

*Шабатура Юрій Васильович (доктор технічних наук, професор)¹
Бурдейний Микита Віталійович¹
Поплінський Олександр Валентинович²*

¹Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна

²Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

ОЦІНКА ПОХИБОК НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ШВИДКІСНИХ ЛІТАЮЧИХ АПАРАТІВ, ЯКА ФУНКЦІОНУЄ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ СИГНАЛІВ МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

З розгортанням бойових дій в густонаселених районах на сході України набуває актуальності задача створення і застосування високоточних зразків озброєння, які в обов'язковому порядку потребують інформації від супутникових навігаційних систем. Через відсутність в Україні власної супутникової навігаційної системи, запропоновано розроблення нового способу визначення координат швидкісних літаючих апаратів на основі використання радіосигналів базових станцій мереж стільникового зв'язку, який дозволяє отримувати значення координат приймача встановленого на борту літаючого апарату з високою точністю і в реальному масштабі часу, суттєво знижує собівартість наземної радіотехнічної навігаційної системи, а простота способу підвищує оперативність проведення розрахунків. Проведена оцінка похибок визначення координат швидкісних літаючих апаратів, які розраховуються бортовою навігаційною системою на основі використання сигналів мереж стільникового зв'язку.

Ключові слова: базові станції стільникової мережі, навігаційні параметри, наземні радіотехнічні навігаційні системи, прямокутна система координат.

Вступ

Принципово нові види озброєнь, що почали з'являтися з середини ХХ століття, продовжують накладати глибокий відбиток на військово-будівництво у багатьох країнах. У свою чергу, це вимагає визначення відповідних форм і методів їх бойового застосування, перегляду основних положень стратегії і тактики. Досвід сучасних локальних війн та високий рівень загальної військово-політичної напруженості в багатьох країнах світу переконливо засвідчує, що успішність досягнення мети в воєнних конфліктах у визначальній мірі залежить від ступеня розвитку в державі професійної армії та її оснащеності новітніми зразками озброєння.

Аналіз остатніх досліджень і публікацій. Постановка проблеми.

Аналіз відомих публікацій [1] свідчить про те, що в усіх арміях світу для швидкого і ефективного вирішення бойових задач найбільш перспективним вважається нанесення точкових ударів, які в свою чергу вимагають вдосконалення системи навігації і керування швидкісними літаючими апаратами (ЛА), розробки та впровадження в даних системах новітніх наукових розробок і технологій.

В попередніх роботах авторів [2] проведено порівняльний аналіз відомих методів комплексування навігаційної інформації, які отримуються від навігаційних систем, що

працюють за різними фізичними принципами. В роботі [3] розроблено новий принцип здійснення корекції набутих на активній ділянці траєкторії польоту похибок штатних інерційних навігаційних систем швидкісних ЛА за рахунок використання інформації кодових сигналів наземних станцій стільникових телефонних мереж. В роботі [4] виконаний синтез математичної моделі для виконання розрахунків навігаційних параметрів швидкісних ЛА з використанням зазначеної наземної інфраструктури. Отримані моделі дозволяють розраховувати значення координат приймача встановленого на борту швидкісного ЛА з високою точністю і в реальному масштабі часу.

Разом с тим у зазначених роботах не було виконано аналізу і оцінки похибок, які виникатимуть в навігаційній системі швидкісних ЛА, яка функціонує за новим принципом в процесі визначення поточних координат. Саме тому дана стаття присвячується вирішенню цієї актуальної для практики і важливої для науки задачі.

Метою статті є оцінка похибок визначення координат швидкісних ЛА, які розраховуються бортовою навігаційною системою на основі використання сигналів мереж стільникового зв'язку.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Як було зазначено в роботі [4] принцип роботи запропонованої системи навігації полягає в тому, що на борту ЛА встановлюють бортовий комплекс, який приймає радіосигнали щонайменше від трьох базових станцій (Бс) мереж стільникового зв'язку, за даними радіосигналами бортовий комплекс визначає номер базової станції, та номер пелюстка спрямованості базової станції. Причому, в пам'ять бортового комплексу попередньо заносять інформацію про точні координати розташування базових станцій мереж стільникового зв'язку за їх номерами, а до складу бортового комплексу додатково включають високоточний годинник, який в момент старту попередньо синхронізується з електронними годинниками базових станцій мереж стільникового зв'язку. Зазначений бортовий комплекс за прийнятими радіосигналами базових станцій мереж стільникового зв'язку визначає моменти часу їх випромінювання даними станціями і здійснює визначення дальності до кожної базової станції мереж стільникового зв'язку на підставі визначення часу затримки радіосигналів до моменту їх прийому з наступним помноженням даного часу затримки на швидкість розповсюдження радіосигналів.

Обчислювані координати є функціями від багатьох змінних, які є результатом поточних, або попередніх вимірювань, які здійснюються різними приладами, тому похибки визначення координат, є функціями від множини випадкових аргументів.

Аналіз розрахункових формул для обчислення координат швидкісних ЛА показує, що основними джерелами, які вносять вклад в загальну похибку є:

- похибки числових розрахунків;
- похибки вимірювань часових інтервалів;
- похибки визначення координат антенних систем базових станцій стільникової мережі.

Зрозуміло, що оскільки ці похибки виникають в різних, фізично розділених і принципово не пов'язаних системах, тому вони є статистично незалежними. Крім того, враховуючи значну кількість факторів впливу цілком справедливою є гіпотеза про нормальний закон розподілу вище зазначених випадкових величин. Таким чином дисперсію визначення координат швидкісних літальних апаратів можна визначити на основі співвідношень

$$\sigma_{\Delta x_{TP}}^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \Delta x_{TP}}{\partial p_i} \right)^2 \partial^2 p_i$$

$$\sigma_{\Delta y_{TP}}^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \Delta y_{TP}}{\partial p_i} \right)^2 \partial^2 p_i \quad (1)$$

$$\sigma_{\Delta h_{TP}}^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \Delta h_{TP}}{\partial p_i} \right)^2 \partial^2 p_i$$

де $\Delta x_{TP} = x_{TP_O} - x_{TP}$, $\Delta y_{TP} = y_{TP_O} - y_{TP}$, $\Delta h_{TP} = h_{TP_O} - h_{TP}$;

p_i – вектор незалежних змінних (у нашому випадку σ_D – похибки вимірювань часових інтервалів, σ_S – похибки визначення координат антенних систем базових станцій стільникової мережі, σ_F – похибки числових розрахунків);

$\sigma_{\Delta x_{TP}}^2$, $\sigma_{\Delta y_{TP}}^2$, $\sigma_{\Delta h_{TP}}^2$ – середньоквадратична похибка визначення поточних координат;

x_{TP_O} , y_{TP_O} , h_{TP_O} – виміряні координати;

x_{TP} , y_{TP} , h_{TP} – поточні координати ЛА.

Подальший аналіз самих похибок та джерел їх виникнення показує, що похибки числових розрахунків, які виникають в наслідок обмеженої розрядності уже під час здійснення розрахунків при використанні 16-ти розрядної бортової обчислювальної системи стають достатньо малими, а при використанні 32-розрядної системи, що практикується для сучасних швидкісних ЛА вони стають нехтовно малими, тому цю складову в загальній похибці можна не враховувати.

Аналіз похибок визначення координат антенних систем базових станцій показав, що їх координати в горизонтальній площині тобто x_{BC} та y_{BC} визначені з дуже високою точністю, яка лежить в межах 3÷5 см. Значно гірше визначені координати антенних систем базових станцій по вертикалі, для них похибка може сягати ±1 м.

Для оцінки похибки вимірювань часових інтервалів σ_D використаємо співвідношення, що описане в роботі [4], та має вигляд:

$$x_{\Pi} = \frac{D_1^2 - D_2^2 + x_2^2}{2x_2};$$

$$y_{\Pi} = \frac{D_2^2 - D_3^2 - x_2 + 2x_2 x_{\Pi} + x_3^2 - 2x_3 x_{\Pi} + y_3^2}{2y_3} \quad (2)$$

$$h_{\Pi} = \sqrt{D_1^2 - x_{\Pi}^2 - y_{\Pi}^2};$$

де x_{Π} , y_{Π} , h_{Π} – координати швидкісних ЛА в приведеній системі координат [4];

D_1 , D_2 , D_3 – поточні відстані від ЛА до відповідної базової станції мережі стільникового зв'язку;

x_2 , x_3 , y_3 – задіяні в розрахунках координати відповідної базової станції мережі стільникового зв'язку в приведеній системі координат.

Визначимо дисперсії координат за формулами (1) за умови використання співвідношень (2). При цьому обґрунтовано можна вважати, що дисперсії виміряних відстаней від тактичних ракет до будь-якої базової станції є однаковими:

$$\sigma_{D_1}^2 = \sigma_{D_2}^2 = \sigma_{D_3}^2 \equiv \sigma_D^2;$$

аналогічно є однаковими і похибки визначення координат базових станцій:

$$\begin{aligned} \sigma_{X_1}^2 &= \sigma_{X_2}^2 = \sigma_{X_3}^2 = \sigma_{Y_1}^2 = \sigma_{Y_2}^2 = \\ &= \sigma_{Y_3}^2 = \sigma_{H_1}^2 = \sigma_{H_2}^2 = \sigma_{H_3}^2 \equiv \sigma_S^2. \end{aligned}$$

Розглянемо вплив на точність визначення поточних координат ЛА похибок вимірювань часових інтервалів, які в свою чергу згідно виразу

$$D = c \cdot \Delta t \quad (3)$$

де c – швидкість розповсюдження радіосигналу;

Δt – час розповсюдження радіосигналу від Бс до ЛА, впливають на точність розрахунку дальності від Бс до ЛА.

Часткові похідні по незалежним змінним будуть мати вигляд:

$$\frac{\partial x}{\partial D_1} = \frac{D_1}{x_2}, \quad \frac{\partial x}{\partial D_2} = -\frac{D_2}{x_2}, \quad \frac{\partial x}{\partial D_3} = 0,$$

$$\sigma_{x_D}^2 = \left(\frac{\partial x^2}{\partial D_1^2} + \frac{\partial x^2}{\partial D_2^2} + \frac{\partial x^2}{\partial D_3^2} \right) \cdot \sigma_D^2,$$

$$\frac{\partial y}{\partial D_1} = \frac{x_2 - x_3}{y_3} \cdot \frac{D_1}{x_2}, \quad \frac{\partial y}{\partial D_2} = -\frac{x_3 D_2}{y_3 x_2}, \quad \frac{\partial y}{\partial D_3} = -\frac{D_3}{y_3},$$

$$\sigma_{y_D}^2 = \left(\frac{\partial y^2}{\partial D_1^2} + \frac{\partial y^2}{\partial D_2^2} + \frac{\partial y^2}{\partial D_3^2} \right) \cdot \sigma_D^2,$$

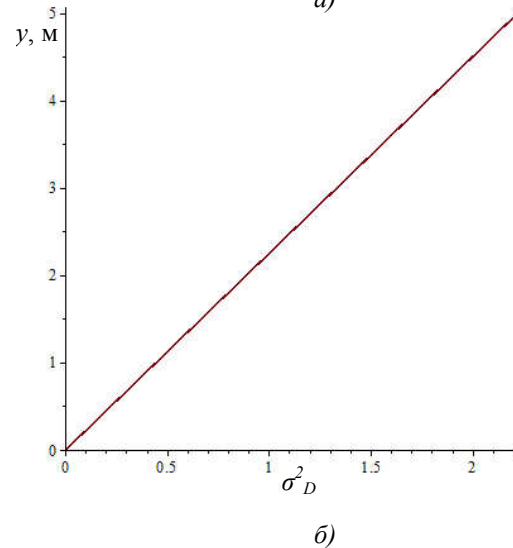
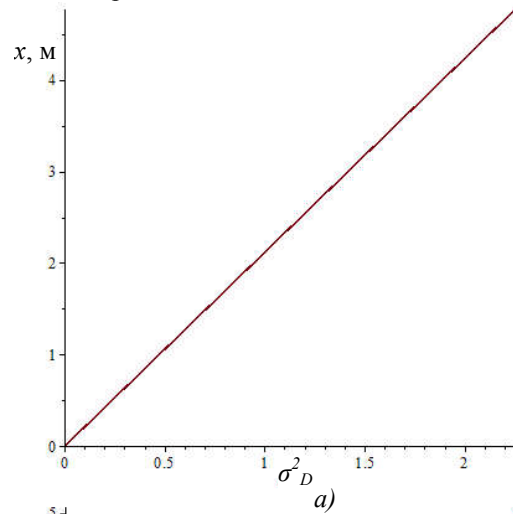
$$\frac{\partial h}{\partial D_1} = \frac{\left(\frac{8D_1 - \frac{8xD_1}{x_2} - \frac{1}{y_3^2}}{4} \left(2(-D_3^2 + D_1^2 + x_2^2 - 2xx_3 + x_3^2 + y_3^2 - x_2) \right) \right)}{\sqrt{\left(\frac{4D_1^2 - 4x^2 - \left(\frac{2D_1 - \frac{2D_1x_3}{x_2}}{y_3^2} \right)^2}{y_3^2} \right)}},$$

$$\frac{\partial h}{\partial D_2} = \frac{\left(\frac{8xD_2 - \frac{x_2}{4} \left(-D_3^2 + D_1^2 + x_2^2 - 2xx_3 + x_3^2 + y_3^2 - x_2 \right)}{D_2 x_3} \right)}{\sqrt{\left(\frac{4D_1^2 - 4x^2 - \left(\frac{-D_3^2 + D_1^2 + x_2^2 - 2xx_3 + x_3^2 + y_3^2 - x_2}{y_3^2} \right)^2}{y_3^2} \right)}},$$

$$\frac{\partial h}{\partial D_3} = \frac{\left((-D_3^2 + D_1^2 + x_2^2 - 2xx_3 + x_3^2 + y_3^2 - x_2) D_3 \right)}{\sqrt{\left(\frac{4D_1^2 - 4x^2 - \left(\frac{(-D_3^2 + D_1^2 + x_2^2 - 2xx_3 + x_3^2 + y_3^2 - x_2)^2}{y_3^2} \right)}{y_3^2} \right)}}$$

$$\sigma_{h_D}^2 = \left(\frac{\partial h^2}{\partial D_1^2} + \frac{\partial h^2}{\partial D_2^2} + \frac{\partial h^2}{\partial D_3^2} \right) \cdot \sigma_D^2 \quad (4)$$

Результати оцінки впливу похибки вимірювань часових інтервалів на точність визначення поточних координат ЛА отримані із використанням пакету прикладних програм Maple при умові що $\sigma^2 D = 0.001 + D/200000$ [5] приведено на рис. 1.



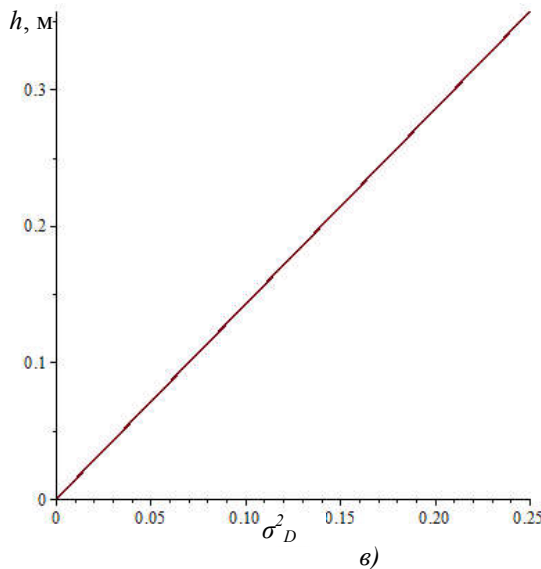


Рисунок 1 – Залежність точності визначення поточних координат від похибки вимірювань часових інтервалів

Вплив на точність визначення поточних координат швидкісних ЛА відносно похибок визначення координат антенних систем базових станцій стільникової мережі розраховується аналогічно, тому для наочності наведемо приклад розрахунку даного впливу по координаті x .

$$\sigma_{xS}^2 = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2(X_1 - X_2)}{x_2} - \frac{1}{4} \frac{(D_1^2 - D_2^2 + x_2^2)(2X_1 - 2X_2)}{x_2^3} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2(X_2 - X_1)}{x_2} - \frac{1}{4} \frac{(D_1^2 - D_2^2 + x_2^2)(2X_2 - 2X_1)}{x_2^3} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2(Y_1 - Y_2)}{x_2} - \frac{1}{4} \frac{(D_1^2 - D_2^2 + x_2^2)(2Y_1 - 2Y_2)}{x_2^3} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2(Y_2 - Y_1)}{x_2} - \frac{1}{4} \frac{(D_1^2 - D_2^2 + x_2^2)(2Y_2 - 2Y_1)}{x_2^3} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2(H_1 - H_2)}{x_2} - \frac{1}{4} \frac{(D_1^2 - D_2^2 + x_2^2)(2H_1 - 2H_2)}{x_2^3} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2(H_2 - H_1)}{x_2} - \frac{1}{4} \frac{(D_1^2 - D_2^2 + x_2^2)(2H_2 - 2H_1)}{x_2^3} \right)^2 \cdot \sigma_S^2 \quad (5)$$

де $X_1 Y_1 H_1, X_2 Y_2 H_2, X_3 Y_3 H_3$ – координати відповідних базових станцій мереж стільникового зв'язку в прямокутній системі координат СК-42.

Для дослідження поведінки величини $\sigma_{\Delta x_{TP}}^2$ та її складових розглянемо випадок розташування Бс з відомими координатами, та визначеними відстанями від них до (ЛА).

На рис 2 представлено результати моделювання залежності значення похибки визначення координати «X» в результаті впливу похибок вимірювань часових інтервалів та похибок визначення координат Бс.

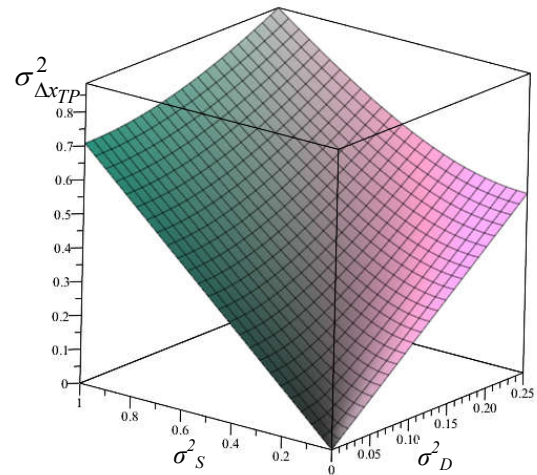


Рисунок 2 – Діаграма поведінки величини $\sigma_{\Delta x_{TP}}^2$ в залежності від її змінних складових.

З рис 2 видно, що у випадку використання вимірювального приладу середнього класу, з похибкою вимірювання відстані в межах до $\pm 2,25$ метрів на відстані 45000 метрів [5] та з похибкою визначення координат Бс до ± 1 метра – загальна похибка визначення координат ЛА не перевищує ± 1 метр.

Враховуючи те, що висота траєкторії польоту швидкісних ЛА не перевищує 26 км, а визначення дальності від Бс до ЛА буде виконуватися з використанням новітніх вимірювальних геодезичних приладів типу (Trimble, Leica) похибка яких складає сантиметри, то в запропонованій системі навігації похибка визначення координат швидкісного ЛА буде на порядок менше.

Висновки

В статті виконано аналіз точності вимірювання поточних координат навігаційною системою швидкісних ЛА способом, який функціонує на основі використання сигналів мереж стільникового зв'язку.

Розроблено математичні моделі впливу похибок вимірювань часових інтервалів та похибок визначення координат Бс на

результативне значення похибки визначення поточних координат швидкісних ЛА.

Запропонований спосіб дозволяє із достатньою точністю визначати поточні координати швидкісних ЛА в будь-який момент часу.

Точність визначення поточних координат навігаційною системою швидкісних ЛА даним способом, за умови використання новітніх вимірвальних геодезичних приладів типу

(Trimble, Leica), значно зростає порівняно з існуючими супутниковими навігаційними системами. Крім того, даний спосіб дозволяє використовувати вже існуючу наземну інфраструктуру, що суттєво знижує собівартість навігаційної системи, а простота способу підвищує оперативність проведення розрахунків.

Література

1. 9K720 Искандер - SS-26 STONE. Аналітичний огляд 08.2013/ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://military.tomsk.ru/blog/topic-185.html>
2. Бурдейний М.В. Підвищення точності визначення параметрів траєкторії безпілотних літальних апаратів шляхом комплексування навігаційної інформації з використанням методу максимальної правдоподібності/ Бурдейний М.В., Коробчинський М.В. / Науковий вісник Національного Лісотехнічного Університету України; Збірник наукових-технічних праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. – Вип. 24.9. – С. 336 – 341.
3. Шабатура Ю.В. Принцип корекції навігаційної системи тактичних та оперативно-тактичних ракет на основі використання мережі стільникового зв'язку. /

- Шабатура Ю.В., Бурдейний М.В. / Системи озброєння і військова техніка // Науковий журнал – Харків: ХУПС, 1(1) – Т'2016. 105–110 с. Таємно. Інв. № 2642 у НАСВ.
4. Патент на корисну модель 117633 Україна, В60С 17/06. Спосіб визначення координат літаючого об'єкта на основі використання радіосигналів базових станцій мережі стільникового зв'язку /Ю.В. Шабатура, М.В. Бурдейний (Україна). № u201701842. – Опубл. 26.06.2017, Бюл. №12.
5. Кирилковский В.К. Оптические измерения / Кирилковский В.К. / Учебное пособие // Сакт-Петербургский институт точной механики и оптики(Технический университет) – Сакт-Петербург 2003 г. – С 29.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СКОРОСТНЫХ ЛЕТАЮЩИХ АПАРАТОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ СЕТЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Шабатура Юрий Васильевич (доктор технических наук, профессор)¹

Бурдейный Никита Виталиевич¹

Поплинський Александр Валентинович²

¹*Национальная академия сухопутных войск имени гетмана Петра Сагайдачного, Львов, Украина*

²*Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев*

С развертыванием боевых действий в густонаселенных районах на востоке Украины приобретает актуальность задача создания и применения высокоточных образцов вооружения, которые в обязательном порядке требуют информации от спутниковых навигационных систем. Из-за отсутствия в Украине собственной спутниковой навигационной системы, предложено разработку нового способа определения координат скоростных летательных аппаратов на основе использования радиосигналов базовых станций сетей сотовой связи, который позволяет получать значения координат приемника установленного на борту летательного аппарата с высокой точностью и в реальной масштабе времени, существенно снижает себестоимость наземной радиотехнической навигационной системы, а простота способа повышает оперативность проведения расчетов. Проведена оценка погрешностей определения координат скоростных летательных аппаратов, которые рассчитываются бортовой навигационной системой на основе использования сигналов сетей сотовой связи.

Ключевые слова: базовые станции сотовой сети, навигационные параметры, наземные радиотехнические навигационные системы, прямоугольная система координат.

EVALUATION OF DEVELOPMENTS OF NAVIGATIONAL SYSTEM OF SPEED RELATED APPLIANCES, FUNCTIONING ON THE BASIS OF THE USE OF SIGNALS OF THE NETWORK

Yuriy V. Shabatura (doctor of technical sciences, professor)¹

Nikita V. Burdeyny¹

Aleksandr V. Poplinskyi²

¹*National Academy of Army Forces named after Hetman Petra Sagaidachnogo, Lviv, Ukraine*

²*National Defense University of Ukraine named by Ivan Chernyakhovsky, Kyiv, Ukraine*

With the deployment of hostilities in the densely populated areas of eastern Ukraine, the task of creating and using high-precision weaponry models, which necessarily require information from satellite navigation

systems, becomes urgent. Due to the absence of its own satellite navigation system in Ukraine, the development of a new method for determining the coordinates of high-speed aircraft is proposed based on the use of radio signals of base stations of cellular networks, which allows receiving coordinate values of the receiver installed on board the aircraft with high accuracy and in real time, significantly reduces the cost of ground radio navigation system, and simplicity of the method increases the efficiency of conducting calculations. An estimation of errors of determination of coordinates of high-speed flying vehicles, which are calculated by on-board navigation system on the basis of use of signals of cellular networks, is carried out.

Keywords: cellular base stations, navigation parameters, terrestrial radio navigation systems, rectangular coordinate system.

References

1. 9K720 Iskander - SS-26 STONE. Analytical review 08.2013 / [Electronic resource]. - Mode of access: <http://military.tomsk.ru/blog/topic-185.html>
2. Burdainny M.V. Increasing the accuracy of determining the parameters of the trajectory of unmanned aerial vehicles by integrating navigation information using the maximum probability / Burdene MV, Korobchinsky MV / Scientific bulletin of the National Forestry University of Ukraine; Collection of scientific and technical works. - Lviv: RVB NLTU of Ukraine. - Whip 24.9 - P. 336 - 341.
3. Shabatura Yu.V. The principle of correction of the tactical and tactical missile navigation system based on the use of a cellular network. / Shabatury Yu.V., Burdeynny M.V. / Armament and military equipment // Scientific Journal - Kharkiv: HUPPS, 1 (1) - T'2016. 105-110 s. Secretly. Inv. No. 2642 at the NASA.
4. Patent for utility model 117633 Ukraine, B60C 17/06. Method of determining the coordinates of a flying object based on the use of radio signals of base stations of cellular networks / Yu.V. Shabatura, MV Bourdaini (Ukraine). No. u201701842. - Published. June 26, 2017, Byul. No. 12
5. Kirilkovsky V.K. Optical Measurements / Kirilkovsky V.K. / Tutorial // Sakt-Petersburg Institute of Precision Mechanics and Optics (Technical University) - Sakt-Petersburg 2003 - C 29.