

УДК 629.1.04

DOI: 10.31673/2412-9070.2019.050306

М. Т. ДЕХТЯРУК<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент;В. М. ЧЕРЕВИК<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент;О. В. ОХРИМЕНКО<sup>3</sup>, ст. викладач,<sup>1</sup> Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ<sup>2</sup> Державний університет телекомунікацій, Київ<sup>3</sup> Державний університет інфраструктури та технологій, Київ

## АНАЛІЗ ПОХИБОК ПОЗИЦІОНУВАННЯ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАСОБАМИ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ

*Проведено аналіз сучасних супутникових навігаційних систем, що використовуються для позиціонування різних наземних об'єктів. Проаналізовано основні джерела помилок, що вносять похибки в обчислення точності навігаційних повідомлень у системі GPS. Показано, що основними джерелами помилок, які впливають на точність навігаційних обчислень у GPS-системах, є похибки, пов'язані з поширенням радіохвиль в іоносфері та тропосфері; помилки, зумовлені розбіжністю між фактичним становищем GPS-супутника і його розрахунковим становищем та ін. Запропоновано деякі рекомендації щодо усунення похибок позиціонування.*

**Ключові слова:** супутникові навігаційні системи; моніторинг земної поверхні; методи обробки навігаційних даних; похибки позиціонування наземних об'єктів.

### Вступ

Ефективні розробки нових технологій, віддалених за позиціонування різних об'єктів на земній поверхні, неможливі без використання сучасних супутникових навігаційних систем та застосування новітніх інформаційних технологій.

Значною мірою це стосується супутникової навігації різних рухомих об'єктів — організації руху повітряного, морського, річкового, автомобільного й залізничного транспорту, а також використання сучасних супутникових навігаційних систем у суміжних областях, таких як геодезія й картографія, землевпорядження, моніторинг земної поверхні, забезпечення гірських і будівельних робіт і т. д. [1].

**Аналіз існуючих джерел.** Наприкінці ХХ ст. почалися розробки нової технології, покликаної відповідати за позиціонування різних об'єктів на земній поверхні. Спочатку технологія використовувалася виключно військовими і для військових цілей. Можливості застосування даної технології для цивільних потреб розглянуто в серії робіт [1–7]: для допомоги при позиціонуванні авіатехніки [1], для контролю і допомоги в пошуку маршруту для автомобілів [2], для навігації суден [3–5], у морському бурінні [6], [7] і ще в безлічі різних сфер діяльності.

### Основна частина

Розвиток та розповсюдження сучасних систем супутникового моніторингу тісно пов'язані з підвищенням точності та достовірності прийнятих навігаційних даних. Нині широко використовуються сервіси GPS-тренінгу, завданням яких є відстеження маршрутів спостережувальних об'єктів з метою їх збереження, подальшого аналізу та

обробки, а персональний GPS-моніторинг використовується в багатьох сферах діяльності, тому проблема обробки великої кількості навігаційних даних є актуальною.

Прогнозовані перспективи для подальшого розвитку — використання альтернативних, спарених та реалізація нових засобів і технік для обробки навігаційних даних.

Предмет дослідження — засоби обробки навігаційних даних у системах відстеження рухомих об'єктів.

**Супутникова навігаційна система** — система космічного базування, котра дозволяє визначати поточне місцерозташування в глобальних масштабах будь-яких рухомих об'єктів та їх швидкість, а також здійснювати точну координацію часу.

Супутникову навігаційну систему можна розглядати як високотехнологічну інформаційну систему комбінованої дії, що складається з п'яти основних сегментів [8].

**GPS** — глобальна супутникова система навігації, яка забезпечує вимірювання відстані, часу і визначає місцерозташування у всесвітній системі координат WGS 84. Система дозволяє визначати місцерозташування та швидкість відслідковуваних об'єктів у будь-якому місці Землі (лише за виключенням приполярних областей), та майже при будь-якій погоді, а також у навколосемному космічному просторі. Навігаційну систему розроблено і реалізовано для використання Міністерством оборони США, при цьому нині вона доступна для використання цивільними особами — необхідний лише навігатор або інший апарат (смартфон, мобільний термінал) з GPS-приймачем для визначення власного місцерозташування [8; 9].

© М. Т. Дехтярук, В. М. Черевик, О. В. Охрименко, 2019

Незважаючи на загальну першочергову воєнізовану мету створення проекту, з часом навігаційна система набула розповсюдженого повсякденного використання, GPS-приймачі з'явилися в мобільних пристроях, літаках, кораблях, ракетах та інших спеціалізованих пристроях. Окрім реалізації апаратної складової, споживачам були представлені різноманітні програмні застосунки, завдяки яким можна швидко визначити місцезнаходження об'єкта при оновленні даних у реальному часі.

Останнім часом все більша кількість країн світу проявляють свій власний інтерес до створення навігаційних систем глобального позиціонування власного виробництва. Прикладами можуть служити ГЛОНАСС, Galileo в Європі, BeiDou в Китаї, IRNSS у Індії. Причиною для таких стрімких та істотних змін слугує прагнення, котрі викликані бажанням отримати повну незалежність від Американської системи супутникової навігації (GPS/NAVSTAR), оскільки існує можливість дистанційного вимкнення всієї системи з ініціативи власника, що може призвести до серйозних збоїв у функціонуванні важливих систем усередині кожної з держав. У подібних відповідальних стратегічних системах для підвищення надійності і точності, зазвичай, прийнято використовувати спарені системи, що складаються з двох і більше супутникових навігаційних систем.

Для точного визначення місцезнаходження необхідно отримати дані з чотирьох супутників. Припустимо, що нам відома відстань від одного супутника до приймача. Візуалізуючи коло навколо супутника, видно положення приймача на поверхні сфери (рис. 1, а) [8].

Розрахунок відстані до кожного супутника визначається за затримкою передавання сигналу. Далі, отримавши просторові координати трьох точок і трьох відстаней до шуканої точки, відшукують місцезнаходження приймача на площині. Оскільки система супутникової навігації працює у просторі, а не на площині, то необхідна наявність четвертого супутника, котрий дозволяє однозначно визначити координати точки в тривимірному просторі. Порівняно з розв'язком теоретичного геометричного завдання, практичне визначення відрізняється ще й тим, що існують похибки обчислення відстані до супутників, котрі призводять до того, що результатом визначення виявиться не певна точка, а область деякого радіуса, в якій знаходиться пристрій. Проте збільшення кількості видимих супутників приведе до зменшення цього радіуса, а точність визначення місцезнаходження зросте. На практиці, глобальна супутникова система навігації в цивільному виконанні забезпечує точність з радіусом близько 30 м [10].

Накладаючи дані, котрі отримують зі ще одного супутника, утворюється геозона на пере-

тині двох сфер, в якій знаходиться приймач (рис. 1, б).

Таким чином, звужується сектор пошуку до перетину двох кіл. Наступною ітерацією накладається інформація з третього космічного апарата. Третій вимір дає дві точки, в одній з яких знаходиться приймач (рис. 1, в).

Заключним етапом є накладення четвертого виміру поверх інших. На рис. 1, г відображена точка координат, отримана при перетині чотирьох сфер.

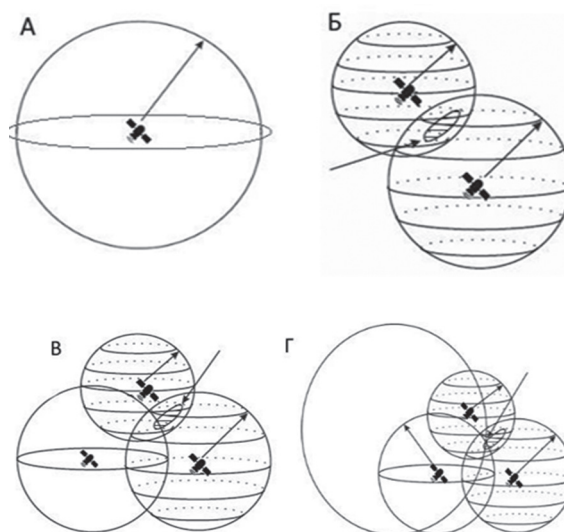


Рис. 1. Візуалізація накладання даних з супутників

Візуалізацію вдалого розташування супутників для точного визначення місцезнаходження об'єкта наведено на рис. 2.

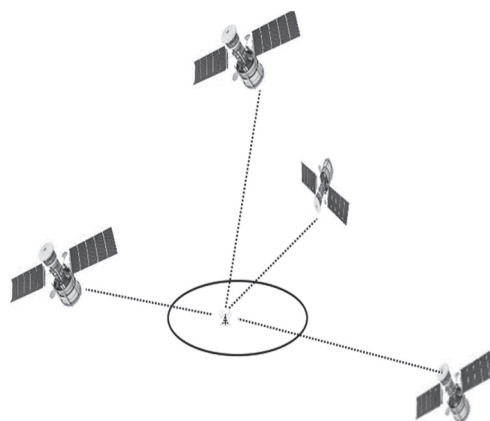


Рис. 2. Візуалізація вдалого розташування супутників

Самим явним недоліком використання будь-якої інерціальної системи навігації є те, що до приймача може не доходити сигнал, котрий він отримує від супутника або ж отримуватися в спотвореному вигляді. Все це відбувається за певних умов. Так, у будівлі, що знаходиться в залізобетонному каркасі, тунелі або підвалі, безпосередня можливість визначення точного місцезнаходження прагне до 0 [10].

Велика хмарність в небі і щільне листя дерев також погіршують прийом сигналу з супутників. Сигнали GPS можуть також спотворити завади, що виникають в результаті магнітних бурь, або завади від наземних джерел радіосигналу. У приполярних районах Землі точність погіршує високий нахил орбіт, по яких рухаються супутники. Також особливість GPS в тому, що ця система знаходиться в повній залежності від умов надання сигналу Міністерством оборони Сполучених Штатів. Навіть не враховуючи той факт, що навмисне погіршення сигналу в даний момент часу відсутнє.

Зараз вдалося реалізувати повне оновлення GPS-системи, хоча в планах цей проект був досить давно [7]. Застарілі супутники в процесі оновлення планується замінити на нові, розроблені компаніями Boeing і Lockheed Martin. Можливості сучасних навігаційних апаратів значно перевершують старіші моделі. Виходячи з наданих технічних даних, супутники дають можливість точного визначення місцезнаходження клієнтів із похибкою лише 0,5 м.

Міністерство оборони США посилається на те, що повне завершення поновлення даної системи можливо тільки через 10 років. При цьому кількість супутників залишиться сталою — 30, з яких 3 резервних і 27 працюючих.

Природно, не варто забувати про аспекти, які виникають при обчисленні координат: супутникова система може отримувати розташування з похибками і природа цих помилок різна.

Основними джерелами помилок, що вносять похибки в обчислення точності навігаційних повідомлень у системі GPS є:

- іоносферні затримки сигналу — затримки поширення сигналів, котрі призводять до помилок порядку 10-20 м вдень і 2-5 м вночі;
- похибка відходу шкали часу супутника — викликана розбіжністю шкал часу різних супутників. Усувається за допомогою наземних станцій стеження;
- тропосферні затримки сигналу — величина похибки безпосередньо залежить від метеорологічних параметрів (тиск, вологість, температура), а також від висоти супутника над горизонтом. Компенсація тропосферних затримок проводиться шляхом розрахунку математичної моделі цього шару атмосфери. Значення похибок не перевищують 30 м;
- похибка визначення відстані до супутника — помилка не корельована з іншими видами похибок. Її значення не перевищує 10 м;
- ефемеридна похибка — помилки зумовлені розбіжністю між фактичним положенням супутника і його розрахунковим положенням. Значення похибки зазвичай не більш як 3 м;

- помилки обчислення орбіт — з'являються внаслідок неточностей прогнозу і розрахунку ефемерид супутників, виконуваних в апаратурі приймача. Похибка призводить до помилки вимірювання координат близько 1-2 м;

- похибка неточного визначення часу — призводить до виникнення систематичної помилки визначення координат близько 0,6 м. Усувається за допомогою встановлення сервера точного часу на приймачі;

- інструментальна помилка приймача — зумовлена наявністю шумів в електронному тракті приймача. Відношення сигнал/шум приймача визначає точність процедури порівняння, прийнятого від супутника і опорного сигналу, тобто похибка обчислення псевдодальності. Призводить до виникнення координатної помилки майже 1,2 м;

- багатопробневий прийом — з'являється в результаті вторинних відображень сигналу супутника від великих перешкод, розташованих в безпосередній близькості від приймача. Виникає явище інтерференції і вимірювана відстань виявляється більше дійсної. Найкращим способом боротьби вважається раціональне розміщення антени приймача щодо перешкод;

- геометричне розташування супутників — при обчисленні сумарної помилки необхідно врахувати взаємне положення приймача і супутників. Для цього вводиться спеціальний коефіцієнт геометричного зниження точності GDOP (Geometric Dilution Of Precision) [14], на який необхідно помножити всі перелічені вище помилки, щоб отримати результуючу помилку. Вона обернено пропорційна обсягу фігури, яка буде утворена, якщо провести поодинокі вектори від приймача до супутників. Велике значення GDOP свідчить про невіддале розташування сателіта і велике значення помилки.

При запуску приймач спочатку встановлює, які супутники знаходяться в полі зору. Наступним кроком є визначення фази доплерівського зсуву і PRN-коду, пов'язаного з кожним супутником. Використовуючи ці дані, приймач ініціалізує контури відстеження. Петля Костаса використовується для відстеження носійної, а DLL — для відстеження коду PRN. Цикли відстеження надають користувачеві повідомлення даних навігації, яке застосовується для розрахунку положень супутника і, врешті-решт, положення користувача.

### Висновки

1. У статті проведено аналіз сучасних супутникових навігаційних систем, що використовуються для позиціонування різних наземних об'єктів.

2. Описано технологію визначення координат наземних об'єктів за допомогою глобальної супутникової системи навігації.



3. Проаналізовано основні джерела помилок, що вносять похибки в обчислення точності навігаційних повідомлень у системі GPS.

4. Показано, що основними джерелами помилок, які впливають на точність навігаційних обчислень в GPS-системах, є:

а) похибки, пов'язані з поширенням радіохвиль в іоносфері та тропосфері;

б) помилки, зумовлені розбіжністю між фактичним становищем GPS-супутника і його розрахунковим становищем, яке встановлюється за даними навігаційного сигналу, що передається з борту супутника;

в) похибка зміщення часу супутника, викликана розбіжністю шкал часу різних супутників;

г) величина похибки безпосередньо залежить від метеорологічних параметрів (тиск, вологість, температура), а також від архітектурних особливостей будівлі, де знаходиться отримувач GPS-сигналу (у залізобетонному каркасі, тунелі або підвалі) та ін.

#### Список використаної літератури

1. Соловьев Ю. А. *Спутниковая навигация и ее приложения*. Москва: Эко-Трендз, 2003. 326 с.

2. *Обеспечение безопасности объектов информатизации транспортной отрасли* / А. П. Нырков, А. А. Нырков, С. С. Соколов [и др.]. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2015. 544 с.

3. Вихров Н. М., Каторин Ю. Ф. *О безопасности инфраструктуры водного транспорта* // *Морской вестник*. 2014. № 4 (52). С. 99–102.

4. Вайгандт Н. Ю., Нырков А. П. *Повышение точности навигационных систем водного транспорта при помощи технологии референциальных станций* // *IT: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА: материалы науч.-техн. конф.* 2013. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. С. 64–69.

5. Каторин Ю. Ф., Коротков В. В. *Защищенность информации в каналах передачи данных в береговых сетях автоматизированной идентификационной системы* // *Журнал Университета водных коммуникаций*. 2012. № 1. С. 98–102.

6. *Self-contained drilling rig automatic control system efficiency improvement by means of assuring compatibility and integration methods development* / S. Cherniy, A. Zhilenkov, S. Sokolov, L. Titov // *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Vol. 7. № 3. P. 66–73.

7. *Жиленков А. А., Черный С. Г. Оценка надёжности и эффективности распределённых систем буровых установок* // *Автоматизация в промышленности*. 2015. № 6. С. 50–52.

8. *Спутниковая система навигации* [Електронний ресурс]. URL:

[https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Спутниковая\\_система\\_навигации](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Спутниковая_система_навигации) (дата звернення: 20.05.2018) – Назва з екрану.

9. *Спутниковая система GPS* [Електронний ресурс]. URL:

<http://www.satlines.info/shop/firms/GPS.html> = *Спутниковая система навигации* (дата звернення: 20.05.2018) – Назва з екрану.

10. *GPS* [Електронний ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GPS> (дата звернення: 20.05.2018) – Назва з екрану.

11. *История создания системы GPS* [Електронний ресурс]. URL:

<http://www.itrack.com.ua/support/docs/historyofgps> (дата звернення: 20.05.2018) – Назва з екрану.

12. *GPS: Хронология* [Електронний ресурс]. URL:

[transport.kaketoustroeno.ru/a\\_transport&gps&6.htm](http://transport.kaketoustroeno.ru/a_transport&gps&6.htm) (дата звернення: 20.05.2018) – Назва з екрану.

13. *Как работает GPS, принципы работы GPS* [Електронний ресурс]. URL:

[www.tracker.co.ua/gps\\_work.html](http://www.tracker.co.ua/gps_work.html) (дата звернення: 20.05.2018) – Назва з екрану.

14. *GPS: принципы работы системы и точность определения* [Електронний ресурс]. URL:

[sts-51.ru/index.php/navigatsiya/materials-about/73-fort-news3](http://sts-51.ru/index.php/navigatsiya/materials-about/73-fort-news3) (дата звернення: 20.05.2018).

Н. Т. Дехтярук, В. М. Черевик, О. В. Охрименко

#### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ СРЕДСТВАМИ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Проведен анализ современных спутниковых навигационных систем, используемых для позиционирования различных наземных объектов. Проанализированы основные источники ошибок, которые вносят погрешности в расчет точности навигационных сообщений в системе GPS. Показано, что основными источниками ошибок, которые влияют на точность навигационных вычислений в GPS-системах, являются: ошибки, связанные с распространением радиоволн в ионосфере и тропосфере; ошибки обусловлены несовпадением между фактическим положением GPS-спутника и его расчетным положением и др. Предлагаются некоторые рекомендации по устранению ошибок позиционирования.

**Ключевые слова:** спутниковые навигационные системы; мониторинг земной поверхности; методы обработки навигационных данных; погрешности позиционирования наземных объектов.

N. T. Dehtyaruk, V. M. Cherevyk, O. V. Ochrimenko

### ANALYSIS OF ERRORS OF POSITIONING OF TERRITORIAL OBJECTS BY MEANS OF SATELLITE NAVIGATION

Current article analyzes modern satellite navigation systems used for positioning different ground objects. It describes the technology of determining the coordinates of ground objects with using a global satellite navigation system. The main sources of errors in the calculation of the accuracy of GPS navigation messages are analyzed. It is shown that the main sources of error that affect the accuracy of navigation computations in GPS systems are: errors related to the spread of radio waves in the ionosphere and troposphere; errors that are caused by discrepancies between the actual position of the GPS satellite and its estimated position, which is determined by the data of the navigation signal transmitted from the satellite; satellite bias error caused by divergence of time scales of different satellites; the magnitude of the error also depends directly on the meteorological parameters (pressure, humidity, temperature), as well as on the architectural features of the building where the GPS receiver is located.

Depending on the source of the error, there are also ways to correct it. Most often used methods are algorithmic (software) correction methods of localization errors, such as: the method of differential correction, the method of improving the accuracy due to observations from several satellites, the method of averaging data based on the Kalman filter, etc. Software methods can significantly improve data accuracy, but they require further improvement and high processing power.

**Keywords:** satellite navigation systems; monitoring of the earth's surface; methods of processing navigation data; positioning errors of terrestrial objects.

УДК 004:681.518

DOI: 10.31673/2412-9070.2019.050712

М. А. ПАВЛЕНКО<sup>1</sup>, доктор техн. наук, професор;

С. Г. ШИЛО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент;

О. М. ДМІТРІЄВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук,

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил Івана Кожедуба

<sup>2</sup> Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ СИТУАЦІЙНОМУ АНАЛІЗІ ПОВІТРЯНОЇ ОБСТАНОВКИ В ЦЕНТРАХ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО РУХУ

Пропонується інформаційна технологія для інтелектуальної підтримки прийняття рішення операторами центрів обслуговування повітряного руху. За своїм складом, змістом та побудовою запропонована інформаційна технологія забезпечує інформаційну підтримку прийняття рішень в динаміці можливих змін ситуацій обстановки. Як ресурсне забезпечення функціонування інформаційної технології запропоновано інтелектуальні моделі та методи ситуаційного аналізу обстановки, що отримано авторами в ході досліджень процесів інформаційного забезпечення діяльності осіб, що приймають рішення в центрах обслуговування повітряного руху. На відміну від відомих, запропонована інформаційна технологія дозволяє враховувати відмінності в складі інформації про ситуацію обстановки від різноманітних джерел при попередній обробці вхідних даних. На наступному етапі передбачається формування та уточнення множин ознак, що мають різний ступінь значимості. На основі поточних ознак ситуації обстановки та даних передісторії спостережень здійснюється розпізнавання ситуації обстановки, що складається в зоні відповідальності органу керування. Інтелектуальні правила розпізнавання ситуацій можуть підлягати модифікації залежно від ознак поточної ситуації та передісторії спостережень. Результатом функціонування запропонованої інформаційної технології є інформаційна модель, що забезпечує прийняття рішення оператором. За необхідності особа, що приймає рішення, може втручатися в процеси обробки та перетворення інформації на будь-якому етапі функціонування. У підсумку використання запропонованої інформаційної технології сприяє підвищенню оперативності та обґрунтованості прийняття рішень диспетчерами центрів обслуговування повітряного руху.

**Ключові слова:** інформаційна технологія; інтелектуальні методи та моделі; ситуаційний аналіз; повітряна обстановка; оператор.

### Вступ

Аналіз розвитку та вдосконалення системи авіаційних перевезень провідних авіаперевізників розвинених країн світу свідчить про стрімкий розвиток цього сегменту ринку. За останні три роки, обсяги пасажирських перевезень України збільшились майже вдвічі та більш як у півтора рази перевищили рівень «докризисного» 2013 року [1–5].

Зважаючи на сучасні темпи розвитку галузі авіаперевезень, постійної уваги потребують пи-

тання вдосконалення організації обслуговування повітряного руху із забезпеченням необхідного рівня безпеки для всіх суб'єктів процесу. Вирішення низки нагальних питань керування повітряним рухом показує, що в сучасних умовах першочергового удосконалення потребують процеси інформаційного забезпечення прийняття рішень посадовими особами на пунктах керування повітряним рухом [6–8].

Обмежені можливості існуючих методів та моделей ситуаційного аналізу обстановки в центрах

© М. А. Павленко, С. Г. Шило, О. М. Дмитрієв, 2019