С.31-32.
8. Бурачек В., Залозна О., Васильєв О. Мобільна система автоматизованого цифрового знімання предметів дорожнього комплексу // Збірн. матер. Міжнар. Наук.-практич. конфер. «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування - європейський досвід». Чернігів. 2007 р. С. 188-190.
9. Збірник наукових праць XXXV конгресу ISPRS. – Стамбул. – 2004. – 1CD.
10. Лобанов А.Н. Фототопография. - М.: Недра, 1983. - 219 с.
11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., 1958.