

Григоровський Петро Євгенович

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник, перший заступник директора ДП “НДІБВ”,

<https://orcid.org/0000-0003-0527-5890>

ДП “НДІБВ”, Київ

Іносов Сергій Вікторович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0001-8305-5514>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Самойленко Микола Іванович

Асистент кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0003-4778-5100>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Вольтерс Андрій Олександрович

Асистент кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0002-3842-8198>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Запривода Андрій Віталійович

Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0001-9171-9325>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**МОЖЛИВОСТІ ЗМЕНШЕННЯ ВИПАДКОВОЇ ПОХИБКИ
СУПУТНИКОВОЇ ГЕОЛОКАЦІЇ ЗА РАХУНОК УСЕРЕДНЕННЯ ДАНИХ,
ОТРИМАНИХ GPS-ПРИЙМАЧЕМ U-BLOX NEO-6M-0-001
ІЗ ЗОВНІШНЬОЮ АКТИВНОЮ АНТЕНОЮ**

Анотація. Нині дедалі частіше виникають задачі точного позиціонування об'єктів, техніки та вантажів. Це і задачі логістики, і точне землеробство, і окрема група задач позиціонування при проведенні земляних робіт в будівництві: котловани, облаштування пальових полів тощо. Якщо для задач логістики, моніторингу переміщення транспорту та вантажів точність позиціонування 10 м цілком достатня, то задачі будівництва потребують точності 10 см, а задачі моніторингу будівель потребують міліметрову точність. Пропонована робота присвячена підвищенню точності супутникової геолокації за рахунок зменшення випадкової похибки приймача. Для дослідження обрано бюджетний приймач (ціна близько 5\$), з якого знімали дані про поточну геолокацію. Дані з приймача містять випадкову похибку, для усунення якої було використано усереднення результату. Дослідження засвідчили, що при малих інтервалах усереднення похибка залишається, хоч і зменшується; зі збільшенням інтервалу усереднення похибка зменшується, однак до певної ширини інтервалу; подальше збільшення інтервалу усереднення перестає впливати на величину похибки. Оптимальним є усереднення результатів в інтервалі від 1000 до 2000.

Ключові слова: супутникова геолокація; задачі логістики; задачі моніторингу; GPS-приймач; точка локації; похибка; точність даних; часові інтервали

Постановка проблеми

Для вирішення завдань точного позиціонування об'єктів техніки та вантажів використовують системи супутникової навігації. Такі системи здатні працювати в будь-якій точці світу, відслідковувати вантажі від відправника до споживача, маршрут,

зупинки тощо. Точність позиціонування таких систем достатня для задач логістики, але недостатня для задач точного землеробства, а також для задач будівництва. Звісно, існують супутникові системи позиціонування з геодезичною точністю, однак ціна їх теж висока. Робота присвячена аналізу можливостей підвищення точності визначення геолокації за рахунок усереднення результатів.

Аналіз останніх досліджень

Методам підвищенню точності позиціонування приділено вже багато уваги. У роботі [1] наведено теоретичний аналіз похибок позиціонування, причини виникнення похибок, а також теоретичні можливості їх усунення. Практично для усунення похибок у [1; 2] пропонуються регресивні методи: метод лінійної регресії та параболічної регресії, апроксимація даних, а для опрацювання RAW даних пропонують використати математичні пакети (Matlab, Hi-target Geomatics Office, Magnet office tools, RTKlib та ін.).

Для підвищення точності визначення координат можуть бути використані різницеві методи корекції похибок [3].

При визначенні координат позиціонування рухомих об'єктів пропонують корегування по даних з інерціальних датчиків: положення рухомого об'єкта визначають по приймачу системи супутникової навігації та корегують з урахуванням переміщення, яке розраховують по датчиках інерціальної системи (трьохосьовий датчик швидкості та компас) [3].

Виробник приймачів супутникової системи навігації [4] заявляє точність позиціонування модуля u-blox NEO-6M-0-001 $\pm 2,5$ м для статичних об'єктів при замірах протягом 24 год.

Мета роботи

Метою пропонованої роботи є експериментальне визначення оптимального інтервалу усереднення даних із супутникової системи геолокації та визначення межі можливого зменшення випадкової похибки вимірювань таким методом.

Викладення основного матеріалу

Для проведення вимірювань була використана плата GY-GPS6MV2 на основі GPS модуля u-blox NEO-6M-0-001 із зовнішньою активною антеною. Цей модуль призначений для отримання географічних координат та передачі їх в контролер чи комп'ютер. Модулі серії u-blox NEO-6M виготовлює Швейцарська компанія u-blox, вони призначені для визначення географічних координат поточного положення антени та приймача за допомогою супутникової системи глобального позиціонування. Модуль здатний приймати сигнали не тільки від супутників GPS (USA), а і сигнали ГЛОНАС (РФ), GALILEO (EU), BeiDou (Китай), QZSS (Японія). Більш коректно цей модуль назвати GNSS – приймач («Global Navigation Satellite System» – глобальна система супутникової навігації). Для підвищення точності позиціонування модуль u-blox NEO-6M підтримує режим диференційної корекції

даних – SBAS. Сам модуль приймача оснащений інтерфейсами I2C, SPI і UART, однак частіше використовується тільки UART. Передача даних про поточні географічні координати відбувається у форматі протоколу NMEA 0183 («National Marine Electronics Association») — стандарт, що визначає текстовий протокол зв'язку морського навігаційного обладнання. Для проведення експерименту був створений вимірювальний стенд у складі:

1. Приймач.
2. Однокристална EOM AtMega238.
3. Місток UART – USB (CH340).
4. Комп'ютер.

Приймач приймає сигнали із супутників, опрацьовує їх, визначає поточні координати та періодично (1 раз в секунду) передає координати в EOM. EOM обробляє послідовності з приймача, виокремлює з пакетів обміну NMEA географічні координати, переводить координати в зручний для читання формат і через мостик UART-USB передає числові значення широти та довготи в комп'ютер у текстовому форматі.

Отримані дані – дві колонки десяткових чисел (широта та довгота в географічних градусах) у текстовому форматі, дані отримуємо періодичною вибіркою з періодом 1 с у реальному часі. Розрядність чисел достатня (14 значущих цифр), щоб знехтувати похибкою дискретизації по рівню.

Типова осцилограма даних геолокації наведена на рис. 1. Цей приклад відтворює зміну довготи в часі, широта змінюється аналогічно. Час реєстрації для зручності вказано порядковим номером числа (збігається із секундами часу). Типове значення часу реєстрації – 3000. Середнє значення зображено горизонтальною суцільною лінією. Пунктирними горизонтальними лініями відмічені відхилення $\pm \sigma$ (σ – середнє квадратичне відхилення от середнього). Максимальні відхилення досягають рівня $\pm 3\sigma$ (зображено крапковими горизонтальними лініями), що є типовим для нормально-розподіленого випадкового процесу [5 – 8].

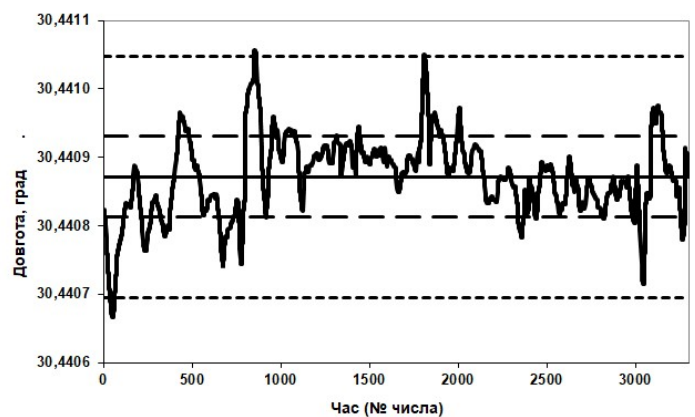


Рисунок 1 – Типова осцилограма даних вимірювання геолокації

На рис. 2 показано типові напрямки блукання точки локації на місцевості, викликані випадковою похибкою, при малих часових інтервалах. Напрямок руху змінюється рідко, що викликає сильну взаємну кореляцію даних широти та довготи (рис. 4, 5).

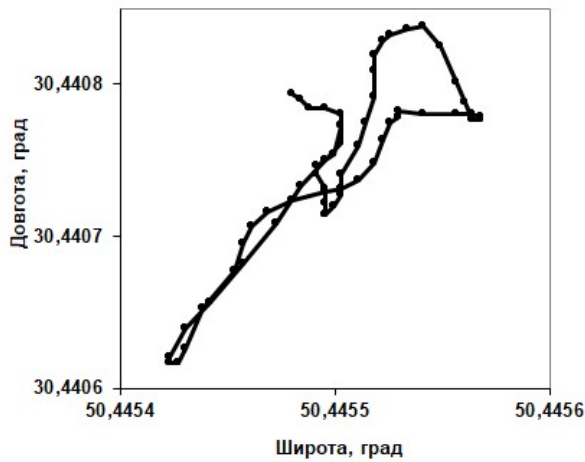


Рисунок 2 – Напрямки блукання точки локації на малих часових інтервалах

На великих часових інтервалах кореляція зникає (рис. 5) і точка локації блукає хаотично (рис. 3).

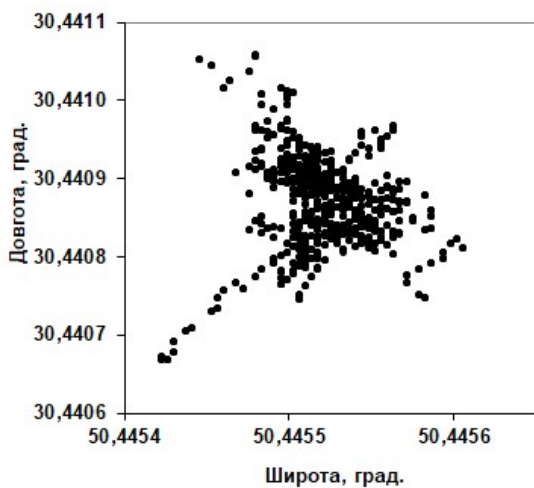


Рисунок 3 – Хаотичне блукання точки локації на великих часових інтервалах

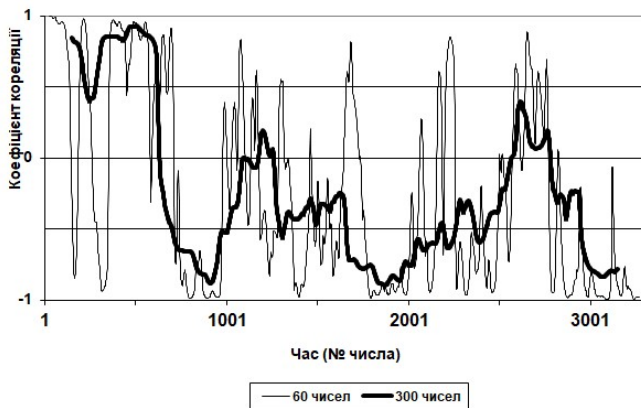


Рисунок 4 – Варіації коефіцієнта кореляції широти та довготи на ковзаючих часових інтервалах довжиною 60 і 300 чисел

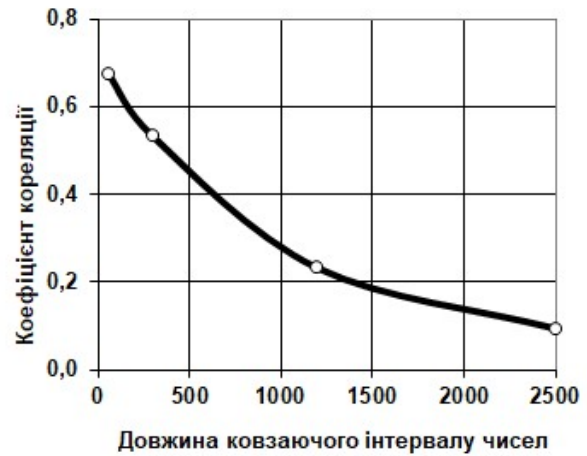


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта кореляції довготи та широти від довжини ковзаючого інтервалу

Через зазначену сильну кореляцію між вимірами широти та довготи на малих часових інтервалах рекомендується виконувати усереднення даних на великих інтервалах (1000 і більше чисел).

Спостерігається також сильна автокореляція даних за малих зсувах у часі (рис. 6).

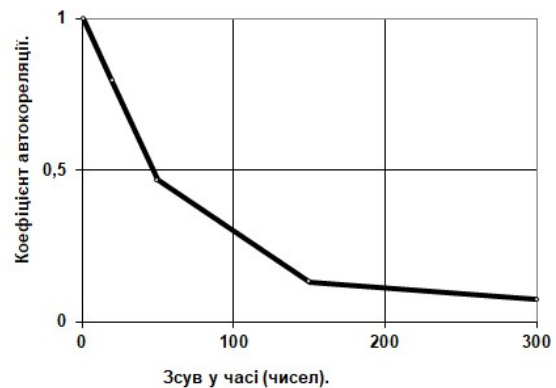


Рисунок 6 – Типова функція автокореляції

Інтервал усереднення не рекомендується вибирати менше 500 чисел через сильний взаємозв'язок результатів вимірювання на малих інтервалах.

Дослідження похибки геолокації проводилося шляхом аналізу результатів усереднення результатів вимірів на різних часових інтервалах. Усереднення, безсумнівно, уможливило зменшити випадкові варіації результатів вимірювань (рис. 7).

Предметом аналізу є випадкова похибка виміру геолокації [9]. Систематична похибка (навіть якщо вона істотна) не така важлива з таких причин. По-перше, в завданнях моніторингу абсолютне положення щодо географічної координатної сітки зазвичай не потрібне. Потрібно визначати зсув щодо будь-якої вихідної чи опорної точки. По-друге, систематична похибка, за необхідності, легко компенсується додаванням поправки (константи).

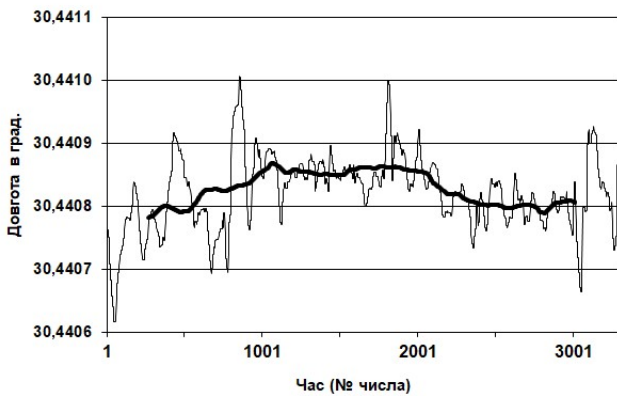


Рисунок 7 – Усреднення (жирна лінія) даних вимірювання (тонка лінія) ковзним середнім з інтервалом 540 чисел

У такому випадку завдання аналізу випадкової похибки сильно спрощується тим фактом, що вимірювана величина (локація) не має невизначеності визначення і має теоретично точне значення (ця умова в метрології виконується далеко не завжди). Тому спостерігаються в експерименті варіації повторних контрольних вимірювань, викликані виключно випадковими похибками вимірювання, і пов'язані з невизначеністю чи нестабільністю самої вимірюваної величини (зовнішня антена залишається нерухомою).

За усереднення випадкової похибки теоретично можливі такі граничні випадки.

Перший граничний випадок відповідає моделі випадкової похибки як ідеального «білого шуму» [10]. І тут середньоквадратичне значення випадкової похибки послаблюється в $n^{0.5}$ раз, де n – кількість чисел, що усереднюються. Збільшуючи n , можна теоретично зменшувати випадкову похибку до нуля і необмежено підвищувати точність вимірювання. Цей випадок відповідає штрих-пунктирній лінії на рис. 8. Ідеальний «білий шум» має нормальний розподіл, є стаціонарним (що дає змогу усереднювати за часом), є ергодичним (що дає змогу усереднювати за реалізаціями), є центрованим (його математичне сподівання дорівнює нулю на будь-якому інтервалі), є некорельованим (відсутня залежність між окремими числами). На практиці зазначені умови виконуються лише частково, тому є межа можливого підвищення точності за допомогою усереднення даних.

Другий граничний випадок відповідає моделі випадкової похибки у виді так званого «броунівського шуму». В цьому випадку усереднення взагалі не дає результату, тому що середньо квадратичне відхилення збільшується в $n^{0.5}$ раз при збільшенні інтервалу усереднення. Реальний приклад – дрейф показань годинника відносно точного часу.

На практиці, як правило, спостерігається проміжний випадок, коли збільшення інтервалу усереднення n спочатку дає ефект, випадкова похибка зменшується і підвищується точність виміру, але потім досягається межа, після якої збільшення n марно. Залишкова випадкова похибка являє собою випадковий дрейф, який неможливо усунути усередненням. Цьому залишку відповідає математична модель у виді так званого «рожевого шуму», для якого середнє квадратичне відхилення і не збільшується і не зменшується при збільшенні інтервалу усереднення.

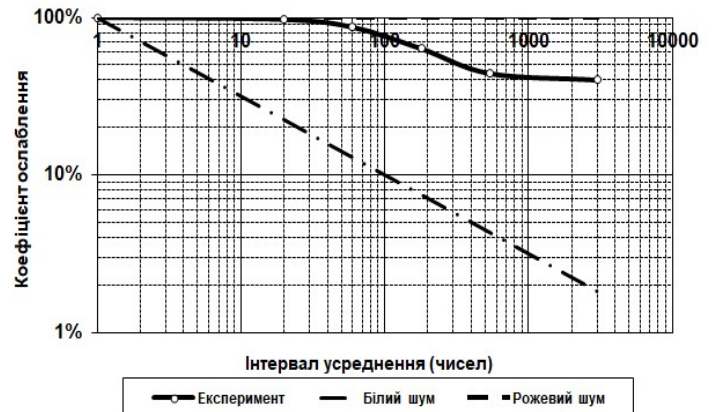


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта ослаблення випадкової похибки від інтервалу усереднення даних

Експериментальні результати усереднення даних геолокації відповідають вказаному типовому проміжному випадку (суцільна лінія на графіку 8). Збільшення інтервалу усереднення спочатку не дає ефекту, тому що положення супутників та атмосферні умови не можуть помінятися за кілька секунд. При усередненні 100–500 результатів спостерігається помітний ефект. Подальше збільшення інтервалу усереднення не доцільно, тому що вже досягнуто можливу межу зниження випадкової похибки.

Остання гранична точка графіка праворуч додатково перевірена за результатами, отриманими в різні дні, у різний час доби, але на тому самому місці. Залишкова випадкова похибка 40% від вихідної є випадковим дрейфом, що не можна усунути усередненням. Цьому залишку відповідає математична модель у виді т.з. «рожевого шуму», для якого середнє квадратичне відхилення і не збільшується і не зменшується при збільшенні інтервалу усереднення.

Висновки

1. За рахунок усереднення результатів вимірювання можна зменшити випадкову похибку супутникової геолокації приблизно вдвічі.

2. Рекомендується усереднювати результати 1000 послідовних вимірів (чисел) для довготи та широти незалежно.

3. Інтервал усереднення не рекомендується вибирати менше 500 чисел через сильну автокореляцію даних на малих інтервалах.

4. При малих інтервалах усереднення спостерігається також небажана сильна кореляція між вимірами широти та довготи.

5. Не рекомендується вибирати інтервал усереднення більше 2000 чисел, оскільки залишкова випадкова похибка є випадковим дрейфом, який не усувається усередненням.

Список літератури

1. Искендеров И. А., Фараджов В. И. Современные методы и средства повышения точности при приеме и обработке сигналов GPS: сб. материалов II междунар. науч.-пр. конф. мол. Февральск. Чтения – 2017, НАА, 2017. С. 37–41.
2. Искендеров И. А., Фараджов В. И. К применению методов математической статистики для повышения точности данных GPS приемников. *Sciences of Europe*. Praha. № 13 (13). Vol 2. С. 38–49.
3. Щербаков А. С., Першин Д. Ю. Определение местоположения высокой точности для одночастотных приемников спутниковой навигации с использованием инерциальных датчиков. Новосибирский государственный университет, МНСК-2011.
4. Сайт виробника приймачів систем супутникової навігації <https://www.u-blox.com> та сторінка з описом продукту https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf
5. Тарасова В. В., Малиновський А. С., Рибак М. Ф. Метрологія, стандартизація і сертифікація: підручник. Київ : Центр навчальної літератури, 2006. 264 с.
6. Демків Т. М., Конопельник О. І., Шопя Я. І. Основи теорії похибок фізичних величин. Методичні матеріали для загального фізичного практикуму. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2008. 40 с.
7. Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця : ВНТУ, 2011. 522 с.
8. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань [Електронне видання]: навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 123 с.
9. https://uk.wikipedia.org/wiki/Випадкова_похибка.
10. https://uk.wikipedia.org/wiki/Білий_шум.
11. https://uk.wikipedia.org/wiki/Рожевий_шум.
12. Иносов С. В., Бондарчук О. В. Связь ошибок измерения температуры с динамикой регулирования теплового объекта. *Управление развитием сложных систем*. Киев, 2018. № 35. С. 162 – 167.

Стаття надійшла до редколегії 10.07.2023

Hryhorovsky Petro

DSc (Eng.), senior researcher, first deputy director, SE "NDIBV",
<https://orcid.org/0000-0003-0527-5890>
SE "NDIBV", Kyiv

Inosov Sergei

PhD, Associate professor, Department of Process Automation, <https://orcid.org/0000-0001-8305-5514>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Samoilenko Mykola

Assistant of the Department of Automation of Technological Processes, <https://orcid.org/0000-0003-4778-5100>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Wolters Andriy

Assistant of the Department of Automation of Technological Processes, <https://orcid.org/0000-0002-3842-8198>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Zaprivoda Andrey

PhD, associate professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes,
<https://orcid.org/0000-0001-9171-9325>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

OPPORTUNITIES TO REDUCE RANDOM ERROR SATELLITE GEOLOCATION DUE TO AVERAGEMENT OF DATA RECEIVED BY U-BLOX NEO-6M-0-001 GPS RECEIVER WITH EXTERNAL ACTIVE ANTENNA

Abstract. In our time, problems of accurate positioning of objects, equipment and cargo arise more and more often. These are the tasks of logistics and precision farming and, a separate group of tasks, positioning during earthworks in construction: pits, arrangement of pile fields, etc. If a positioning accuracy of 10 m is quite sufficient for logistics tasks, monitoring the movement of

transport and cargo, then for construction tasks, an accuracy of 10 cm is required, and building monitoring tasks require a millimeter accuracy. This work is devoted to increasing the accuracy of satellite geolocation by reducing the random error of the receiver. A budget receiver with a price of about \$5 was chosen for the study, from which data on the current geolocation was recorded. The data from the receiver contains a random error, which was eliminated by averaging the result. Studies have shown that with small averaging intervals, the error remains, although it decreases; as the averaging interval increases, the error decreases, however, up to a certain width of the interval; a further increase in the averaging interval ceases to affect the magnitude of the error. It is optimal to average the results in the interval from 1000 to 2000.

Keywords: satellite geolocation; logistics tasks; monitoring tasks; GPS receiver; location point; error; data accuracy; time intervals

References

1. Iskenderov, I. A., Farajov, V. I. (2017). Modern methods and means of improving accuracy in receiving and processing GPS signals. *Sat. Mat.II intl. scientific con., NAA*, pp. 37–41.
2. Iskenderov, I. A., Farajov, V. I. (2015). On the use of mathematical statistics methods to improve the accuracy of GPS receiver data. *Sciences of Europe. Praha*, 13 (13), 2, 38–49.
3. Shcherbakov, A. S., Pershin, D. Yu. (2011). High-precision location determination for single-frequency satellite navigation receivers using inertial sensors. Novosibirsk State University, MNSK-2011.
4. Site of the choice of receivers of satellite navigation systems, <https://www.u-blox.com> https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf
5. Tarasova, V. V., Malinovsky, A. S., Ribak, M. F. (2006). Metrology, standardization and certification. Assistant. Kyiv: Center for Primary Literature, 264.
6. Demkiv, T. M., Konopolnyk, O. I., Shopa, Y. I. (2008). Fundamentals of the theory of errors of physical quantities. Methodical materials for a general physical workshop. Lviv, LNU Publishing Center named after I. Franka, 40.
7. Kuharchuk, V. V., Kucheruk, V. Yu., Volodarskyi, E. T., Grabko, V. V. (2011). Basics of metrology and electrical measurements: textbook. Vinnytsia: VNTU, 522.
8. Lavrenova, D. L., Khlisov, V. M. (2016). Fundamentals of metrology and electrical measurements [Electronic edition]: education. manual Kyiv: NTUU "KPI", 123.
9. https://uk.wikipedia.org/wiki/Accidental_error.
10. https://uk.wikipedia.org/wiki/White_noise.
11. https://uk.wikipedia.org/wiki/Pink_noise.
12. Inosov, Sergei & Bondarchuk, Olga. (2018). Relation between temperature measurement error with regulation dynamics of a thermal plant. *Management of development of complex system*, 35, 162–167 [in Russian].

Посилання на публікацію

- APA Hryhorovsky, Petro, Inosov, Sergei, Samoilenko, Mykola, Wolters, Andriy, Zaprivoda, Andrey. (2023). Opportunities to reduce random error satellite geolocation due to averaging of data received by u-blox neo-6m-0-001 gps receiver with external active antenna. *Management of Development of Complex Systems*, 55, 186–191 [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.55.186-191](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.55.186-191).
- ДСТУ Григоровський П. Є., Іносов С. В., Самойленко М. І., Вольтерс А. О., Запривода А. В. Можливості зменшення випадкової похибки супутникової геолокації за рахунок усереднення даних, отриманих Gps-приймачем U-Blox Neo-6m-0-001 із зовнішньою активною антеною. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 55. С. 186 – 191, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.55.186-191](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.55.186-191).