

УДК 53.083 (430.1)

О. М. Крюков, С. О. Тишко, О. І. Костенко, В. В. Афанасьєв

СПОСІБ КОНТРОЛЮ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ТОПОГЕОДЕЗИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ВНУТРІШНІХ ВІЙСЬК

Проаналізовано відомі способи контролю метрологічних характеристик вимірювальних систем, що використовують супутникову навігаційну інформацію та застосовуються для визначення координат рухомих об'єктів. Запропоновано спосіб оперативного оцінювання похибки вимірювальної системи, який базується на використанні опосередкованих методів вимірювання та може бути застосований при реалізації контролю в польових умовах.

К л ю ч о в і с л о в а: апаратура користувача супутникової навігаційної системи, похибка, метрологічні характеристики.

Постановка проблеми. Важливим фактором ефективного виконання внутрішніми військами поставлених завдань є їх топогеодезичне забезпечення в ході проведення спецоперацій. Одним із перспективних напрямів створення вимірювальних систем (ВС) для визначення координат рухомих об'єктів внутрішніх військ є комплексування інерційної навігаційної системи з апаратурою користувача супутникової навігаційної системи (АК СНС), при цьому похибка визначення координат не повинна перевищувати декількох метрів. Такі значення похибки досягаються застосуванням приймачів АК СНС, що працюють у диференційному режимі вимірювання [1].

Вимірювальна система для визначення координат буде надійною, а її експлуатація ефективною лише за умови забезпечення періодичного контролю метрологічних характеристик (МХ). Тому контроль МХ ВС для визначення координат слід вважати важливим складником процесу їх експлуатації.

Аналіз публікацій. Наразі відсутня нормативна документація з проведення контролю МХ ВС, які створені на базі комплексування приймача АК СНС та інерційної навігаційної системи. Контроль МХ таких ВС може проводитися поелементно (окремо контроль інерційної навігаційної системи і окремо контроль приймача АК СНС).

Контроль МХ приймачів АК СНС сьогодні проводиться такими способами: за допомогою створення групових мір з використанням декількох приймачів АК СНС [2]; шляхом звірення з еталонною мірою (як еталонну міру використовують геодезичні полігони 2-го розряду [3]).

Метрологічні характеристики приймача АК СНС контролюються в нерухомому стані в абсолютному режимі визначення геодезичних координат.

Отже, відомі способи контролю МХ мають обмеження: неможливість контролю МХ ВС при роботі у комплексованому режимі; неможливість контролю правильності функціонування обчислювальних засобів; неможливість контролю МХ АК СНС, що функціонує в диференційному режимі.

Метою статті є розроблення способу контролю похибки ВС для визначення координат, а також обґрунтування відповідного переліку вимірювальних операцій і співвідношень для вибору еталонного і допоміжного обладнання, що застосовується в процесі контролю.

Виклад основного матеріалу. Для проведення контролю МХ ВС пропонується використовувати такі засоби: геодезичний пункт; лазерний далекомір-кутомір (ЛДК) – робочий еталон, в якому реалізовані режими вимірювання відстані й кута у горизонтальній і вертикальній площинах; астрономічний пункт або гірокомпас (ГК), що реалізує точний метод гірокомпасування; технічні засоби обробки та передачі вимірювальної інформації; сервісний рухомий об'єкт (транспортний засіб, який здатен оперативно транспортувати ВС).

Схема контролю МХ ВС подана на рис. 1. На місцевості розміщується геодезичний пункт 1, для якого визначено геодезичні координати. На геодезичному пункті розміщується ЛДК – робочий еталон. Перед початком контролю МХ визначається кут $A_{\text{он}}$ азимутальної орієнтації напрямку з геодезичного пункту на астрономічний пункт б або цей кут визначається з використанням ГК,

що реалізує точний метод гірокомпасування. Лазерний далекомір-кутомір встановлюється таким чином, щоб нульові показання кутомірної частини збігалися з напрямом $A_{\text{бн}}$.

У точці фазового центра антени приймача АК СНС встановлюється кутиковий відбивач. Сервісний рухомий об'єкт розміщується в точці 2, яка знаходиться на прямій, що з'єднує точки 1 і 6.

Маршрут руху сервісного рухомого об'єкта обирається таким чином, щоб в кожній точці забезпечувалася пряма видимість на геодезичний пункт.

За інформацію про технічний стан ВС використовують різниці $\Delta D_k = D_{\text{НСк}} - D_{\text{ЛДУк}}$ та $\Delta A_k = A_{\text{НСк}} - A_{\text{ЛДУк}}$, де $D_{\text{НСк}}$ – відстань від системи визначення координат до геодезичного пункту, отримана за інформацією про значення координат; $D_{\text{ЛДУк}}$ – відстань від системи визначення координат до геодезичного пункту, виміряна ЛДК; $A_{\text{НСк}}$ – азимут, розрахований за інформацією про координати, отримані за допомогою ВС, і координати геодезичного пункту; $A_{\text{ЛДУк}}$ – азимут, визначений з використанням ЛДК.

Розглянемо співвідношення для визначення цих величин детальніше.

За відомими геодезичними координатами сервісного рухомого об'єкта і геодезичного пункту дальність визначається виразом

$$D_{\text{НСк}} = \sqrt{(X_{\text{ГП}} - X_{\text{НС}})^2 + (Y_{\text{ГП}} - Y_{\text{НС}})^2 + (Z_{\text{ГП}} - Z_{\text{НС}})^2},$$

де $X_{\text{НС}}, Y_{\text{НС}}, Z_{\text{НС}}, X_{\text{ГП}}, Y_{\text{ГП}}, Z_{\text{ГП}}$ – довгота, широта і висота сервісного рухомого об'єкта і геодезичного пункту відповідно.

Азимут визначається за формулою

$$A_{\text{НСк}} = \arctg \frac{X_{\text{ГП}} - X_{\text{НС}}}{Y_{\text{ГП}} - Y_{\text{НС}}}.$$

Рішення про допуск ВС до подальшого застосування приймається у разі, якщо виконуються умови:

$$\Delta D_k \leq \Delta_{\text{Ддоп}}; \Delta A_k \leq \Delta_{\text{Адоп}},$$

де $\Delta_{\text{Ддоп}}, \Delta_{\text{Адоп}}$ – припустимі значення похибок визначення дальності та азимута.

Тоді для визначення $\sigma_{\text{Ддоп}}$ і $\sigma_{\text{Адоп}}$ будуть справедливими такі припущення: похибки визначення координат геодезичного пункту та сервісного рухомого об'єкта, виміряні системою визначення координат, є величинами слабо корельованими (коефіцієнт кореляції приймаємо рівним 0); похибки вимірювання кожної координати системи визначення координат по кожній з координат рівні між собою; похибки визначення кожної координати геодезичного пункту рівні між собою.

З урахуванням вищезазначеного $\sigma_{\text{Ддоп}}$ і $\sigma_{\text{Адоп}}$ визначатимуться виразами

$$\sigma_{\text{Ддоп}} = \left[\sigma_{\text{НС}}^2 (k_{X_{\text{НС}}} + k_{Y_{\text{НС}}} + k_{Z_{\text{НС}}})^2 + \sigma_{\text{ГП}}^2 (k_{X_{\text{ГП}}} + k_{Y_{\text{ГП}}} + k_{Z_{\text{ГП}}})^2 \right]^{1/2} \text{ та}$$

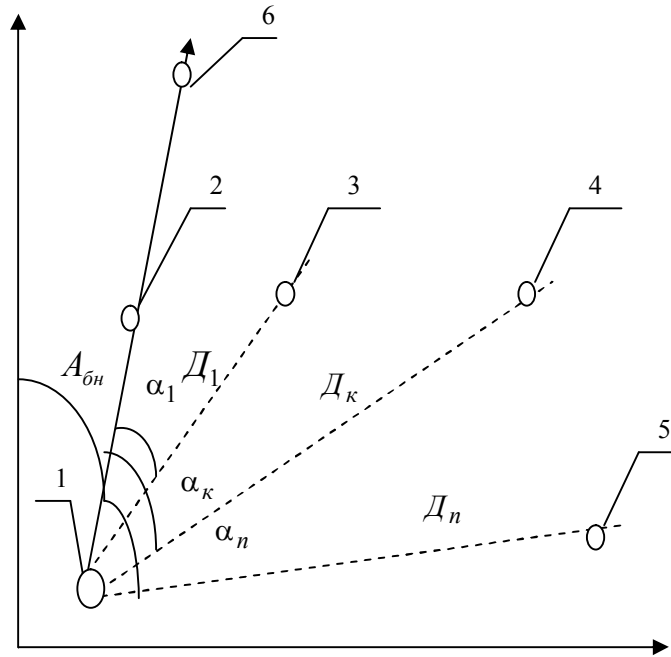


Рис. 1. Схема контролю МХ ВС

$$\sigma_{Ддон} = \left[\sigma_{НС}^2 (k'_{X_{НС}} + k'_{Y_{НС}})^2 + \sigma_{ГП}^2 (k'_{X_{ГП}} + k'_{Y_{ГП}})^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

де $k_{X_{НС}}, k_{Y_{НС}}, k_{Z_{НС}}, k_{X_{ГП}}, k_{Y_{ГП}}, k_{Z_{ГП}}$ – вагові коефіцієнти для $X_{НС}, Y_{НС}, Z_{НС}, X_{ГП}, Y_{ГП}, Z_{ГП}$ при визначенні дальності за інформацією про координати геодезичного пункту та за даними ВС; $k'_{X_{НС}}, k'_{Y_{НС}}, k'_{X_{ГП}}, k'_{Y_{ГП}}$ – вагові коефіцієнти для $X_{НС}, Y_{НС}, X_{ГП}, Y_{ГП}$ при визначенні азимута напрямку з геодезичного пункту на сервісний рухомий об'єкт; $\sigma_{НС}$ і $\sigma_{ГП}$ – середньоквадратичне відхилення (СКВ) припустимої похибки вимірювання координат.

Оскільки контроль МХ ВС проводиться непрямим методом, на достовірність повірки впливає як складник $D''_{ЕЗ}$, зумовлений характеристиками робочих еталонів, так і складник $D''_{ДЗ}$, обумовлений впливом характеристик допоміжних засобів, що не несуть інформацію про технічний стан контрольованої ВС. Тоді результуюче значення достовірності контролю МХ визначатиметься виразом

$$D'' = D''_{ЕЗ} D''_{ДЗ}.$$

Приймаючи, згідно з [4], припущення про те, що $D''_{ЕЗ}$ має бути близьким до $D''_{ДЗ}$, визначимо ці величини за відомим значенням припустимої достовірності контролю МХ.

Складник $D''_{ДЗ}$ залежить від умовних ймовірностей хибної $\alpha''_{ДЗ}$ і невиявленої $\beta''_{ДЗ}$ відмов.

Для розрахунку $\alpha''_{ДЗ}$ введемо припущення, що існує деякий діапазон значень похибки в смузі допуску, при знаходженні в якому ВС може бути забракована (помилка першого роду).

Значення $\alpha''_{ДЗ}$ з використанням [4] визначатиметься виразом

$$\alpha''_{ДЗ} = \int_{\sigma_{НС.в}-\varepsilon_{ГП.а}}^{\sigma_{НС.в}} f(\Delta_{НС}) d\Delta_{НС} \int_0^{\sigma_{ГП.в}} f(\Delta_{ГП}) d\Delta_{ГП} + \int_{\sigma_{НС.н}}^{\sigma_{НС.н}+\varepsilon_{ГП.а}} f(\Delta_{НС}) d\Delta_{НС} \int_{\sigma_{ГП.н}}^0 f(\Delta_{ГП}) d\Delta_{ГП},$$

де $f(\Delta_{НС}), f(\Delta_{ГП})$ – функції щільності розподілу ймовірності для відповідних похибок; $\sigma_{НС.в}, \sigma_{НС.н}, \sigma_{ГП.в}, \sigma_{ГП.н}$ – нижні та верхні межі СКВ відповідних припустимих похибок; $\varepsilon_{ГП.а}$ – ширина смуги похибок ВС, яка за результатами контролю МХ може зумовити виникнення помилки першого роду.

Для визначення $\beta''_{ДЗ}$ введемо припущення, що існує деякий діапазон значень похибки за межами смуги допуску, при знаходженні в якому похибка компенсується малим значенням похибки визначення координат геодезичного пункту (помилка другого роду).

Тоді згідно з [3] значення $\beta''_{ДЗ}$ визначатиметься виразом

$$\beta''_{ДЗ} = \left(\int_{\sigma_{НС.в}}^{\sigma_{НС.в}+\varepsilon_{ГП.б}} f(\Delta_{НС}) d\Delta_{НС} + \int_{\sigma_{НС.н}}^{\sigma_{НС.н}-\varepsilon_{ГП.б}} f(\Delta_{НС}) d\Delta_{НС} \right) \times \int_{\sigma_{ГП.н}}^{\sigma_{ГП.в}} f(\Delta_{ГП}) d\Delta_{ГП},$$

де $\varepsilon_{ГП.б}$ – ширина діапазону похибки ВС, яка за результатами контролю МХ може зумовити виникнення помилки другого роду.

Вирішуючи інтегральні рівняння для $\alpha''_{вс}$ і $\beta''_{вс}$, знаходимо $\varepsilon_{ГП.а}$ та $\varepsilon_{ГП.б}$. За відомими значеннями $\varepsilon_{ГП.а}$ і $\varepsilon_{ГП.б}$ розраховуємо n' , яке є відношенням СКВ похибки визначення координат геодезичного пункту і $\sigma_{Ддон}$:

$$n'_{ГП.б} = \sqrt{\frac{\sigma_{Ддон}^2 - \sigma_{НС.б}^2}{\sigma_{НС.б}^2}},$$

$$n'_{ГП.α} = \frac{2\sigma_{Ддон} \varepsilon_{ГП.α} - \varepsilon_{ГП.α}^2}{2\sigma_{Ддон}^2 - 2\sigma_{Ддон} \varepsilon_{ГП.α}}$$

Також визначаємо n'' , яке є відношенням СКВ похибки визначення координат геодезичного пункту і $\sigma_{Адон}$:

$$n_{ГП.β} = \sqrt{\frac{\sigma_{Адон}^2 - \sigma_{НС.β}^2}{\sigma_{НСβ}^2}},$$

$$n_{ГП.α} = \frac{2\sigma_{Адон} \varepsilon_{ГП.α} - \varepsilon_{ГП.α}^2}{2\sigma_{Адон}^2 - 2\sigma_{Адон} \varepsilon_{ГП.α}}$$

За n'' обирається менше із значень $n_{ГП.α}$ та $n_{ГП.β}$, а за n' – менше із значень $n'_{ГП.α}$ та $n'_{ГП.β}$.

З виразів для $k_{X_{НС}}$, $k_{Y_{НС}}$, $k_{Z_{НС}}$, $k_{X_{ГП}}$, $k_{Y_{ГП}}$, $k_{Z_{ГП}}$ і $k'_{X_{НС}}$, $k'_{Y_{НС}}$, $k'_{X_{ГП}}$, $k'_{Y_{ГП}}$ видно, що

$$|k_{X_{ГП}} + k_{Y_{ГП}} + k_{Z_{ГП}}| = |k_{X_{НС}} + k_{Y_{НС}} + k_{Z_{НС}}|,$$

$$|k'_{X_{ГП}} + k'_{Y_{ГП}}| = |k'_{X_{НС}} + k'_{Y_{НС}}|.$$

Тоді

$$\sigma'_{ГП} = \sqrt{\frac{(\sigma_{Ддон} n')^2 \cdot \sigma_{НС}^2}{\sigma_{Ддон}^2 + n'^2 \sigma_{Ддон}^2}};$$

$$\sigma''_{ГП} = \sqrt{\frac{(\sigma_{Адон} n'')^2 \cdot \sigma_{НС}^2}{\sigma_{Адон}^2 + n''^2 \sigma_{Адон}^2}}.$$

За $\sigma_{ГП}$ обирається менше із значень $\sigma'_{ГП}$ і $\sigma''_{ГП}$.

Значення $\alpha''_{ЕЗ}$ та $\beta''_{ЕЗ}$ при контролі МХ ВС одержимо з використанням відповідних інтегральних рівнянь. Вирішуючи ці рівняння, визначаємо припустиме СКВ σ_0 похибки далекомірної підсистеми ЛДК – робочого еталону і припустиме СКВ $\sigma_{АБН}$ похибки визначення азимута базового напрямку.

На значення $\sigma_{АБН}$ впливають такі складники: СКВ похибки засобів визначення істинного азимута σ_A ; СКВ похибки засобу вимірювання кута σ_α .

Припускаючи, що похибки, зумовлені кожним складником, повинні бути сумірними, за відомим $\sigma_{АБН}$ визначимо σ_A та σ_α за формулою $\sigma_{A(\alpha)} = \sqrt{\sigma_{АБН}^2 / 2}$.

Висновки

Запропоновані в роботі схема контролю МХ, вирази для визначення параметрів $\sigma_{ГП}$, $D_{НСк}$, $A_{НСк}$, $\sigma_{Ддон}$ і $\sigma_{Адон}$, а також співвідношення для розрахунку вимог до характеристик робочих еталонів і допоміжного обладнання можуть бути застосовані для контролю похибок ВС, яка використовується при визначенні координат в ході топогеодезичного забезпечення рухомих об'єктів. У подальшому на основі викладених результатів досліджень доцільно розробити методику контролю МХ такої ВС у польових умовах.

Список використаних джерел

1. Генеке, А. А. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии [Текст] / А. А. Генеке, Г. Г. Побединский. – М. : Картогеоцентр – Геодезиздат, 1999. – 272 с.

2. Побединский, Г. Г. Метрологическая аттестация топографо-геодезических динамических систем [Текст] / Г. Г. Побединский, М. И. Верницкий, А. А. Генеке // Геодезия и картография. – 1989. – № 11. – С. 26 – 28.

3. Генеке, А. А. Создание полигона для аттестации спутниковых приемо-вычислительных комплексов [Текст] / А. А. Генеке, В. С. Кислов, Л. С. Юношев // Геодезия и картография. – 1994. – № 2. – С. 10 – 13.

4. Таланчук, П. М. Основы теории проектирования измерительных приборов [Текст] / П. М. Таланчук, В. Т. Рущенко. – К. : Вища шк., 1989. – 454 с.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2011 р.