УДК 531.383

DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771492025334104

С. О. Черненко[1], *PhD студент*, **В. В. Бурнашев**[2], *к.т.н., доцент*

ВІЗУАЛЬНО-РЕЛЬЄФОМЕТРИЧНИЙ НАВІГАЦІЙНИЙ АЛГОРИТМ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Ua У статті запропоновано новий алгоритм візуально-рельєфного позиціювання безпілотного літального апарата. Він використовує порівняння еталонних геофізичних даних місцевості з поточними даними від висотоміру та оптичної камери, а також інформацію вимірювачів кута шляху та швидкості польоту. Наведені формули для визначення роздільної здатності еталонних карт в залежності від точності вимірювачів. Для перевірки працездатності та переваг алгоритму виконано імітаційне моделювання його роботи в програмному середовищі MATLAB. Наведені графіки похибок визначення координат літального апарату для різних розмірів еталонних карт. Обчислювальна ефективність алгоритму зумовлена використанням лише елементарних математичних операції побітового зсуву, суми та різниці, а також операції згортки для поверхневих даних.

En This paper presents a novel algorithm for visual-terrain-based positioning of an unmanned aerial vehicle (UAV). The proposed method leverages a comparison between reference geophysical terrain data and real-time measurements from an al-

[1] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[2] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*

timeter and an optical camera, in addition to incorporating information from flight path angle sensors and airspeed sensors. Analytical expressions are provided to determine the required resolution of the reference maps as a function of the measurement accuracy. To evaluate the performance and advantages of the algorithm, a simulation study was conducted using MATLAB. The resulting plots illustrate the coordinate determination errors of the UAV for various reference map sizes. The computational efficiency of the algorithm is achieved through the use of only basic mathematical operations of bitwise shifts, additions, subtractions, and convolution operations for terrain data.

Вступ

У сучасних навігаційних системах позиціонування за візуальним або рельєфним геофізичним полем є ключовим підходом для зменшення похибок в умовах недоступності супутникових сигналів. Незважаючи на відносно низьку надійність таких систем через чутливість до змін навколишнього середовища і обмежену точність сенсорів [1], вони дозволяють забезпечити надлишковість навігаційних даних у комплексі з безплатформенною інерціальною навігаційною системою, що істотно підвищує загальну автономність і точність позиціонування.

Рельєфометричні системи, такі як *TERCOM*, ефективно використовуються вже понад 50 років завдяки простоті алгоритмів порівняння рельєфу місцевості. Проте вони залежать від якості еталонних карт і можуть втрачати точність у разі значних змінах рельєфу [2, 3]. Алгоритми *SITAN* та *SPARTAN* поєднують інерціальні і рельєфні дані, значно покращуючи точність позиціонування. Однак, їхні обчислювальні алгоритми вимагають використання прецизійних інерціальних датчиків і високої якості попередніх карт [4, 5]. У свою чергу, *Point Mass Filter* (*PMF*) забезпечує надійну локалізацію за рахунок статистичного аналізу, але потребує значних обчислювальних ресурсів [6].

Метод *SLAM*, який застосовується для одночасної локалізації та картографування, забезпечує точні навігаційні рішення, але також характеризується високими вимогами до обчислювальних ресурсів через обробку тривимірних візуальних даних у реальному часі. Вони значно обмежують використання алгоритму для компактних літальних апаратів [7]. *DSMAC* здійснює порівняння з попередньо збереженими еталонними зображеннями місцевості. Однак, ефективність цього методу значною мірою залежить від якості попередньо зібраних зображень і стабільності освітлення, що спричиняє зниження точності під час зміни умов навколишнього середовища [8].

Значно підвищити точність та надійність навігаційних рішень в умовах обмежених ресурсів можливо завдяки обміну інформацією між безпілотними літальними апаратами (БПЛА) та спільній обробці даних у групах [9]. Однак, такий підхід значно знижує автономність позиціонування.

Таким чином, розвиток візуальних та рельєфометричних алгоритмів для створення автономних і стійких до перешкод навігаційних систем, здатних ефективно функціонувати в умовах обмеженої доступності традиційних засобів навігації, є актуальним завданням.

Постановка задачі

Розглянемо задачу автономного визначення координат місцеположення літального апарату (ЛА) на основі еталонних карт рельєфу та оптичних зображень місцевості вздовж заздалегідь відомого маршруту в умовах низьких обчислювальних ресурсів на борту.

Запропонований навігаційний алгоритм

Навігаційний алгоритм використовує інформацію вимірювача відносної висоти, жорстко встановленої на борту направленої вниз оптичної камери, вимірювача швидкості відносно Землі та кута шляху. Датчиками поточної відносної висоти можуть бути лазерні або радіовисотоміри, а швидкості та її напрямку – та ж сама оптична камера або допплерівські, інерціальні (у випадку комлексування) та навіть барометричні вимірювачі.

Принцип роботи алгоритму базується на формуванні бінарних карт активації, що сприяє низьким вимогам до обчислювальних ресурсів на борту. Карта активації формується у відповідності з ділянкою еталонної карти, у межах якої перебуває об’єкт, на основі визначення миттєвої висоти рельєфу. Вона відображає можливе місцезнаходження літального апарату в своїй точці за допомогою біта зі значенням «1», а біт «0» дає інформацію про його гарантовану відсутність у відповідній точці:

$$M(x,y)=\begin{cases}1, \text{ за } D(x,y)<\Delta_M;\\ 0, \text{ за } D(x,y)\geq\Delta_M,\end{cases} \quad (1)$$

де $M(x,y)$ – бінарне значення карти активації у точці (x, y), $D(x,y)$ – різниця між виміряним і отриманим із еталонної карти значеннями геофізичного поля в точці (x, y); Δ_M – порогове значення параметра геофізичного поля, за якого можна вважати, що місцеположення БПЛА у певній мірі імовірне. Значення параметра Δ_M відповідає сумі всіх максимальних похибок вимірювання геофізичного поля з заданою імовірністю.

У наступний момент часу для нового значення висоти рельєфу формується друга карта активації. В цей момент на основі інформації про швидкість ЛА можна знайти його переміщення відносно попередньої точки вимірювання висоти рельєфу. Тоді можна сумістити отриману нову карту активації з попередньою таким чином, щоб співпадали пікселі, відповідні однаковим координатам місцеположення БПЛА на еталонній карті.

Карти активації після зміщення необхідно додати з викиданням областей, які не мають перетину.

Пошук місцеположення БПЛА на карті виконується в певній локальній області, використовуючи ділянки карти. Кожна наступна ділянка має перекривати попередню на половину (рис. 1) для забезпечення достатньої кількості зсувів наступних карт активації. Перекриття карт забезпечується алгоритмом, оскільки пошук відбувається лише у першій половині ділянки карти. Перша половина карти відраховується відносно напряму руху об'єкта по еталонній карті (рис. 2). На рис. 2 місцеположення об'єкту на картах активації після їх зсуву позначене знаком «+».

Рис. 1. Розміщення ділянок еталонної карти

За результатами сумування карт активації область реального місцеположення буде мати більшу суму. Таким чином, маючи кумулятивну карту активації розміром $r/2 \times c$, можна знайти місцеположення об'єкта, де r - кількість рядків ділянки карти, а c – кількість стовбців ділянки карти. Воно буде відповідати рядку та стовбцю карти активації з максимальним значенням.

Для працездатності описаного алгоритму важливо правильно виконувати зсув кінцевої карти активації відносно початкової. При неможливості виконати зсув з певною точністю рекомендується загрубити карту активації:

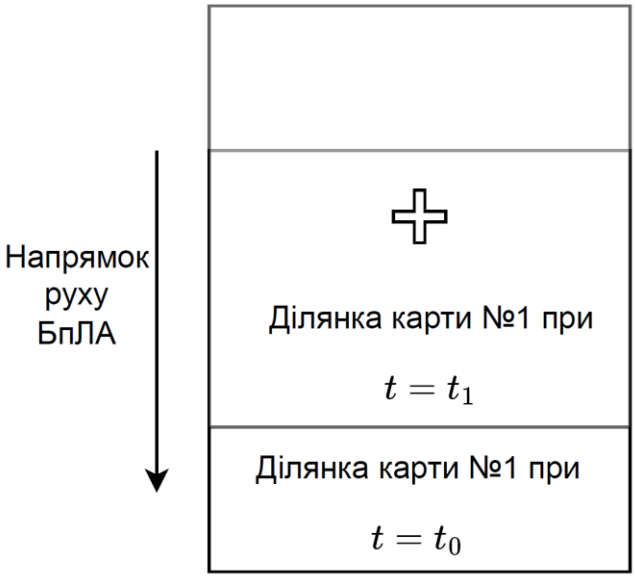

Рис. 2. Зміщення карт активації в два послідовних моменти часу

$$k = b \cdot \left(\frac{\sqrt{2 \cdot \left(1 - \cos\left(\left|\Delta_{\Psi}^{\max}\right|\right)\right)}}{p} + \frac{\left|\Delta_{V}^{\max}\right|}{V} \right), \qquad (2)$$

де k – коефіцієнт загрублення карти активації ($k = 1$ у разі відсутності загрублення); V – швидкість ЛА відносно Землі; $\left|\Delta_{V}^{\max}\right|$ – максимальна похибка вимірювача швидкості; $\left|\Delta_{\Psi}^{\max}\right|$ – максимальна похибка вимірювача кута шляху; b – розмір ділянки карти у пікселях; p – роздільна здатність карти (розмір пікселя у м).

Нехай маємо еталонну карту висот рельєфу 1024x1024 із роздільною здатністю 1м, а швидкість ЛА дорівнює 200 м/с. Тоді для суміщення карт активації з точністю 0,5 пікселя швидкість необхідно знати точністю 0,2 м/с. Це може бути недоступним на певних недорогих БПЛА, але під час загрублення карти активації вимоги до точності вимірювання швидкості польоту суттєво зменшуються. Так, при наявності бортового вимірювача лінійної швидкості з похибкою до 1м/с, $k = 5$. Це означає, що необхідно використовувати роздільну здатність карти $p_1 = p \cdot k = 5$ м. Таким чином, похибка вимірювання швидкості визначає точність визначення положення ЛА.

Використання бінарних карт активації значно спрощує розрахунок основного циклу алгоритму. У розглянутому прикладі карта активації займає лише приблизно 131 КБ. Крім того, такі карти зручно представляти у вигляді послідовності Байтів, а їх суміщення виконувати за допомогою економної операції побітового зсуву.

Візуальна складова алгоритму для кожного еталонного зображення також дає карту активації. Її формування відбувається за допомогою простої та економної операції згортки виміряного проективного зображення поверхні Землі з еталонним зображенням. Формула розрахунку візуальної карти активації ідентична (1).

Виконавши побітову операцію «І» між рельєфометричною і візуальною картами активації, можна позбутися шуму визначення миттєвого місцеположення, і підвищити таким чином точність та швидкість пошуку однозначного максимуму на кумулятивній карті активації.

Для визначення положення літального апарату необхідно виконати наступні дії:

1. завантажити необхідну ділянку еталонної карти рельєфу та обраної візуальної карти;
2. відняти від еталонної ділянки карти виміряну поточну висоту та сформувати рельєфну карту активації за допомогою формули (1);
3. одночасно із п. 2 виконати операцію двовимірної згортки поточного зображення і еталонного та отримати візуальну карту активації;
4. отримати візуально-рельєфну карту активації в результаті операції побітового «І» між поточними візуальною та рельєфною картами активації;
5. у наступний момент часу на основі нового значення виміряної висоти та відповідного нового зображення поверхні Землі сформувати нову візуально-рельєфну карту активації, виконуючи п. 1 – 4;
6. за інформацією про виміряну швидкість польоту та кут шляху сумістити нову візуально-рельєфну карту активації з попередньою так, щоб співпадали пікселі, які відповідають однаковим координатам (широті та довготі);
7. отримати кумулятивну карту активації шляхом додавання між собою відповідних елементів суміщених карт активації;
8. виконувати п. 1 – 7 для наступних моментів часу, генеруючи нові карти активації, та розраховуючи кумулятивну карту стільки разів, щоб кількість суміщень дорівнювала половині розміру в пікселях ділянки еталонної карти;
9. знайти максимальне значення серед усіх елементів на кумулятивній карті активації та відповідні його положенню широту та довготу ЛА у момент першого розрахунку карти активації.

Результати імітаційного моделювання

Виконаємо імітаційне моделювання розробленого алгоритму в програмному середовищі *MATLAB* з використанням синтезованих карт рельєфу місцевості. Отримані послідовні карти активації (рис. 3) розміром 100×100 пікселів правильно відображають місця на ділянці еталонної кар-

ти, де місцезнаходження БПЛА неможливе. Реальне положення об‘єкту тут позначено жовтим пікселем, коричневим кольором – місця, де місцезнаходження об’єкту можливе, а чорним – місця де, місцезнаходження об’єкту неможливе, тобто $D(x, y) \geq \Delta_M$.

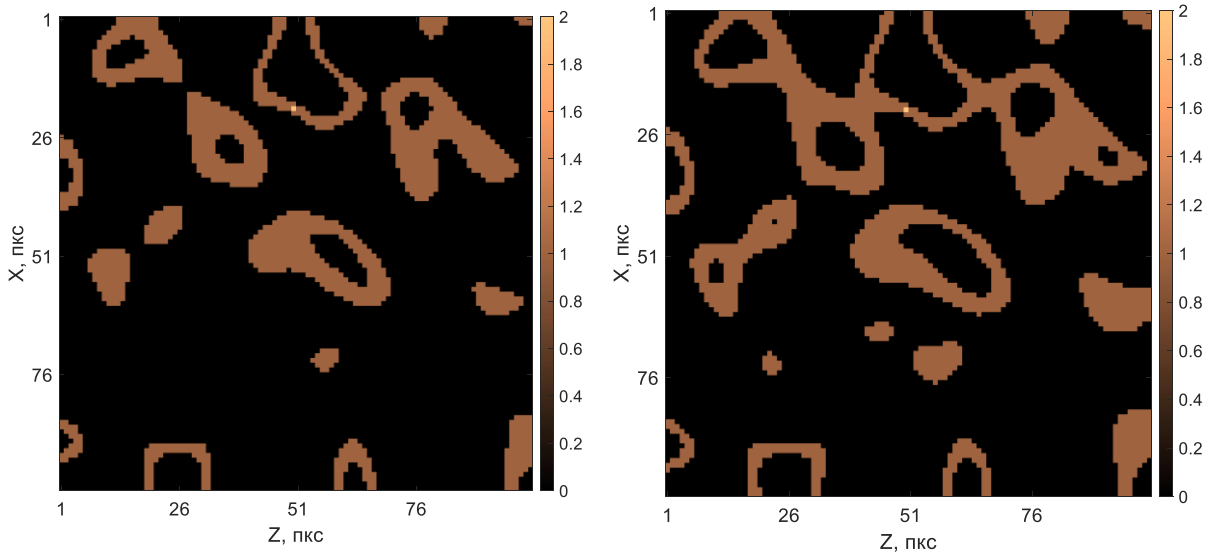

Рис. 3. Приклади двох послідовних карт активації після зміщення

Кумулятивна карта активації (рис. 4) після суміщення послідовних карт активації з рис. 3 уточнює можливе місцеположення БПЛА. Більше значення кожного пікселя відповідає більш імовірному місцеположенню об’єкта в цьому пікселі (рис. 4, зліва).

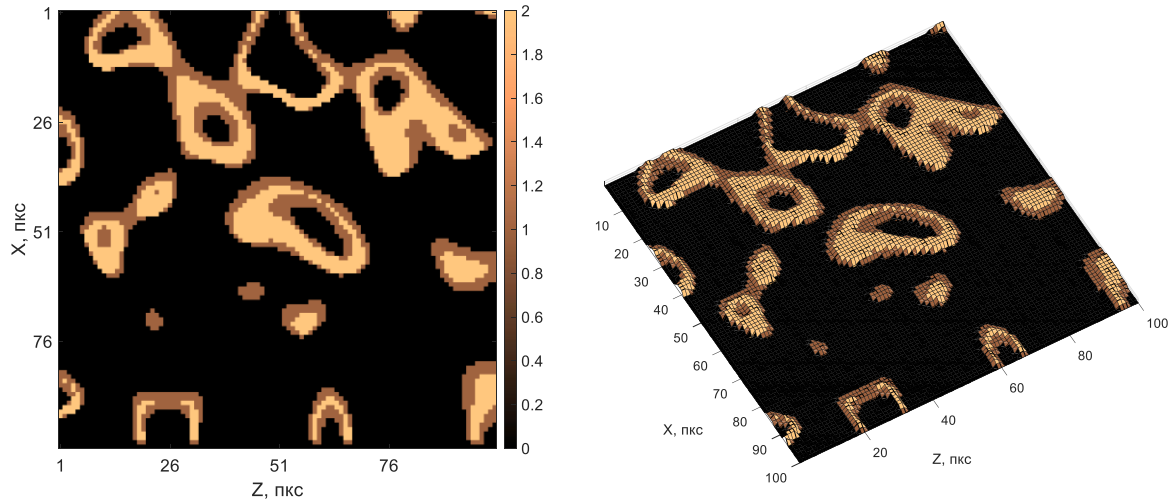

Рис. 4. Результуюча кумулятивна карта активації після зсуву

Тривимірний рисунок дає змогу краще оцінити висоту кумулятивної карти активації (рис. 4, права частина), а також динаміку оцінки можливого місцеположення ЛА. За малої кількості зсувів (наприклад, перших двох на рис. 3) неможливо точно встановити місцеположення (рис. 4). Це пов’язано з тим, що випадкові збіги миттєво виміряних параметрів геофізичного поля з ділянками еталонної карти трапляються так само часто, як і

коректна активація пікселя, що відповідає справжньому місцеположенню об'єкту. Для більш точного визначення необхідна більша кількість суміщень. Саме тому пропонується виконувати максимально можливу кількість суміщень миттєвих карт активації, що дорівнює половині розміру ділянки еталонної карти. Для прикладу із рис. 3 кількість суміщень дорівнює 50. Така кількість забезпечує перевагу активації справжнього місцеположення над випадковими активаціями інших пікселів карти.

Після виконання всіх суміщень кумулятивна карта активації має локальну замкнуту область, де всі пікселі мають максимальне значення (рис. 5), тобто неможливо виділити один піксель місцезнаходження ЛА. В такому випадку для використання в розв'язаній схемі комплексування місцеположення об'єкта пропонується визначати за середнім арифметичним між пікселями з максимальним значенням. Для комплексування в слабозв'язаній схемі можна визначити цю область разом з коваріаційною матрицею похибки вимірювань, що дозволить підвищити точність позиціонування.

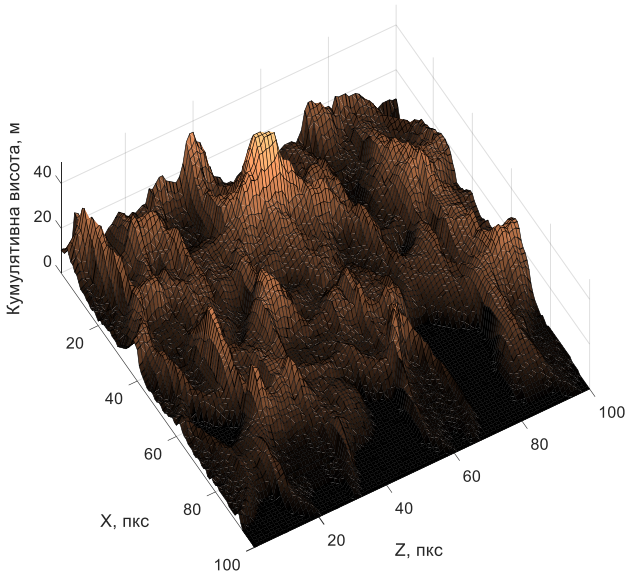

Рис. 5. Кінцевий вигляд кумулятивної карти активації після виконання останнього п'ятдесятого зсуву для карти розміром 100 х 100 пікселів

Визначений максимум на кумулятивній карті активації (рис. 5) відповідає початковому місцеположенню ЛА на першій миттєвій карті активації (рис. 3) і має координати (20,50).

Похибка визначення координат місцеположення обмежена розмірами ділянки еталонної карти і є залежною від форми геофізичного поля (рис. 6, рис. 7).

Синя крива рис. 6 відображає проміжну похибку місцеположення, а червоне коло – похибку результуючого розрахованого значення. Таким чином демонструється зменшення величини похибки при накопиченні на кумулятивній карті суміщень миттєвих карт активації. Один раз у разі фік-

сації місцеположення навігаційний обчислювач видав координати місцеположення із похибкою 21 метр, що викликано великою областю невизначеності під час виконання зсувів карт активації. У разі збільшення розміру

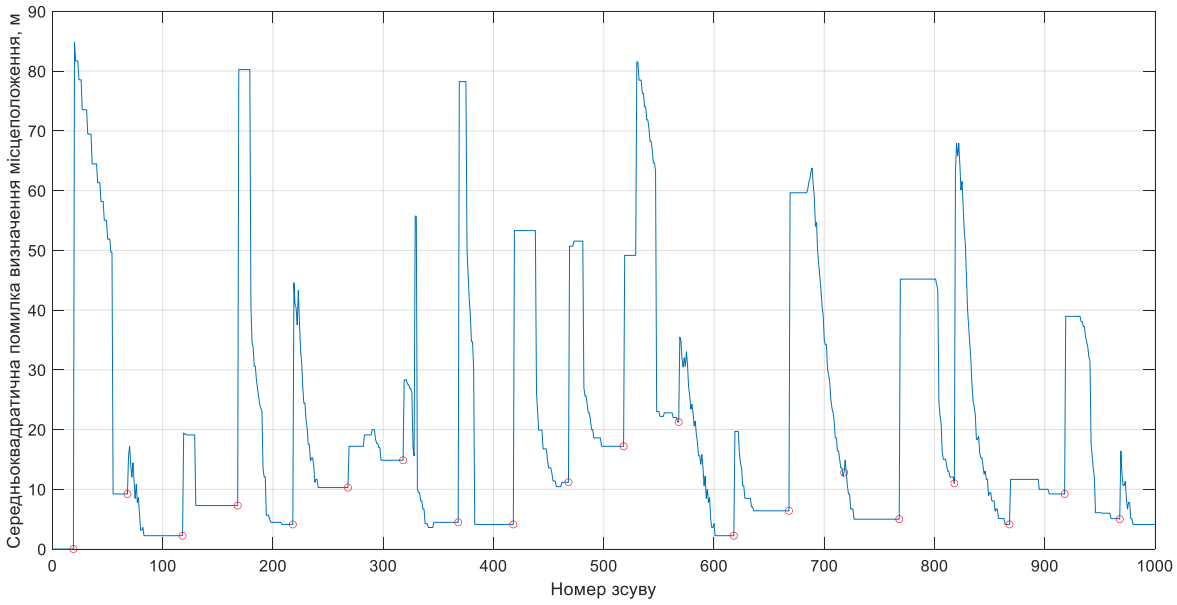

Рис. 6. Похибка визначення координат місцеположення із використанням ділянок еталонної карти 100x100 пікселів

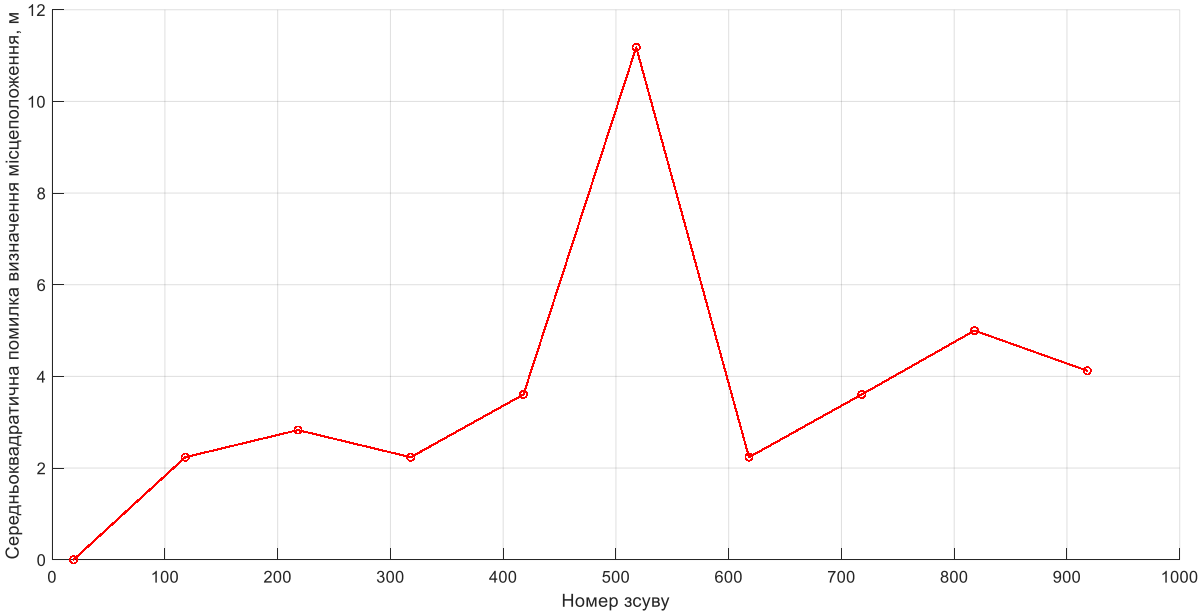

Рис. 7. Результуюча похибка визначення координат місцеположення із використанням ділянок еталонної карти 200 x 200 пікселів

ділянки еталонної карти вдвічі, до 200 x 200 пікселів похибка місцеположення зменшується вдвічі (рис. 7). Такий рівень точності може бути задовільним для подальшого комплексування. Для цього потрібно разом із візуально-рельєфометричним навігаційним рішенням формувати коваріацій-

ну матрицю похибок вимірювання. Якщо така система комплексування не використовується, необхідно збільшити кількість суміщень для однозначної фіксації місцеположення ЛА.

Висновки

Розроблений візуально-рельєфометричний навігаційний алгоритм літального апарату забезпечує автономне визначення місцеположення без накопичення похибок із часом та не потребує значних обчислювальних ресурсів на борту. Він відрізняється від вже відомих використанням кумулятивних бінарних карт активації, а також одночасно двох геофізичних полів.

Точність визначення місцеположення залежить від розміру використаних ділянок еталонної карти, кількості сформованих карт активації, а також точності вимірювачів швидкості через рівень загрублення роздільної здатності карт.

Імітаційне моделювання та розрахунки свідчать про можливість отримання для дозвукових ЛА похибки визначення координат менше 12 м. Її подальше зменшення можливе шляхом комплексування, а також за рахунок обробки більших ділянок карт.

Обчислювальна ефективність алгоритму зумовлена використанням лише елементарних математичних операцій побітового зсуву, суми та різниці для точкових даних, а також операції згортки для поверхневих даних. Він може бути реалізований на недорогому центральному процесорі (*CPU*), графічному процесорі (*GPU*), а також на програмованих вентильних матрицях (*FPGA*).

Список використаної літератури

1. *Groves, P. D.* Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Artech House, 2013.
2. *Han, S.*, & *Bang, H.* Terrain Contour Matching Algorithm using Robust Feature Extraction. Sensors, 2021.
3. *Siouris, G. M.* Missile Guidance and Control Systems. Springer, 2006.
4. *Xu, Z.*, et al. An improved terrain-aided navigation algorithm based on extended Kalman filter. IEEE Access, 2019.
5. *Zhang, Y.*, et al. Terrain-Aided Navigation Using Bayesian Estimation with Robust Covariance Adaptation. Sensors, 2020.
6. *Gustafsson, F.* Statistical Sensor Fusion. Studentlitteratur AB, 2018.
7. *Thrun, S.*, *Burgard, W.*, & *Fox, D.* Probabilistic robotics. MIT Press, 2005.
8. *Ding, M.*, et al. Scene Matching Based Navigation Technology and Its Applications: A Review. IEEE Access, 2019.

9. *Liu, H.*, et al. Cooperative localization and navigation techniques for UAV swarms. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020.