

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДОННАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Пилипів Олег Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Підвищення точності ГНСС-позиціонування в міських районах на основі
оцінки видимості неба

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня О.В. Пилипів
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Ільків Євгеній Юрійович, к.т.н, доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання
керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри
геодезії та землеустрою

М.М. Приходько
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

Освітньо-професійна програма Геодезія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ГКЗ
Приходько М. М.

«__» _____ 2026
року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Пилипів Олег Вікторович

1. Тема роботи «Підвищення точності ГНСС-позиціонування в міських районах на основі оцінки видимості неба»

Керівник роботи доц. Ільків Є.Ю.

Наказ ректора від «13» травня _____ 2026 року № 358.

2. Термін подання студентом роботи – 25 червня _____ 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи:

Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1. Огляд актуальних методів визначення місця розташування за допомогою ГНСС у міській забудові та визначення видимості небесного склепіння.

2. Загальний огляд алгоритму оцінки видимості неба.

3. Проведення дослідження та результати

5. Перелік графічного матеріалу:

- 1 Алгоритм оцінки видимості неба.
2. Діаграма полярної області з даними супутників.
3. Місця проведення статичних експериментів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Огляд актуальних методів визначення місця розташування за допомогою ГНСС у міській забудові та визначення видимості небесного склепіння.	Ільків Є. Ю.	
2	Загальний огляд алгоритму оцінки видимості неба	Ільків Є. Ю.	
3	Проведення дослідження та результати	Ільків Є. Ю.	

7. Дата видачі завдання – «01» березня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Опрацювання рекомендованої літератури.	01.03.26 15.03.26	

2	Складання попереднього плану та змісту бакалаврської роботи.	19.03.26 25.03.26	
3	Огляд актуальних методів визначення місця розташування за допомогою ГНСС у міській забудові та визначення видимості небесного склепіння.	26.03.26 12.04.26	
4	Загальний огляд алгоритму оцінки видимості неба	13.04.26 15.05.26	
5	Проведення дослідження та результати	16.05.26 18.05.26	
6	Оформлення бакалаврської роботи та додатків до неї, складання висновків.	19.05.26 31.05.26	

Студент

(підпис)
підпису)

Пилипів О. В.

(розшифровка

Керівник

(підпис)
підпису)

Ільків Є. Ю.

(розшифровка

Анотація

В обставинах густої міської забудови на території України, особливо у старовинних частинах міст, таких як Київ, Львів чи Івано-Франківськ, якість визначення місця розташування через супутникові навігаційні системи (ГНСС) зазнає помітного погіршення.

Це виникає внаслідок блокування сигналу високими спорудами, явища багатопроменевості та розсіювання радіохвиль від фасадів будівель, що тягне за собою коливання у визначенні координат у межах національної системи відліку УСК-2000.

Покращення точності визначення розташування стає реальним, якщо брати до уваги характер оточуючого середовища, в якому функціонує приймач.

На відкритих просторах раціонально впроваджувати технології кінематичного знімання координат у темпі реального часу (RTK), що інтегровані з вітчизняними сукупностями безперервно працюючих базових станцій.

З іншого боку, у важкопрохідних умовах з густою забудовою найбільш життєздатним є застосування підходів до позиціювання з опорою на тривимірні макети міських споруд (3DMA GNSS).

Як наслідок, ідентифікація оточуючих обставин перетворюється на визначальний елемент для гнучкого підбору способів опрацювання даних, отриманих від супутників.

Міський ландшафт цілком реально впорядкувати, взявши до уваги ступінь оголеності відкритого неба, що прямо позначається на кількості доступних навігаційних апаратів та надійності отримання сигналу.

У цьому дослідженні ми представляємо методику, яка дає змогу, оперуючи сирими даними GNSS, визначити ступінь перекриття простору та скласти профіль оточуючої забудови.

Головна ідея ґрунтується на детальному вивченні видимості супутників та потужності прийнятих сигналів, які фактично репрезентують фізичну конфігурацію перешкод.

Інтенсивний поступ у сфері приймання сигналів з різних супутникових систем (таких як GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) призводить до суттєвого збільшення числа тих апаратів, які ми можемо зафіксувати, що відкриває нові горизонти для дослідження просторових умов.

Можливість бачити супутники та закономірності у послабленні сигналу здатні слугувати цінними індикаторами для категоризації умов приймання, якщо застосувати до них підходи машинного навчання.

Задля з'ясування ефективності представленого підходу було проведено симуляційне моделювання, використовуючи класифікації з різним рівнем деталізації, та проаналізовано вплив цього на коректність визначення видимості небесної сфери та стабільність встановлення позиції.

Ключові слова: супутникові навігаційні системи; 3DMA GNSS; міська забудова; УСК-2000.

Abstract

In the conditions of dense urban development in Ukraine, especially in the old parts of cities such as Kyiv, Lviv or Ivano-Frankivsk, the quality of location determination via satellite navigation systems (GNSS) is subject to noticeable deterioration.

This occurs due to signal blocking by tall buildings, the phenomenon of multipath and scattering of radio waves from building facades, which entails fluctuations in determining coordinates within the national reference system USK-2000.

Improving the accuracy of location determination becomes real if we take into account the nature of the environment in which the receiver operates.

In open spaces, it is rational to implement technologies for kinematic coordinates acquisition in real time (RTK), which are integrated with domestic sets of continuously operating base stations.

On the other hand, in difficult conditions with dense buildings, the most viable approach is to use positioning approaches based on three-dimensional models of urban structures (3DMA GNSS).

As a result, the identification of the surrounding circumstances becomes a determining element for the flexible selection of methods for processing data received from satellites.

It is quite possible to organize the urban landscape, taking into account the degree of exposure to the open sky, which directly affects the number of available navigation devices and the reliability of signal reception.

In this study, we present a methodology that allows, using raw GNSS data, to determine the degree of overlap of space and to create a profile of the surrounding buildings.

The main idea is based on a detailed study of the visibility of satellites and the power of received signals, which actually represent the physical configuration of obstacles.

Intensive progress in the field of receiving signals from various satellite systems (such as GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) leads to a significant increase in the number of devices that we can record, which opens up new horizons for studying spatial conditions.

The ability to see satellites and patterns in signal attenuation can serve as valuable indicators for categorizing reception conditions if machine learning approaches are applied to them.

To clarify the effectiveness of the presented approach, simulation modeling was carried out using classifications with different levels of detail, and the impact of this on the correctness of determining the visibility of the celestial sphere and the stability of position determination was analyzed.

Keywords: satellite navigation systems; 3DMA GNSS; urban development; USK-2000.

ЗМІСТ

Вступ

1. Огляд актуальних методів визначення місця розташування за допомогою ГНСС у міській забудові та визначення видимості небесного склепіння

1.1. Специфіка роботи ГНСС-систем для визначення координат у містах України

1.2 Класичні методи позиціонування та їх обмеження

1.3 Підхід 3DMA GNSS та використання 3D-моделей забудови

1.4 Поняття видимості неба (Sky Visibility) як інтегрального показника

1.5 Контекстно-залежні алгоритми та машинне навчання

1.6 Актуальність розробки алгоритму оцінки видимості неба без 3D-моделей

2. Загальний огляд алгоритму оцінки видимості неба

2.1 Алгоритм оцінювання видимості неба

2.2 Алгоритм оцінювання контуру неба

2.3 Алгоритм оцінки контурів будівлі

2.4 Алгоритм оцінки меж будівлі

2.5 Алгоритм виправлення межі

3. Проведення дослідження та результати

3.1 Продуктивність з ідеальною класифікацією LOS/NLOS

3.2 Продуктивність з різною точністю класифікації LOS/NLOS

3.3 Продуктивність з двома різними підходами до класифікації LOS/NLOS

Висновки

Список використаної літератури

Вступ

Навігаційні системи, що базуються на глобальних супутникових мережах (ГНСС), стали сьогодні невід'ємною частиною нашого буденного існування.

Їхня сфера застосування охоплює керування транспортом, геодезійні операції, землевпорядні вимірювання, нагляд за об'єктами інфраструктури та різноманітні мобільні послуги.

Чи не найчастіше їх залучають для локалізації людей, що пересуваються пішки, особливо у міських агломераціях.

Проте, у районах з густою забудовою, як-от у серцевинах Києва, Львова, Харкова чи Івано-Франківська, точність визначення координат різко падає.

Височенні споруди, тісні провулки та заплутане планування мікрорайонів призводять до блокування сигналів, явища багатопроменевості та суттєвої втрати прямого контакту із супутниками.

Внаслідок таких перешкод, похибка визначення місця може досягати кількох десятків, а то й перевищувати сто метрів, що є неприпустимим для завдань навігації та геоінформаційних систем, прив'язаних до системи координат УСК-2000.

Один із життєздатних шляхів до покращення точності визначення місця розташування у міській забудові – це застосування технології 3DMA GNSS, крію основою слугують наявні тривимірні макети міської забудови.

Використовуючи 3D-моделі споруд, можна заздалегідь передбачити, як виглядатиме видимість супутників, дослідити можливі шляхи, якими

поширюватиметься сигнал, і розрахувати характеристики його прийому, наприклад, показник «несуча на одиницю шуму» (C/N_0).

Цей метод дає змогу відділяти сигнали, що надходять напряму (LOS), від тих, які були отримані після відбиття чи заломлення (NLOS).

Аби точніше визначити, де знаходиться користувач, можна вдатися до так званого «звіряння тіней» — це процес, коли реальну картину видимості супутників зіставляють із тим, що мало б бути видно з низки припущених місць розташування.

Окрім того, тривимірна модель слугує для обрахунку часових затримок сигналу та створення штучних (віртуальних) псевдодальностей, використовуючи метод променів.

На цій базі стає можливим визначити координати за допомогою методу найбільшої правдоподібності: він полягає у зіставленні тих псевдодальностей, що були заміряні, з тими, що були вирахувані для цілої низки можливих точок.

Поєднання цього методу зі «звірянням тіней» дає змогу досягти надійніших показників, особливо коли позиціонування відбувається впоперек вулиць, де забудова та її конфігурація є вирішальними.

Новітні студії показують: чи наскільки добре працюють 3DMA GNSS алгоритми, то значною мірою залежить від того, наскільки відкритий обрій.

Огляд небесної сфери виступає як ключовий параметр, що вказує, яка частина небосхилу доступна для вловлювання сигналів з певної локації.

Щоб цю метрику виміряти, зазвичай застосовують знімки, зроблені камерою з широким кутом огляду (так званою "риб'яче око"), спрямованою точно у зеніт.

Далі, цей отриманий кадр піддається аналізу, щоб створити умовну "сітку неба", яка розрізняє незаблоковані та перекриті зони.

Коли немає змоги зробити знімки на місці, маску неба можна створити, оперуючи тривимірною моделлю міської забудови.

Це досягається шляхом конструювання діаграми небесної сфери, прив'язаної до точного місця розміщення приймача.

Зіставляючи маски, отримані з камери "риб'яче око", з тими, що згенеровані на основі 3D-моделі споруд, ми маємо можливість визначити, наскільки цифрове відображення оточення відповідає фактичним умовам, у яких відбуватиметься приймання сигналів.

На рисунку 1 продемонстровано, як виглядає така маска неба, сформована за допомогою 3D-моделі будівель.

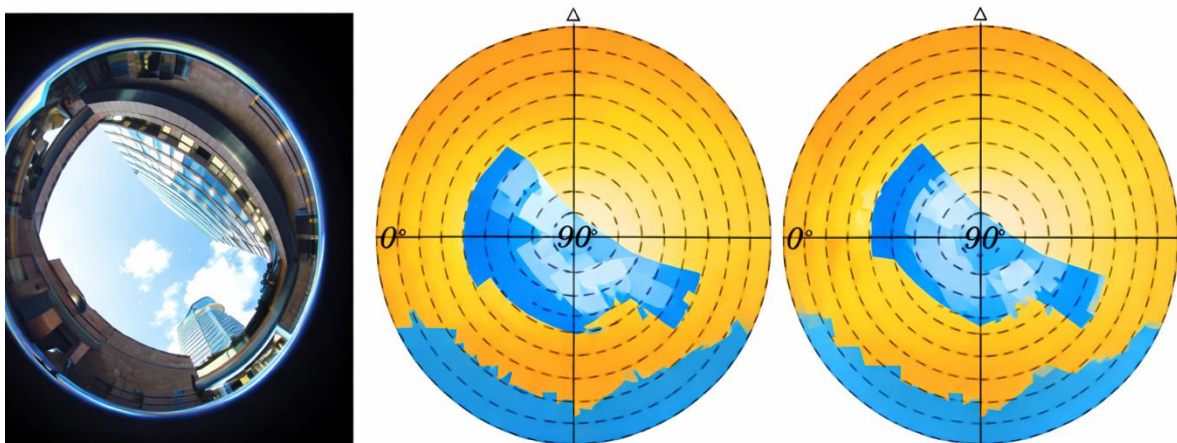


РИСУНОК 1 Ілюстрація світлини, зробленої за допомогою об'єктива з широким кутом огляду типу «риб'яче око» (зліва), відповідної схеми видимості відкритого неба, створеної на базі цього кадру (у центрі), і, нарешті, схеми покриття неба, реконструйованої з використанням тривимірного макета забудови (справа).

Зіставлення обох версій схеми вказує на несуттєві відмінності, які проглядаються у передачі контурів зон, де небо відкрите, від зон, що перекриті.

Відносно маски, котра була згенерована на базі тривимірної репрезентації будівель, ступінь огляду неба визначається шляхом фіксації кута підйому прямої, що окреслює контур забудови, для кожної визначеної азимутальної орієнтації.

Отримані значення використовуються для кількісної оцінки тієї частини небосхилу, яка здатна приймати супутникові сигнали.

Прозорість неба для маски, сформованої із застосуванням тривимірного макета споруд, обчислюється, виходячи з кута піднесення граничної лінії забудови, який позначається символом $\alpha(\varphi)$ для будь-якого азимуту φ .

Ця міра прозорості оцінюється як середнє значення виразу $\cos^2(\alpha)$ у межах повного азимутального обертання:

$$SV = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2(\alpha(\varphi)) d\varphi,$$

або ж у такому, дискретному, вигляді для N кутів азимуту:

$$SV \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos^2(\alpha_i).$$

У рамках бакалаврської роботи було проведено дослідження кореляції між параметром видимості небесної сфери та точністю визначення географічних координат, здобутих різними підходами GNSS-визначення.

А саме, вивчалася залежність помилок у координатах від ступеня видимості неба для наступних технік:

- результату, отриманого за допомогою типового алгоритму, що застосовується у комерційних GNSS-приймачах;
- визначення координат, виконаного із застосуванням методу найменших квадратів із ваговими коефіцієнтами (WLS);
- технології узгодження на основі аналізу тіней (shadow matching);
- алгоритму 3DMA GNSS, що був реалізований із урахуванням маски неба.

Зіставлення отриманих даних дало змогу з'ясувати, як саме конфігурація міського ландшафту позначається на надійності кожного з методів, а також визначити, наскільки ці методи реагують на випадки, коли супутники видно нечітко.

Візуалізацію цих взаємозв'язків можна побачити на рисунку 2.

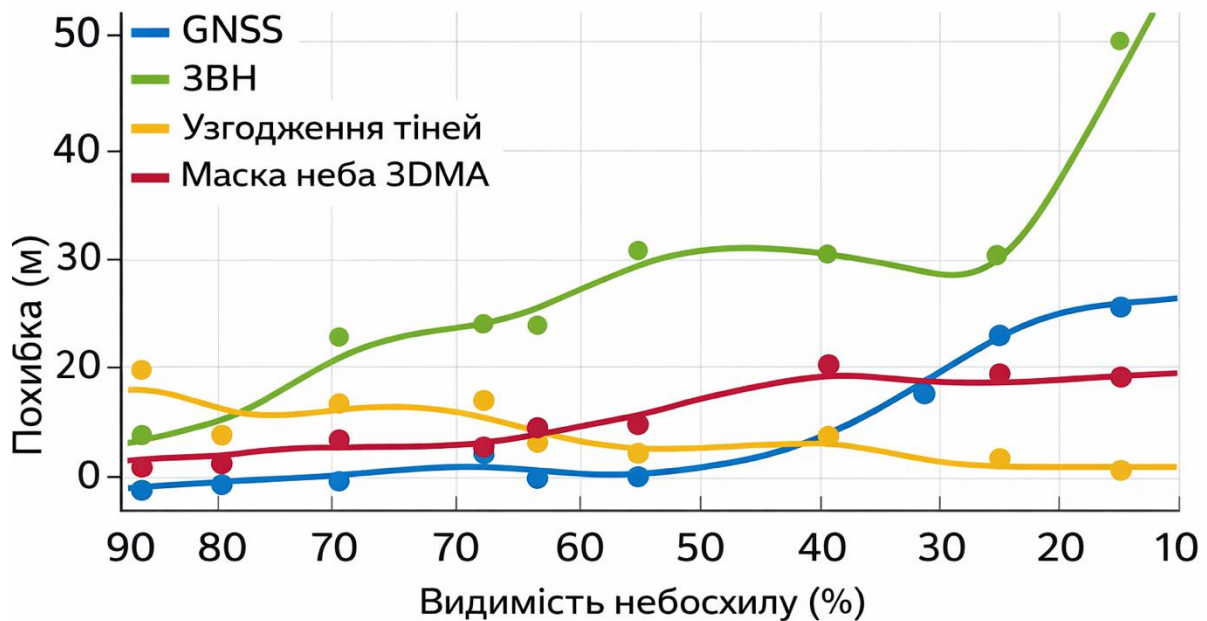


Рисунок 2. Графік похибок GNSS методів

Параметрами, за якими проводилися дослідження, були визначені наступні:

1. Метод найменших квадратів із врахуванням ваг (WLS).

Розрахунок координат здійснювався за допомогою алгоритму WLS, що був втілений на основі вільнодоступного програмного забезпечення goGPS (версія 0.4.3). Опрацювання матеріалів проводилося за традиційною моделлю, застосовуючи псевдовідстані та відповідне коригування (зважування) отриманих вимірювань.

2. Техніка уподібнення тіней (Shadow Matching).

Для з'ясування, які саме супутники були видимі, використовувалася інформація про геопросторове розташування приймача та детальна тривимірна модель забудови міста. Щоб знайти найкраще місцезнаходження, створювалася низка можливих точок (сітка потенційних координат), яка охоплювала область у межах 30-метрового радіуса навколо первинного приблизного місця. Зіставляючи передбачувану видимість супутників із тією, що була зафіксована насправді, можна було визначити найбільш правдоподібне розташування.

3. 3DMA GNSS з використанням маски небосхилу.

Застосовано обчислювально спрощений варіант алгоритму 3DMA GNSS, що використовує трасування променів, який залучав ідентичні параметри для пошуку та ту саму структуру сітки потенційних точок, як і у вже згаданій раніше методиці. Визначення координат відбувалося шляхом порівняння між розрахованими та фактично отриманими параметрами сигналів.

Розгляд зображення 2 свідчить про те, що результативність кожного із застосованих методів значною мірою обумовлена відсотком відкритого простору неба.

За умов відмінної видимості небесного склепіння, обидві техніки дають незначні зсуви, проте у заплутаних умовах щільної міської забудови (так званого “міського каньйону”) саме нестандартні рішення демонструють вищу точність.

Це цілком обґрунтовує потребу у гнучкому виборі методу визначення координат, що має залежати від специфіки навколишньої забудови.

Виходячи з вищесказаного, метою даного дослідження є створення методики для автоматичного визначення ступеня видимості неба та класифікації типу міського ландшафту.

У сфері позиціонування, що базується на оточенні, під "контекстом" ми маємо на увазі певний різновид оточення, в якому перебуває користувач, що можна згрупувати як знаходження у приміщенні, на відкритому повітрі, чи у частково обмеженому просторі (як-от міська забудова).

Зазвичай, для з'ясування цього контексту застосовують набори даних, отриманих з інерційних вимірювальних пристроїв (ІВП), інформації з мереж Wi-Fi, сигналів Bluetooth, стільникових мереж, супутникової навігації (GNSS) чи акустичних датчиків.

Якщо розглядати методи, які роблять наголос саме на даних GNSS, то вхідними змінними для класифікації типово слугують інтенсивність отриманого сигналу та число супутників, які системою приймаються.

Саме на цих характеристиках будується модель, метою якої є розмежування між перебуванням всередині будівлі та на відкритій місцевості.

Однак сигнали GNSS надають набагато багатший обсяг відомостей про конфігурацію оточуючого простору.

Існує прецедент, коли властивості багаторимарності застосовують для більш точного визначення розташування зовнішніх стін будівель у горизонтальній площині, тоді як вивчення конфігурації видимості орбітальних апаратів слугує для ідентифікації характеру оточення вздовж шляхів пересування.

Фундаментальна концепція цієї нової методики полягає у застосуванні показників видимості супутників, що здобуваються

безпосередньо з вимірювань GNSS, з метою визначення рівня відкритості неба та категоризації умов приймання сигналів у межах зовнішнього простору.

На противагу наявним розробкам, цей спосіб не вимагає оперування об'ємними моделями забудови чи кадрами, отриманими з камер із широким кутом огляду (на кшталт "риб'яче око"). Усі необхідні дані генеруються винятково шляхом дослідження супутникових реплік.

Суть практичної користі від цього методу у тому, що його можна вбудувати просто у програмне забезпечення більшості актуальних GPS/ГЛОНАСС-приймачів, включно з тими портативними гаджетами, які не залежать від доступу до сторонніх інформаційних потоків.

1. Огляд актуальних методів визначення місця розташування за допомогою ГНСС у міській забудові та визначення видимості небесного склепіння

1.1. Специфіка роботи ГНСС-систем для визначення координат у містах України

Супутникова навігація (як то GPS, Galileo, GLONASS чи BeiDou) користується значним попитом в Україні задля виконання вимірювальних, землевпорядних, будівельних та власне навігаційних робіт.

Однак, коли мова заходить про густо забудовані міські території, показники продуктивності GNSS помітно падають.

Ця проблема найгостріше проявляється у старовинних частинах Києва, Львова, Одеси, Харкова та Івано-Франківська, де вузькі провулки створюють ефект так званих «міських ущелин».

Ключові причини, що негативно впливають на точність, включають:

- Перешкоджання проходженню сигналу через стіни будівель;
- Явище багатопроменевого відбиття (multipath);
- Скорочення числа супутників, які чітко проглядаються (пряма видимість, LOS);
- Збільшення частки сигналів, що потрапляють до приймача непряним шляхом (near-line-of-sight, NLOS).

У системі координат державної значущості УСК-2000, навіть дрібні неточності у визначенні локації здатні спричинити суттєві розбіжності під час виконання земельно-кадастрових або будівельно-інженерних завдань.

З огляду на це, забезпечення надійного визначення місця розташування у міській забудові набуває гостроти в контексті сучасної української діяльності, особливо якщо брати до уваги тенденції до оцифрування земельних площ та відновлення наявних комунікацій.

1.2 Класичні методи позиціонування та їх обмеження

На відкритих просторах, зокрема, така відпрацьована методика, як квадратичний метод найменших зважених значень (WLS), цілком задовільно себе демонструє.

На теренах України ця схема роботи активно використовується як у комерційному обладнанні для прийому сигналів, так і в програмному забезпеченні з відкритим кодом (згадаємо goGPS, наприклад).

Проте, коли мова заходить про забудовані міські райони, ці традиційні підходи стикаються з низкою суттєвих недоліків:

- Нездатність адекватно враховувати особливості міської забудови та конфігурацію будівель.
- Підвищена вразливість до впливу сигналів, що надходять непрямыми шляхами (NLOS).
- Зниження надійності обчислень при обмеженій кількості супутників із прямим баченням (LOS).
- Значне збільшення помилки визначення горизонтального положення, що може сягати десятків метрів.

Хоча впровадження мультисистемних приймачів (multi-GNSS) значно збільшило загальну кількість доступних супутників, це не усуває проблему перешкод від будівель.

Навіть коли доступно 20–30 супутників, значна їхня частина може виявитися непридатною для здійснення високоточного визначення координат через складну конфігурацію оточення у міських каньйонах.

1.3 Підхід 3DMA GNSS та використання 3D-моделей забудови

Серед життєздатних шляхів покращення визначення місця розташування у міських агломераціях виділяють застосування об'ємних мап забудови (допомога 3D-моделей супутниковим навігаційним системам, 3DMA GNSS).

Ключові аспекти цієї методики включають:

- передбачення того, які супутники будуть видимі, базуючись на тривимірній моделі будівель;
- імітування траєкторій руху сигналу (метод променів);
- розрізнення між прямими (LOS) та багатопроменевими (NLOS) сигналами;
- застосування технік узгодження зон затінення (shadow matching).

У контексті України, для створення таких 3D-моделей можуть бути використані такі джерела:

- дані, отримані через наземне лазерне сканування (TLS);
- сканування з використанням мобільних платформ;
- отримання даних методами фотограмметрії з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА);
- зведення інформації з BIM- та ГІС-моделей у рамках концепції цифрових міст.

Обмеженням підходу 3DMA є потреба у наявності докладного тривимірного представлення місцевості, а також потреба у значній обчислювальній потужності.

Для багатьох автономних приймальних апаратів чи портативних гаджетів це створює певні рамки.

1.4 Поняття видимості неба (Sky Visibility) як інтегрального показника

Фактор видимості неба (Sky View Factor, SVF) у наукових працях трактується як сукупна характеристика відкритості простору над головою.

Він демонструє, яка частина сфери неба фактично доступна для прийому сигналів від супутників із заданої точки спостереження.

Зазвичай вимірювання видимості неба здійснюють:

- використовуючи камери з надшироким кутом огляду (типу "риб'яче око");
- шляхом обробки тривимірних моделей забудови;
- на основі просторового дослідження контурів об'єктів, що блокують огляд.

В українських містах величина SVF може коливатися від 80–90 % на відкритих територіях до 10–30 % у районах із густою забудовою історичних центрів.

Наявні дослідження засвідчують зв'язок між значенням SVF та розмірами помилки визначення GNSS-координат.

Проте більшість поширених методів вимагають або залучення додаткових сенсорів, або наявності тривимірної інфраструктури даних.

1.5 Контекстно-залежні алгоритми та машинне навчання

Останнім часом у галузі GNSS-визначення місця розташування все активніше впроваджуються техніки машинного навчання з метою:

- рознесення прямих і багатопроменевих сигналів (LOS/NLOS);
- ідентифікації явища багатопроменевості;
- визначення характеру оточення (приміщення/відкритий простір/щільна забудова).

Як вихідні дані для аналізу застосовуються такі показники:

- співвідношення носіївної потужності до спектральної густини шуму (C/N_0);
- висота супутника над горизонтом;
- похибки у вимірюванні псевдодальності;
- число супутників, що перебувають на відстеженні;
- характеристики зсуву частоти через ефект Доплера.

Для умов України цей спосіб є надзвичайно привабливим, оскільки він дає змогу впроваджувати розроблені алгоритми без потреби постійного доступу до зовнішніх сховищ даних чи детальних тривимірних мап місцевості.

1.6 Актуальність розробки алгоритму оцінки видимості неба без 3D-моделей

Огляд літературних джерел свідчить про те, що:

- Традиційні методики не беруть до уваги просторову конфігурацію забудови;
- Рішення формату 3DMA вимагають наявності тривимірних цифрових макетів;
- Підходи, що базуються на використанні камер, обтяжені необхідністю застосування спеціалізованого апаратного забезпечення.

З огляду на вищезазначене, нагальним завданням постає розробка такого алгоритму, який би:

- Оперував виключно даними, отриманими від супутникових навігаційних систем (GNSS);
 - Надавав можливість визначати межі забудованих територій;
 - Сформував карту видимості неба без попереднього моделювання об'єктів у 3D;
 - Був сумісний для впровадження у типовий приймальний апарат.
- Для території нашої держави це набуває особливої ваги у світлі:

- Процесів переведення міського середовища у цифрову форму;
- Подальшого розвитку систем розумного керування транспортом;
- Проведення геодезичних вимірювань у захаращених умовах забудови;
- Відновлювальних робіт з інфраструктури після завершення бойових дій.

Згідно з вивченням наукової літератури, питання зменшення точності визначення координат за допомогою GNSS у міських агломераціях постає доволі гостро.

Наявні підходи або надто обтяжливі з точки зору обчислень, або вимагають підключення додаткових геопросторових відомостей.

Цікавим шляхом видається застосування даних про видимість супутників як показника конфігурації міського ландшафту.

Використання методу визначення перешкод для неба, спираючись виключно на зареєстровані GNSS-виміри, може стати потужним засобом для гнучкого визначення місцезнаходження в умовах насиченої забудови в межах України.

2. Загальний огляд алгоритму оцінки видимості неба

У цьому розділі викладено детальний опис методології, обраної для обчислення мапи небосхилу за допомогою інформації, отриманої від системи GNSS.

Використаний алгоритмічний комплекс має на меті чисельно визначити рівень видимості неба та ідентифікувати потенційні об'єкти, що можуть заважати коректному прийому сигналів від супутників у забудованій зоні.

Схематичне зображення логіки оброблення отриманих відомостей та чіткий порядок ключових кроків, які виконує алгоритм, ілюструється графічно на рисунку 3.

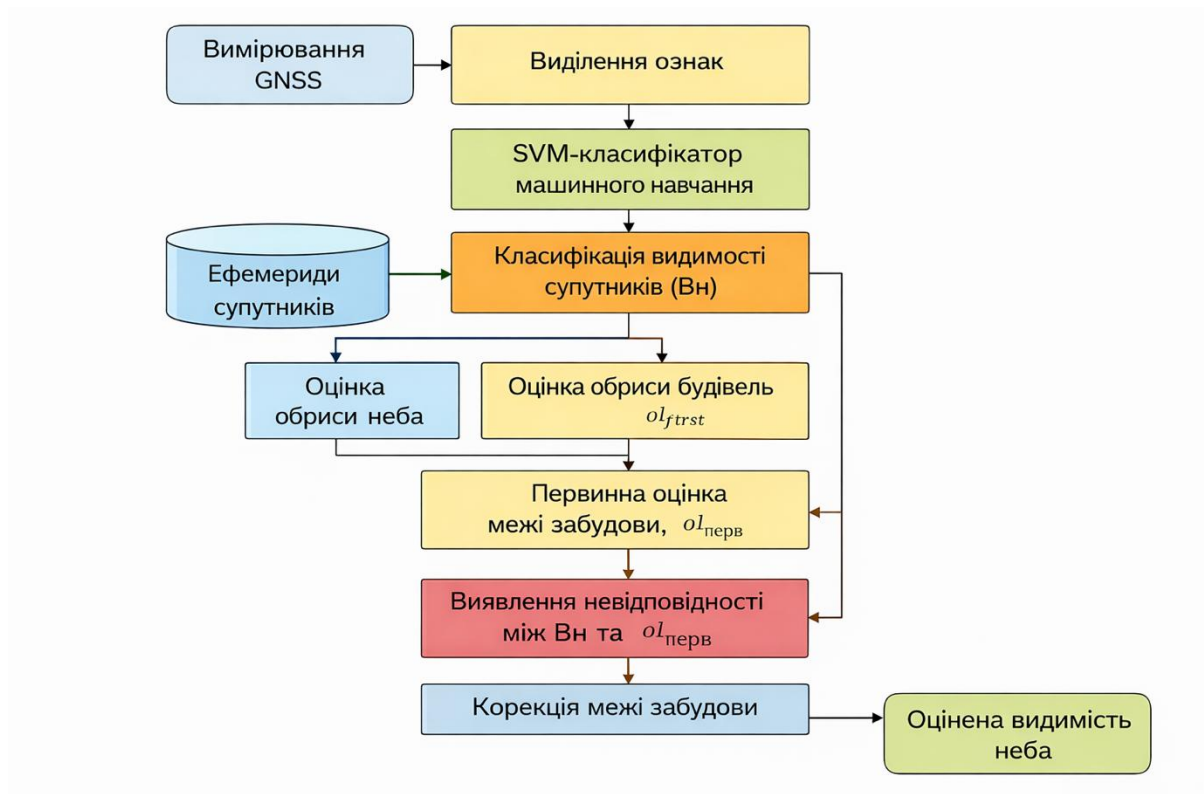


Рисунок 3 Алгоритм оцінки видимості неба

Для реалізації даного алгоритму потрібні у якості вхідних даних виміри, отримані із супутників GNSS, разом із необхідними ефемеридними даними ті саних навігаційних апаратів.

На початковому кроці відбувається формування комплексу показників, що несуть інформацію про якість прийому сигналів.

Для диференціації сигналів за ознакою прямої видимості (LOS) або багатопроменевого поширення (NLOS) на основі даних RINEX застосовуються такі величини:

- рівень потужності сигналу носія відносно шуму (C/N_0);
- висота супутника над горизонтом;
- коригування псевдовимірної дальності;
- темп зміни псевдовимірної дальності (складова, пов'язана з ефектом Доплера).

Описані параметри напряду беруться безпосередньо з «сирих» даних спостережень GNSS, тоді як стартову прив'язку користувача цілком реально обчислити за допомогою методики найменших квадратів із ваговими коефіцієнтами (WLS).

Рівень точності ідентифікації сигналів прямої видимості (LOS) та тих, що поширюються за відбитим шляхом (NLOS), можна покращити, коли в розпорядженні є інформація на рівні корелятора.

У подібних сценаріях цілком доречним стає використання технік глибокого навчання для виявлення як багатопроменевого ефекту, так і явища відбиття хвиль, що є критично важливим для якісного визначення місця розташування в умовах підвищеної складності чи часткової відсутності прямої видимості.

Класифікація дає змогу розподілити супутники за двома групами:

- LOS — ті, що мають пряму видимість;
- NLOS — ті, чий сигнал є екранованим або відбитим.

Окрім того, для супутників, сигнали від яких приймач не фіксує, визначаються їхні азимутальні та кутові координати на основі приблизного розташування користувача та ефемерид.

У переважній більшості ситуацій неможливість відстеження спричинена перешкодами від забудови, тому й такі супутники автоматично відносять до категорії NLOS.

Залучення до аналізу супутників, що не відстежуються, забезпечує глибше розуміння конфігурації перешкод у просторі навколо.

Визначення маски неба проводиться шляхом вивчення просторового розташування як супутників прямої видимості (LOS), так і супутників з непрямою видимістю (NLOS).

Супутник, якому привласнено категорію LOS, має кут місця, що перевищує найвищий кут, досяжний над лінією забудови у відповідному азимуті.

Коли є значна кількість таких LOS-супутників, розташованих у різних напрямках, це дає можливість відтворити незаблоковану ділянку небесної сфери та охарактеризувати контур неба.

На противагу до цього, супутники типу NLOS зазвичай характеризуються меншим кутом піднесення, що вказує на те, що їхній сигнал заблокований спорудами.

Сукупність даних про азимути та кути місця таких супутників застосовується для оцінки меж міської забудови та моделювання контуру перешкод.

Зведені дані про параметри супутників, задіяних у процесі формування маски неба, представлені у Таблиці 1.

Схема видимості неба, утворена на підставі даних класифікації супутників (пряма видимість (LOS), непряма видимість (NLOS)), з долученням тих, що не відстежуються, показана на малюнку 4.

Таблиця 1 Класифікація супутників за видимістю та використанням

Тип супутника	Видимість	Використання
Відстежуваний та класифікований	LOS (пряма видимість)	Оцінка відкритості неба
Відстежуваний та класифікований	NLOS (непряма видимість)	Оцінка екранування
Невідстежуваний	NLOS (непряма видимість)	Оцінка екранування

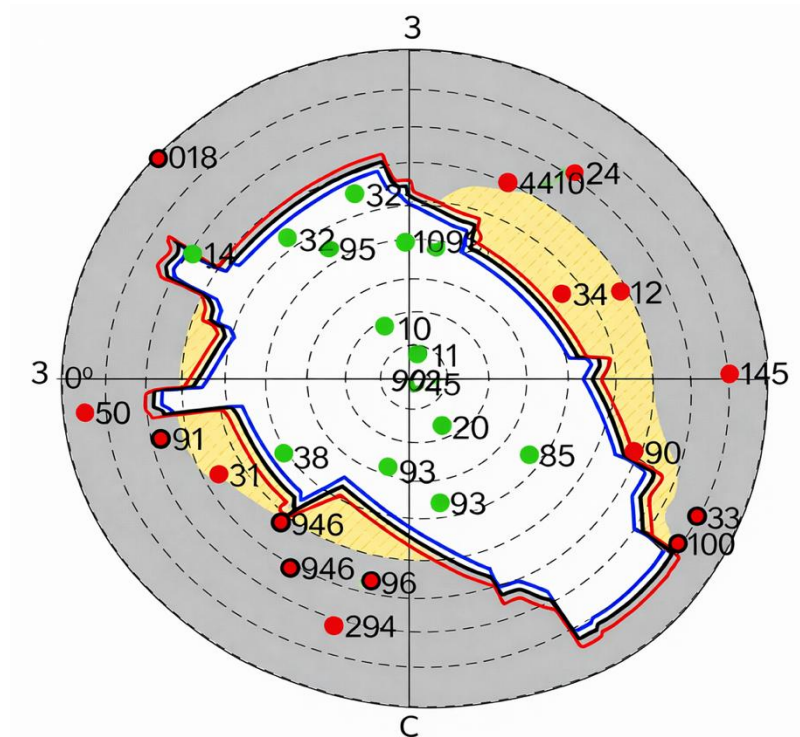


Рисунок 4. Діаграма полярної області з даними супутників

У межах оглянутого міського ареалу приймач не фіксує деякі з орбітальних супутників через блокування їхніх сигналів будівельними об'єктами.

Вивчення просторового розташування свідчить, що кути висоти контурів будівель знаходяться у межах між зонами безперешкодного огляду неба та приблизно визначеними лініями забудови.

Таким чином, коли межі забудови визначені з належною точністю, розбіжність між реальною та обчисленою апертурою неба є мінімальною.

Це дає можливість застосовувати отриману величину як корисний показник для розрізнення різного ступеня заповненості міського каньйону.

2.1 Алгоритм оцінювання видимості неба

Сформулювавши даний метод, ми виокремлюємо три види просторових обрисів:

- обрис незабудованого небосхилу;
- обрис будівельних об'єктів;
- рубіж забудови, що слугує сукупною характеристикою перешкод (мал. 4).

Кожен із цих обрисів відображає зв'язок між кутом піднесення та азимутальним спрямуванням.

По суті, такий обрис являє собою набір значень кутів місця, що впорядковані відповідно до їхніх азимутів.

У загальноприйнятому вигляді цю функціональну залежність можна виразити так:

$$\alpha(\varphi)$$

де

φ — азимутальний кут,

$\alpha(\varphi)$ — відповідний кут піднесення межі неба або будівлі в напрямку φ .

Отож, створення маски неба полягає у визначенні значення функції $\alpha(\varphi)$ для повного кола азимутів.

Нижче подано стислий виклад послідовності дій.

Спочатку, використовуючи показник кривизни, можна спрогнозувати обриси небесної сфери та контури будівель, спираючись на кутові координати місця і азимут для прямої видимості (LOS) та непрямої видимості (NLOS).

Після цього, межі споруд формуються шляхом відповідного зважування та об'єднання розрахованих обрисів неба та будівель.

Далі, зважаючи на те, що початкове обчислення меж будівель може не узгоджуватися з фактичними позиціями супутників (як у випадку LOS, так і NLOS), ми коригуємо ці межі відповідно до виявленої розбіжності.

2.2 Алгоритм оцінювання контуру неба

Щоб окреслити контур незакритого небосхилу, застосовують геометричні характеристики апаратів, які віднесено до категорії LOS.

Конкретно, береться до уваги їхнє кутове положення по азимуту та висоті, що дає змогу змодельовати просторовий зв'язок між межею видимості неба.

Як ілюструє рисунок 5, якщо пара або більше супутників LOS демонструють майже ідентичні азимутальні показники, то той апарат, що має нижчий кут підйому, насправді перебуває ближче до реальної лінії горизонту.

Навпаки, ті апарати, що мають більші значення кута місця, розташовані глибше в межах видимості неба і, як наслідок, менше користі приносять для встановлення положення горизонту.

Зважаючи на вищесказане, коли йдеться про первинне окреслення обрису неба, перевагу слід надавати супутникам прямої видимості (LOS) з відносно невеликими кутами місця.

Саме ці дані слугують для встановлення приблизного розташування лінії горизонту та початкового контуру забудови.

Реалізація алгоритму відбувається за такою схемою: азимутальна площа поділяється на сектори, кожен шириною у 10 градусів.

Усередині кожного такого сектора здійснюється пошук супутників LOS.

Якщо в межах сектора виявлено кілька супутників, надається перевага тому, який демонструє найменший кут місця.

Завдяки такій методиці вдається сформувати набір характерних точок, що максимально точно відображають фактичну межу небосхилу.

Вибрані супутники системи LOS слугують реперними точками задля формування плавної лінії, що має на меті відобразити межу відкритого небосхилу в межах повного охоплення азимутів від 0 до 360 градусів.

Проте, у глибоко забудованій міській місцевості (каньйонах) ситуація значно загострюється через суттєве блокування отримання сигналів.

За таких обставин можна зіткнутися з тим, що кількість супутників, які мають пряму видимість, буде вкрай обмеженою або ж вони взагалі не реєструватимуться у певних напрямках (азимутальних ділянках).

Це призводить до дефіциту інформації, необхідної для неперервного моделювання лінії горизонту по всьому периметру.

Ось ілюстративний випадок такої обставини, представлений на рисунку 5, де у діапазоні кутів від 0° до 120° не спостерігається супутників, які перебувають у прямій видимості (LOS).

Це спричиняє прогалину у формуванні карти неба та ускладнює точне встановлення конфігурації затінь у відповідній зоні видимості.

Отже, продуктивність застосованого методу прямо пропорційна числу і просторовому розташуванню цих супутників, що за умов значної міської забудови вимагає впровадження додаткових кроків для виправлення чи заповнення даних шляхом інтерполяції.

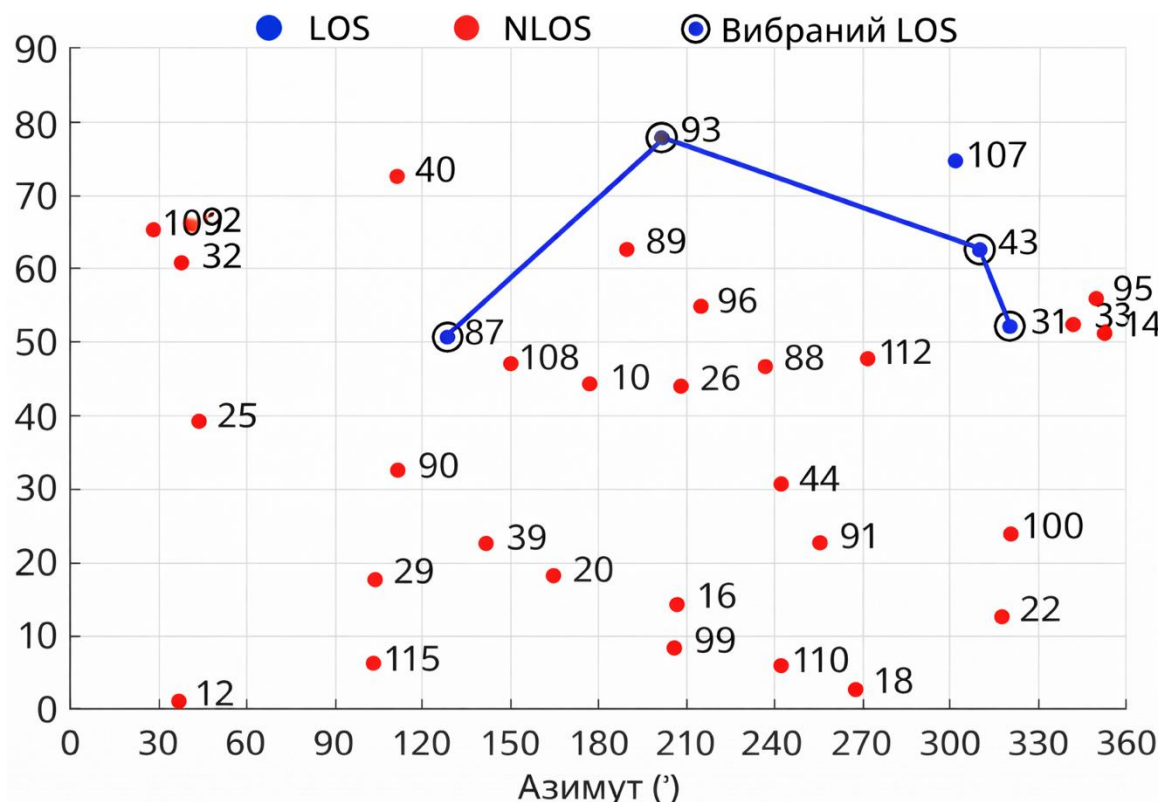


Рисунок 5. Розподіл супутників

Для гарантування достовірності визначення видимої лінії горизонту у впровадженій методиці запроваджено граничний критерій щодо числа відібраних супутників LOS.

Якщо кількість супутників, які відповідають усім вимогам селекції, не досягає визначеного мінімального значення, робиться висновок про брак інформації, необхідної для адекватної реконструкції контуру небосхилу.

У подібній ситуації процедура визначення горизонту не запускається, і для усіх азимутальних орієнтирів фіксується стандартне значення кута місця — 90 градусів, що моделює ідеально незахаращений небосхил.

У межах застосованої алгоритмічної схеми мінімально необхідне число відібраних супутників LOS зафіксовано на позначці "п'ять".

Це значення було встановлено на основі практичного досвіду як оптимальне співвідношення між необхідною стійкістю розрахунків та

можливістю отримання супутникових даних, особливо при роботі у складних умовах забудованої місцевості.

Водночас, навіть якщо супутників є вдосталь, трапляються випадки, коли їхнє розташування у просторі є неоптимальним з точки зору геометрії, що позначається на якості визначення країв небосхилу.

Існує два головні види подібних невідгідних угруповань.

По-перше, коли супутники розподілені нерівномірно за азимутами, це може спричинити суттєві проміжки у кутах між найближчими обраними супутниками.

Великі відстані по азимуту унеможлиблюють належне наближення лінії горизонту у відповідних ділянках, що негативно позначається на плавності та надійності отриманого результату.

Другим моментом є те, що коли обрані супутники розташовані під кутами місця, які відчутно відхилені від реальної лінії забудови, то виникає суттєва неточність у визначенні висоти (підйому).

За таких обставин, збудована лінія не відображатиме дійсного вигляду перешкод, що, відповідно, зменшує корисність маски неба.

Вплив згаданих невідгідних розташувань супутників проілюстровано на рисунку 6, де наведено зразки великих прогалин як по азимуту, так і по вертикалі під час визначення лінії горизонту.

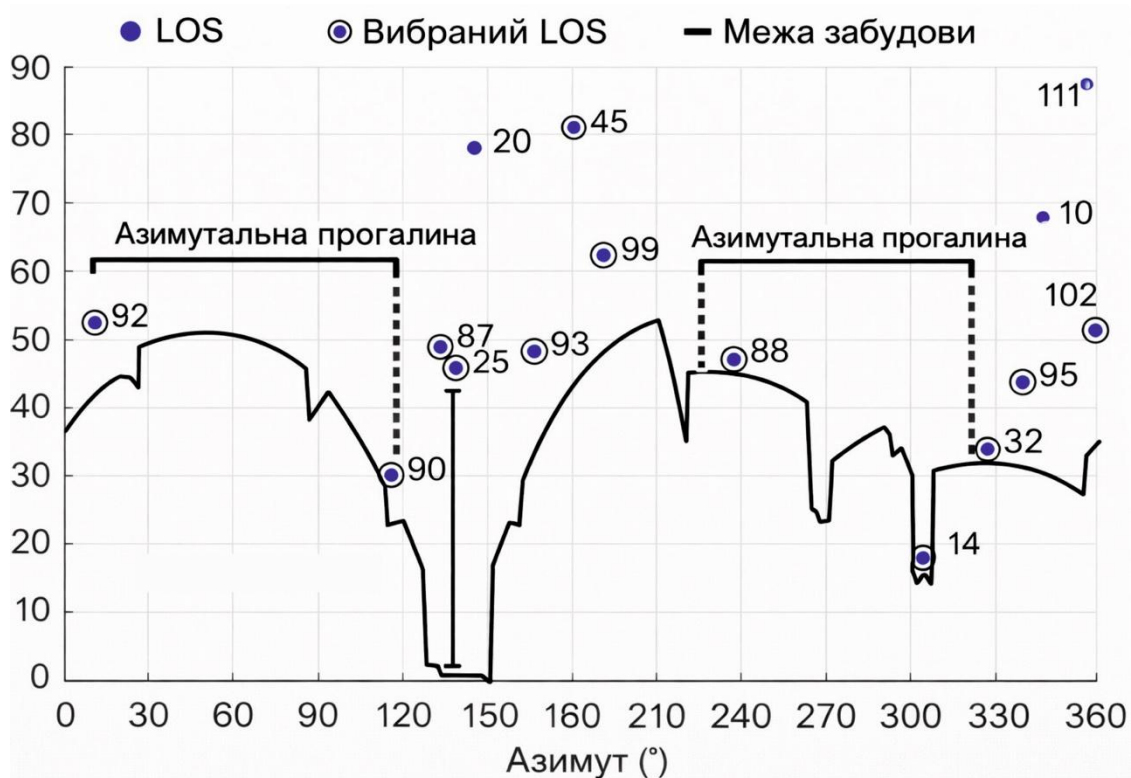


Рисунок 6 Супутникові лінії видимості в місті

Аби мінімізувати вплив нерівномірності розподілу супутників за азимутом, виникла пропозиція використовувати процедури корекції, що диференціюються залежно від масштабу кутового зазору.

Вибір конкретного методу обумовлюється класом азимутальної прогалини, який попередньо визначається згідно з встановленими критеріями. Детальний перелік класифікацій цих прогалин та адекватні способи їхньої обробки викладено у Таблиці 2.

Таблиця 2 Категорії азимутальних прогалин та відповідні підходи

Азимутальна прогалина (°)	Категорія	Підхід
0–60	Мала	Ігнорувати
60–120	Середня	Ввести віртуальні супутники та визначити їхні кути місця методом лінійної інтерполяції
120–360	Велика	Ввести віртуальні супутники та призначити їм кути місця за замовчуванням

Незначні відхилення в азимутах не братимуться до уваги, оскільки вони майже не зачіпають сукупного вигляду відображення зоряного неба.

Проте, коли прогалина вже має відчутні розміри, застосовується прийом використання пари штучних орієнтирів.

Азимутальні координати цих уявних об'єктів визначаються у межах охопленої зони, а їхні висотні кути розраховуються шляхом лінійної інтерполяції значень між двома реальними супутниками, що знаходяться поруч і окреслюють краї цієї проміжки.

Цей підхід дає змогу зменшити локальні розриви у промальовуванні лінії горизонту та забезпечити плавніший хід відновленої лінії.

Відмінний спосіб застосовується у тих випадках, коли виникають чималі розбіжності щодо азимуту.

У цьому випадку передбачається залучення гіпотетичних супутників, чия висота над горизонтом є фіксованою і відповідає типово прийнятому значенню, що застосовується для окреслення лінії горизонту.

За правилами цієї методики, зазначене значення закріплено на рівні 85° .

Введення цих штучно створених точок у просторі цієї прогалини запобігає помилковому формуванню окресленості контуру, коли повністю відсутні супутники, що мають пряму видимість (супутники ПВЛ).

Після того, як зібрано сукупність як реальних, так і синтезованих референсних точок, окреслення контуру небесної сфери встановлюється через апроксимацію цих даних за допомогою гладкого сплайн-поліному.

Формування сплайн-моделі розглядається як проблема пошуку оптимального рішення, де головна умова полягає у мінімізації функціоналу, що враховує відхилення моделі від заданих опорних даних і водночас забезпечує неперервну гладкість виведеної лінії.

Вказаний функціонал може бути виражений у наступній формі:

$$J(s) = \sum_{i=1}^N [s(\varphi_i) - \alpha_i]^2 + \lambda \int_0^{2\pi} (s''(\varphi))^2 d\varphi,$$

де

α_i — кути розташування обраних (дійсно існуючих чи уявних) орбітальних апаратів;

$s(\varphi)$ - визначений контур неба;

λ — параметр вирівнювання, котрий визначає, як узгоджуються між собою точність наближення та плавність лінії;

$s''(\varphi)$ — друга похідна функції, яка характеризує кривизну.

Спрощення цієї ж функції дає змогу досягти плавного й реалістичного контуру неба, навіть коли навколо існують складні міські об'єкти.

Під час наближення контуру неба дані спостережень піддаються зважуванню відповідно до того, скільки корисної інформації несе кожен супутник.

Супутники, що мають менші кути підйому, знаходяться ближче до справжньої лінії забудови, тому їхній вплив на визначення лінії горизонту слід посилювати, на відміну від тих супутників, у яких кути піднесення є значними.

Формула для розрахунку вагових коефіцієнтів W_i для i -го супутника виглядає наступним чином:

$$w_i = \frac{1}{\sin(\alpha_i)},$$

або у нормалізованому вигляді:

$$w_i = \frac{\cos(\alpha_i)}{\sum_{k=1}^N \cos(\alpha_k)},$$

де

α_i — кутове положення орбіти супутника;
 N — число обраних (як справжніх, так і віртуальних) апаратів.

Отже, апарати на орбіті з меншими кутами підйому мають більшу значущість у процесі вдосконалення, що сприяє більш якісному відновленню обрису обрію в середовищі міської забудови.

Запроваджений механізм присвоєння ваги обумовлює надання супутникам з меншими кутами висоти більших множників впливу.

Причина цьому — сигнали, отримані під низькими кутами над рівнем горизонту, долають шлях ближче до зони забудови, а отже, є більш змістовними для встановлення реальної лінії горизонту.

Пропонований метод оптимізації дає змогу вибудувати плавний та фізично коректний профіль неба, навіть якщо конфігурація супутників є несприятливою, наприклад, при значних розривах в азимутах чи малій кількості видимої лінії видимості (LOS) супутників.

На рисунку 7 демонструються результати визначення лінії горизонту, отримані завдяки впровадженню цього алгоритму.

Схема, що ілюструє загальний порядок кроків алгоритму та взаємозв'язок ключових складових, відображена на рисунку 8.

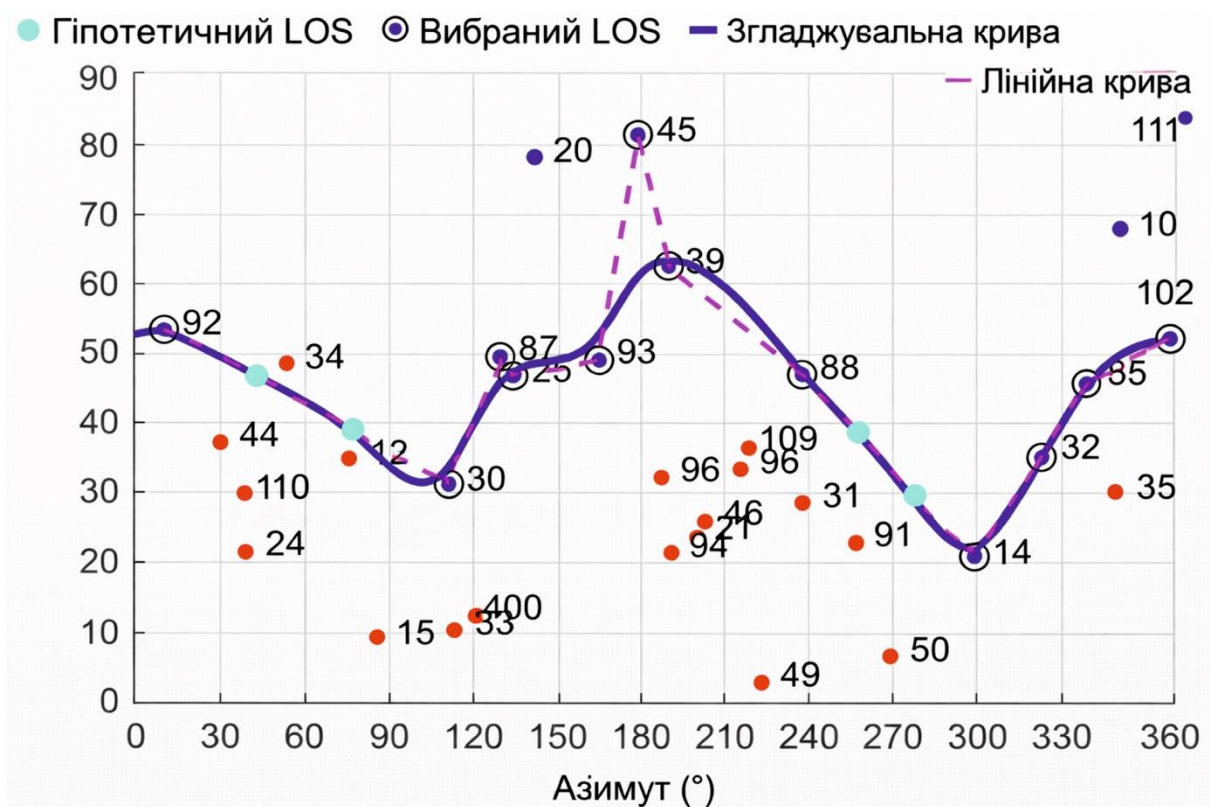


Рисунок 7. Графік даних супутникових позицій

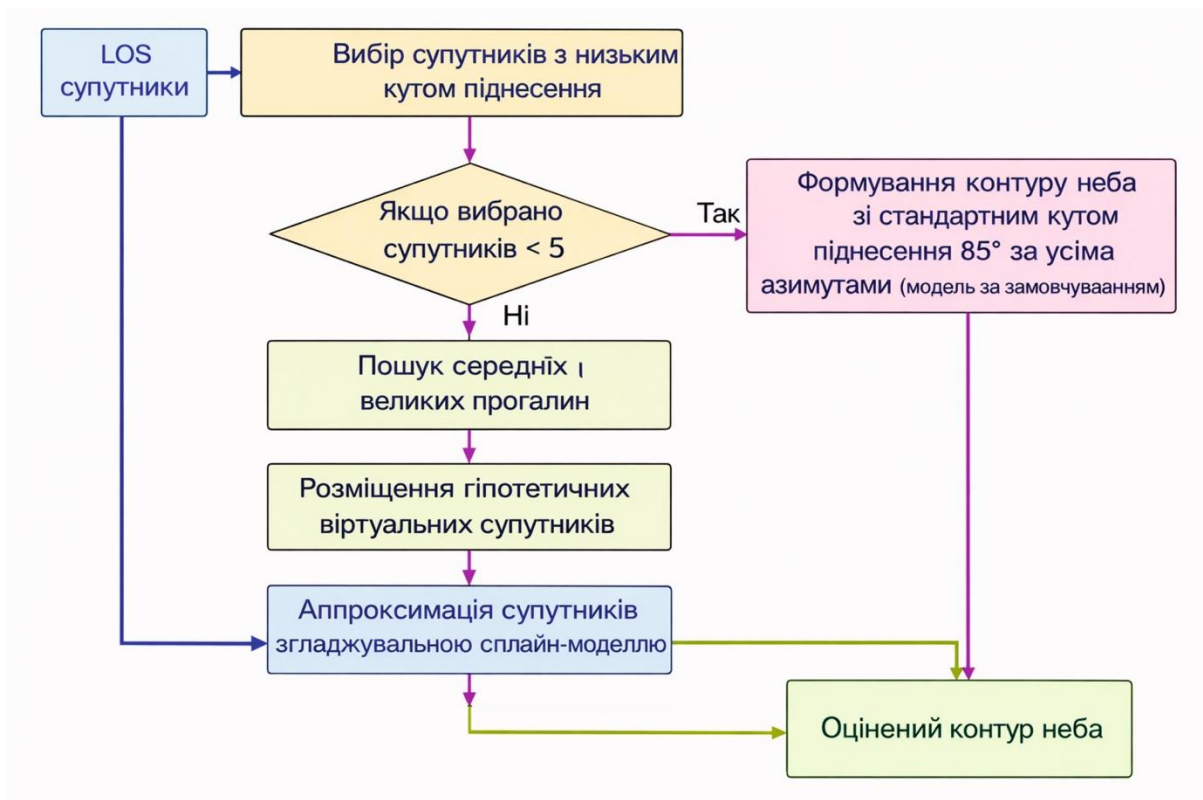


Рисунок 8 Блок-схема оцінки контуру неба

2.3 Алгоритм оцінки контурів будівлі

Порядок виявлення обрису забудови схожий на той, що використовується для оцінки лінії горизонту, але він спирається на вивчення супутників, які ідентифіковано як такі, що знаходяться у зоні непрямой видимості (NLOS).

Коли вже відфільтровано супутники з перешкодами у прийомі сигналу, метод наштовхується на ті ж самі виклики, що й при аналізі прямої видимості (LOS).

А саме, мала чисельність доступних NLOS-супутників може спричинити помітні прогалини у визначенні азимуту та висоти, що ускладнює точне відновлення меж збудованих об'єктів.

Аби знівелювати дію подібних пропусків, ми вживаємо метод, що схожий до раніше згаданого алгоритму: у відповідних зонах розміщуються уявні супутникові апарати, які заповнюють неповні азимутальні проміжки.

Завдяки цьому досягається більш однорідний розподіл контрольних точок у просторі.

Коефіцієнт зважування для супутника S_i , що є недоступним, розраховується із огляду його кута місця й цінності отриманих даних, і може бути виражений так:

$$w_i = \sin(\alpha_i),$$

де

α_i — кут місця i -го NLOS-супутника.

У протилежність ситуації з оцінюванням обрисів небосхилу, де супутники з малими висотними кутами матимуть більший вплив, для визначення лінії забудови доречно надавати перевагу супутникам із

вищими кутами місця, оскільки саме вони точніше описують верхню межу того, що затуляє сигнал.

Методологія визначення вагових коефіцієнтів для супутників, які не перебувають у прямій видимості (NLOS), розроблена таким чином, що чим вищий кут піднесення має супутник, тим вагомішим стає його внесок у процес оцінювання меж забудови.

Логіка тут у тому, що сигнали, отримані під значнішими кутами місця, надають більш достовірну інформацію про найвищу точку екранування, створюваного спорудами.

Якщо спостерігається значний проміжок по азимуту для супутників, що розглядаються гіпотетично, застосовується незмінна висота кута, зафіксована в алгоритмі на позначці 5° .

Цей підхід дає змогу заповнити незадіяні ділянки найменшим можливим значенням, яке відповідає межі видимості сигналу, розташованого близько до лінії забудови.

Рисунок 9 демонструє приклад використання даного методу.

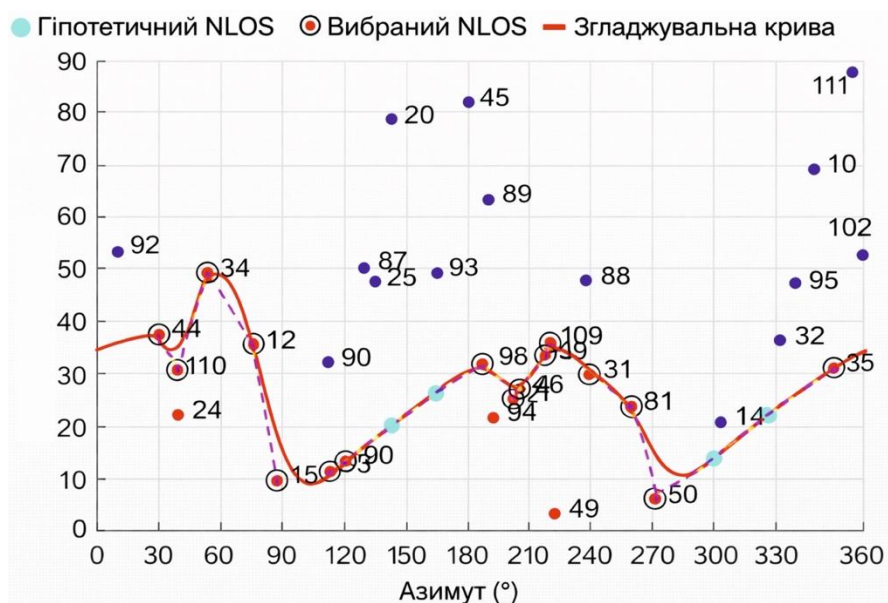


Рисунок 9. Графік піднесення супутників NLOS

2.4 Алгоритм оцінки меж будівлі

За умови окремого виділення меж небесного простору та меж забудови, визначення границі споруди здійснюється через їхнє об'єднання із використанням коефіцієнтів вагомості.

Ця методика дає змогу зважити на ступінь надійності даних із кожного джерела спогаду та зменшити вплив помилок, що виникають на певних ділянках.

Середнє очікуване значення кута підйому, що відповідає межі споруди у будь-якому азимутальному курсі, розраховується як сума оцінок контуру небосхилу та контуру забудови, помножених на відповідні вагові частки:

$$\hat{\alpha}_b(\theta) = \frac{w_s(\theta) \alpha_s(\theta) + w_b(\theta) \alpha_b(\theta)}{w_s(\theta) + w_b(\theta)},$$

де:

$\alpha'_b(\theta)$ — розрахунковий кут підйому до лінії даху будівлі від азимуту θ ;

$\alpha_s(\theta)$ — висота кута огляду неба;

$\alpha_b(\theta)$ — кут нахилу лінії забудови;

$w_s(\theta)$ — відповідні вагові коефіцієнти.

Така методика гарантує збіжність двох окремих розрахунків, уможливлючи вибудову стійкої моделі меж забудови навіть тоді, коли супутниковий сигнал частково втрачається, або ж дані спостережень розташовані нерівномірно.

Застосоване зважування реалізоване таким чином, що вагові коефіцієнти гнучко коригуються відповідно до того, наскільки відкритим є небо.

Це дає змогу програмному комплексу адекватно функціонувати як на широких міських територіях, так і в умовах значної забудови.

Зокрема, коли йдеться про ділянки, де небо відкрите значною мірою (тобто коефіцієнт видимості неба є високим), відомості про обрис небосхилу вважаються доволі правдивими.

У подібних умовах варто посилити значущість оцінки лінії забудови, щоб посилити вплив інформації про екранування та досягти детальнішого опису будівель.

Натомість, у густих міських ущелинах, де видимому небу відводиться невелика частка простору, інформація про його конфігурацію стає менш значущою, тоді як відомості про перешкоди, створювані спорудами, набувають більшої ваги.

За таких обставин, для забезпечення стабільності обчислень та уникнення завищення оцінки висоти забудови, пріоритет віддається аналізу окресленості небесного контуру.

Отже, застосовується методика зважування, що налаштовується відповідно до умов локації, де вагові коефіцієнти формуються залежно від коефіцієнту видимості небесного простору V :

$$w_s = V,$$

$$w_b = 1 - V,$$

де

$V \in [0,1]$ — стандартизований показник небосхилу, який відображає обсяг відкритого простору над головою.

Сумарне очікуване зведення ліміту забудови задається як:

$$\hat{\alpha}(\theta) = V \cdot \alpha_s(\theta) + (1 - V) \cdot \alpha_b(\theta).$$

Такий метод дає змогу досягти безшовного переходу між зонами відкритого простору та умовами глибокої забудови, усуваючи потребу в різкому поділі оточення.

На рисунку 10 продемонстровано оцінену межу забудови (маску оглядового неба), здобуту завдяки використанню адаптивної системи вагового коефіцієнта, для трьох різних рівнів видимості неба: незначного (зліва), помірного (по центру) та значного (справа).



Рис. 10. Приклад першої оцінки меж будівлі за різних умов видимості неба.

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що застосований метод дає змогу правильно коригувати обрис межі залежно від ступеня відкритості неба.

У місцях, де небо відкрите значною мірою, лінія стає більш плавною та тісніше відповідає фактичному розташуванню лінії горизонту.

За помірних умов спостерігається збалансований вплив як контурів небосхилу, так і оточуючої забудови, а в умовах густої міської забудови (каньйонах) межа формується з акцентом на інтенсивне блокування сигналів.

Отже, обрана методика підтверджує свою надійність стосовно варіацій у конфігурації супутникових груп та густоти забудови.

Первинний розрахунок формує приблизну картину того, як виглядає небосхил.

Однак, на цій стадії окремі супутники можуть не потрапляти до розрахованих меж видимості.

Як ілюструє рисунок 10, прорахована межа демонструє загальний стан відкритості простору над головою й зазвичай співпадає з реальною лінією забудови.

При цьому у певних напрямках (азимутах), особливо там, де забудова є дуже щільною, можна помітити розбіжність між обчисленою межею та тим, як супутники насправді класифікуються (пряма чи непряма видимість).

Супутники, у яких розрахована гранична величина не збігається з їх реальною класифікацією, відзначені на ілюстрації та зібрані в окрему групу, позначену як *SVinconsistent*.

Виникнення подібних розбіжностей спричинене специфікою техніки сплайн-апроксимації та недоліками використаної функції зважування.

Через це початкове визначення контуру може демонструвати місцями розбіжності із фактичним розташуванням забудови.

З огляду на це, для досягнення кращої відповідності моделі реальній видимості супутників, проводиться ще один етап виправлень, мета якого — ліквідувати знайдені розбіжності й довести до ладу обчислений контур.

2.5 Алгоритм виправлення межі

Аби усунути розходження між розрахованим рівнем забудови та фактичною класифікацією супутників (пряма/непряма видимість), ми проводимо локальне виправлення первинно визначеного кута піднесення цього рівня.

Це коригування налаштовується так, щоб розрахований рівень відповідав фактичній видимості кожного супутника.

Нове значення кута піднесення рівня встановлюється за таким правилом:

$$\hat{\alpha}_b^{new}(\theta_i) = \begin{cases} \min(\hat{\alpha}_b(\theta_i), \alpha_i), & \text{для LOS,} \\ \max(\hat{\alpha}_b(\theta_i), \alpha_i), & \text{для NLOS.} \end{cases}$$

де

$\hat{\alpha}_b(\theta_i)$ — приблизний кут підйому межі забудови, визначений для певної азимутальної орієнтації θ_i ;

α_i — кут місця i -го супутника.

Отже, межа усталюється таким чином, щоб супутник з прямою видимістю (LOS) знаходився завжди над цією межею, тоді як супутник без прямої видимості (NLOS) опиниться під нею.

Це дає змогу гарантувати, що модель маски неба за своєю геометрією відповідає фактичному розрізненню супутникових сигналів, усуваючи потребу в повторному залученні всього процесу оптимізації.

Після того, як межа забудови була відкоригована локально, цю новоутворену криву знову піддають оптимізації відповідно до рівняння, аби привести її у відповідність до моделі згладжуючого сплайну.

Цей процес дає змогу підтримувати рівність функції, прибираючи потенційні нерівності, які могли з'явитися через правлення окремих кутів за азимутом.

В силу того, що корекція стосувалася супутників, які потрапили до списку $SV_{inconsistent}$, треба відповідно змінити коефіцієнти важливості, беручи до уваги кут їхнього азимуту θ_j , $j \in SV_{inconsistent}$.

Для посилення ефекту виправлених точок при наступному апроксимуванні їм надається підвищений коефіцієнт ваги.

Базуючись на проведенні експериментів, було визначено, що вага для кутів піднесення, які були змінені, має бути втричі суттєвішою, ніж вага для точок, що залишилися без змін, а саме:

$$w_j^{new} = \begin{cases} 3w_j, & j \in SV_{inconsistent}, \\ w_j, & \text{для інших супутників.} \end{cases}$$

Така методика дає змогу алгоритму сфокусуватися на відкоригованих зонах, гарантуючи точніше приведення моделі у відповідність до реальної видимості супутникових об'єктів.

Межа забудови, яка постала в результаті повторного оптимізування (і яку надалі ми будемо називати маскою неба), відображена на рисунку 11.

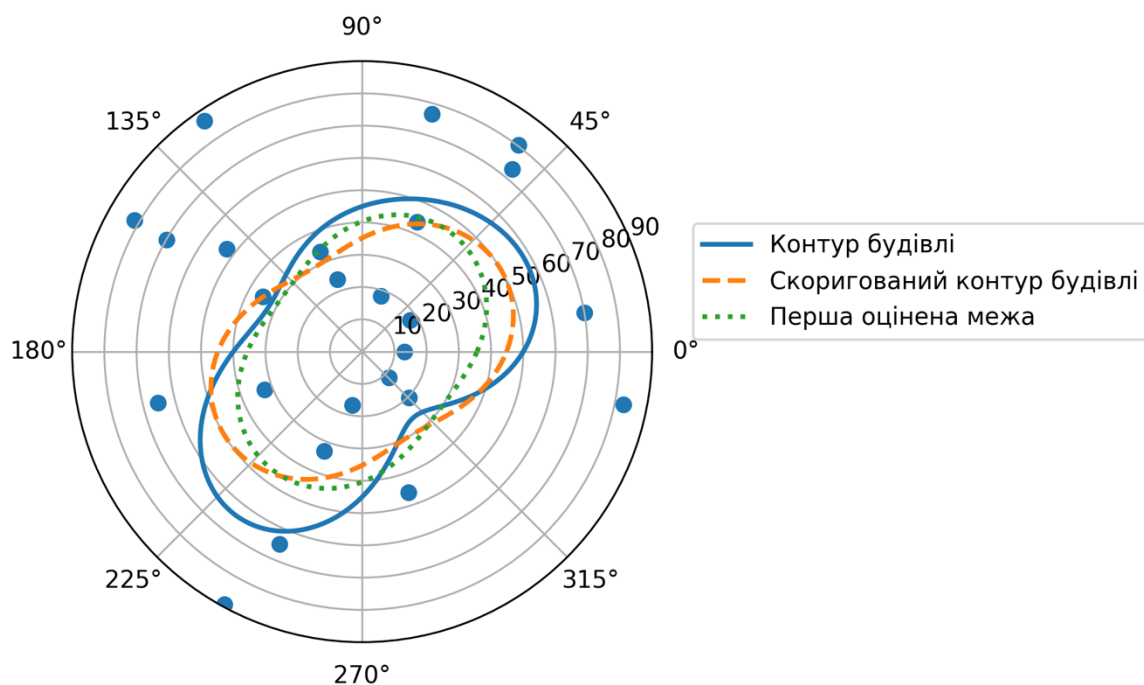


Рисунок 11. Порівняння контурі та скореговані межі забудови

Здійснена процедура коригування покращує ступінь точності визначення видимості небесного простору.

Внаслідок цього, відкоригована межа забудови значно краще відповідає дійсному обрису споруд, аніж це було за попередньої оцінки.

Після того, як буде взято до уваги коливання у видимості супутників та буде усунуто виявлені розбіжності, коефіцієнт видимості неба може бути розрахований, спираючись на оновлену лінію забудови.

Небесна видимість V визначається як співвідношення площі неперекритого небосхилу до усієї площі напівсфери:

$$V = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\pi/2 - \hat{\alpha}_b^{new}(\theta)}{\pi/2} d\theta,$$

де

$\hat{\alpha}_b^{new}(\theta)$ — поправлений кут піднесення для меж забудови по азимуту θ .

Розрахункова величина огляду небесної сфери демонструє відсоток незабудованої частини небосхилу з позиції спостерігача.

Цей параметр здатний служити маркером характеристик оточення та допомагати у визначенні оптимального підходу до визначення координат, так як уже було згадано на початку.

А саме, там, де спостерігається значна відкритість неба, розумно впроваджувати загальноприйняті підходи GNSS-визначення місця, тоді як у кварталах з густою забудовою краще можуть себе проявити розробки, що беруть до уваги тривимірні макети будівель чи специфічні методи зведення ефектів відбиття сигналу.

Узагальнюючи викладене, пропонована методика втілюється у двох головних кроках.

Перший із них полягає у тому, що вихідні дані вимірювань GNSS слугують для розмежування супутникових сигналів на прямі (LOS) чи багатопроменеві (NLOS).

Далі, на другому етапі, ці класифікаційні дані використовуються для формування та корекції лінії забудови, з якої вже виводиться показник відкритості неба у тій зоні, де працює приймальний пристрій.

Отже, цей метод дає змогу визначати параметри оточення, спираючись винятково на інформацію з ГНСС, не залучаючи жодних додаткових тривимірних моделей будівель чи кадрів із ширококутних (fisheye) камер.

Це гарантує повну самостійність алгоритму та його високу адаптивність до вбудовування у сучасні приймачі ГНСС.

3 Проведення дослідження та результати

Щоб перевірити, чи справді використаний метод оцінки маски неба працює і наскільки він точний, ми провели низку стаціонарних випробувань у десяти різних місцях у місті Івано-Франківську.

Вибирали ми ці місця так, щоб охопити різноманітні міські пейзажі: тут були і відкриті простори, і вулиці з помірною забудовою, а також зони, де ефект "міського каньйону" відчувається особливо сильно.

Схематичне зображення, де розташовані ці випробувальні точки, можна побачити на рисунку 12.

Завдяки такому багатогранному підбору місць ми мали змогу з'ясувати, наскільки надійно алгоритм поводить себе у незмінних, але реальних умовах міста, враховуючи як різну видимість неба, так і особливості розташування супутників.

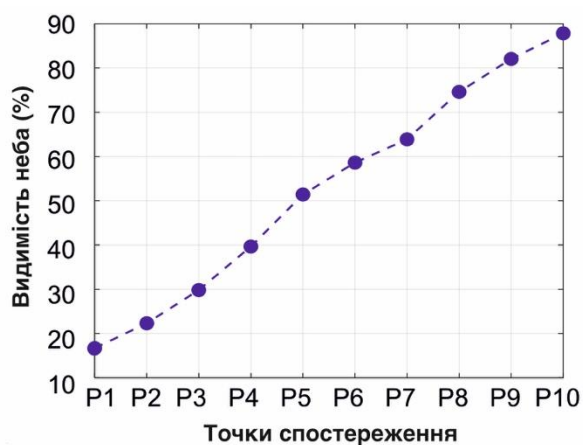


Рисунок 12. Місця проведення статичних експериментів

На кожній контрольованій позиції апаратура GNSS збирала дані від супутників протягом близько чверті години.

При цьому були задіяні вібрації від навігаційних мереж GPS, ГЛОНАСС, а також Galileo, завдяки чому вимірювання мали мультисистемне підґрунтя.

Наявні відомості дозволили рознести обстежені місця за класами видимості небесної сфери — від оточення щільною міською забудови до ділянок з повним оглядом, що візуально представлено на нижньому графічному полі.

На етапі первинного тестування (апробації) обраний алгоритм було випробувано за ситуацій, коли супутникові сигнали розрізнялися бездоганно: як ті, що йшли прямою видимістю (Line of Sight, LOS), так і ті, що надходили з урахуванням перешкод (Non-Line of Sight, NLOS).

Це розмежування відбувалося завдяки використанню точних географічних даних приймача та залученню тривимірної карти забудови міста.

Далі ми досліджували живучість алгоритму, змінюючи коректність його класифікації LOS/NLOS. Метою було з'ясувати, яким чином хиби у класифікації позначаються на фінальному показнику визначення видимості небосхилу.

На заключній стадії було охарактеризовано ефективність роботи алгоритму, використовуючи вже готовий класифікатор, розроблений на засадах машинного навчання, який обробляє необроблені виміри системи GNSS.

3.1 Продуктивність з ідеальною класифікацією LOS/NLOS

В рамках даного вивчення, приналежність супутникових сигналів до категорії LOS чи NLOS визначалася, спираючись на заздалегідь відоме географічне розташування приймальної апаратури та застосування цифрових тривимірних макетів міської забудови.

Ці тривимірні репрезентації споруд були здобуті з ресурсу Google Earth та вирізняються точністю у плані та по висоті у межах близько одного метра, чого цілком достатньо для генерації еталонного зображення видимості неба у міській забудові.

У Таблиці 3 зіставлено середні показники та стандартні відхилення коефіцієнта видимості небесного простору, розрахованого на підставі проєктної лінії забудови, з фактичними даними щодо відкритості горизонту.

Проведення такого зіставлення дає змогу чисельно виміряти, наскільки коректно працює запропонований метод та як він відображає реальну конфігурацію відкритого середовища.

Таблиця 3 Порівняння реальної та оціненої видимості неба

Локації	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Реальна видимість неба (%)	16.69	23.20	29.82	39.66	51.42	58.63	63.88	74.61	82.04	87.85
Середнє значення оціненої видимості (%)	25.74	27.31	25.97	44.60	46.12	61.69	60.47	68.78	82.78	86.16
Стандартне відхилення оціненої видимості (%)	0.96	2.74	1.90	0.58	0.58	1.13	2.43	1.24	1.32	2.18

Згідно з даними, представленими у Таблиці 3, у переважній кількості проаналізованих місць розбіжність між прогнозованою та реально спостережуваною видимістю неба становить приблизно до 5%.

Ба більше, отримані розрахункові показники демонструють значну узгодженість, адже стандартне відхилення у всіх досліджених сценаріях не перевищує 3%.

Тим часом, у кварталах із сильним ефектом міського каньйону, як-от у точці P1, якість визначення показника значно погіршується.

Головна підстава цього криється у малій кількості супутників, які видно (LOS) через густу забудову, що унеможлиблює правильне встановлення первинної лінії горизонту.

На рисунку 13 представлено маску неба для місця P1: спершу з початковою розрахунковою лінією, а потім — після виправлення цієї межі.

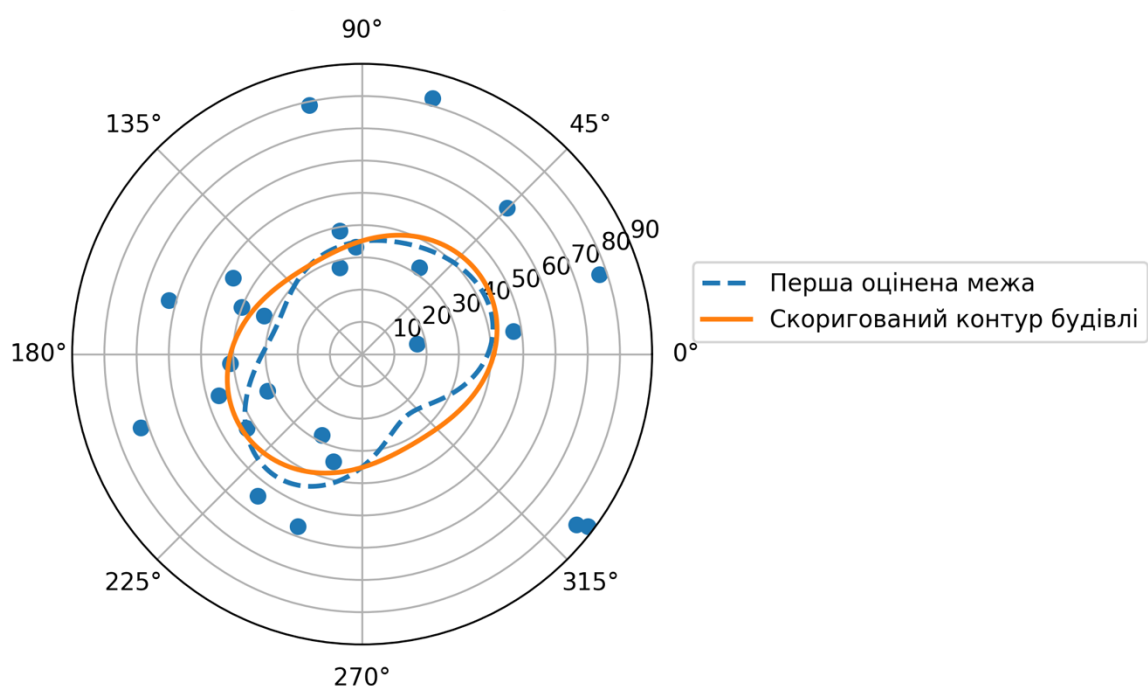


Рисунок 13. Демонстрація розрахункової межі забудови в міській забудові

Ділянка, окреслена коричневим еліпсом, являє собою область, де встановлену межу коректно уточнити не вдається.

Причина полягає у несприятливому розташуванні супутників та нестачі достатньої кількості значущих вимірювань.

У цьому секторі наявні супутникові дані не формують просторової схеми, потрібної для достовірного окреслення видимої сфери.

Натомість, інші частини первинно визначеної межі, зображені на схемі, демонструють конфігурацію, що узгоджується як із результатами,

отриманими в ході вирівнювання, так і з виконаною процедурою виправлення.

Для точки, позначеної як P1, фіксується надходження даних лише від одного супутника в напрямку лінії видимості (LOS), що серйозно перешкоджає формуванню надійного профілю небосхилу.

Зокрема, у цьому визначеному сегменті немає змоги коригувати оцінку межі, спираючись на дані спостережень LOS, тому що сузір'я супутників має обмежену розмаїтість за геометрією.

Схожі проблеми виникають і у випадку середньої забудови (відмітка P4), де точність визначення також стримується через особливості розташування супутників.

Ілюстрації, що демонструють підсумки для двох різних часових періодів спостережень, можна знайти на Малюнку 14.

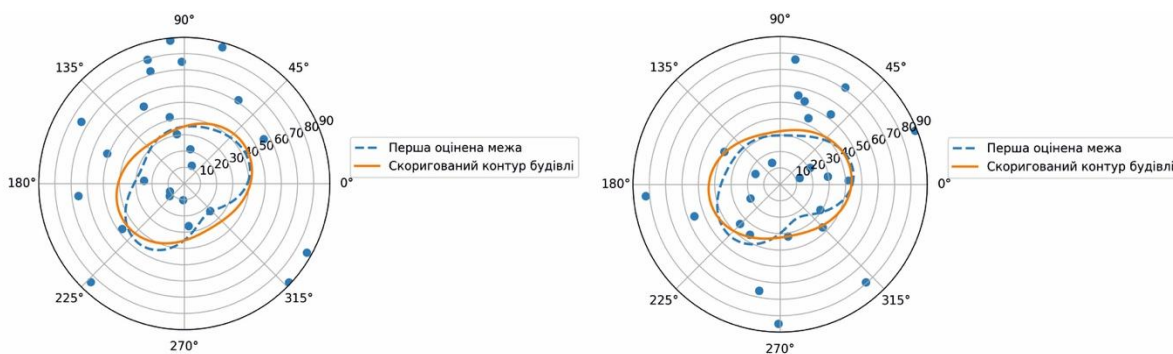


Рисунок 14 Маска неба P4 з оцінкою меж та виправленням

Зони, окреслені коричневим овалом, є такими, де уточнити скориговану межу більш детально неможливо.

Це спричинено тим, що розташування супутників у сузір'ї є несприятливим і не дає змоги отримати достатньо даних для точніших вимірювань.

Протягом нетривалого проміжку часу супутники залишаються на своїх позиціях у просторі, через що проєкційні зони їхніх сигналів не накладаються одна на одну.

З огляду на вищесказане, кути піднесення, які слугують орієнтирами й потрібні для адекватної експертизи, лишаються поза межами досяжності.

Здобуті дані вказують на те, що конфігурація супутників являє собою один із головних бар'єрів при визначенні маски неба у середовищі з густою міською забудовою, і це питання вимагає глибшого вивчення з метою покращення якості роботи алгоритму.

3.2 Продуктивність з різною точністю класифікації LOS/NLOS

Ключовою деталлю для успішності впровадженого алгоритму є коректність розрізнення супутникових сигналів як прямих (LOS) чи непрямих (NLOS), адже формування як контурів неба, так і міської забудови напряду залежить від правильності цієї класифікації.

Щоб встановити, наскільки помилки у класифікації позначаються на вирахуванні коефіцієнта видимості небосхилу, було проведено симуляцію роботи системи, застосовуючи різні рівні достовірності розпізнавання.

Аналіз охоплював ступінь точності від п'ятидесяти відсотків і вище, оскільки якщо точність падає нижче 50%, процес класифікації фактично є менш надійним, аніж випадковий вибір (подібно до кидання монети).

Симуляцію було проведено наступним чином: спершу встановлювалася видимість супутників, виходячи з відомої позиції на землі та тривимірної моделі споруд, що формувало еталонну класифікацію.

Потім, шляхом випадкового вибору, для окремих супутників змінювався тип видимості на протилежний (пряма видимість ставала відсутньою, або навпаки: LOS $\rightarrow$ NLOS чи NLOS $\rightarrow$ LOS).

Із зростанням числа таких змінених супутників, ступінь точності класифікації відповідним чином знижувався.

Цей процес симуляції повторювався декілька разів разів для кожного досягнутого рівня точності, після чого розраховувався середній показник оціненої видимості неба.

Графічне зображення результатів, що демонструють зв'язок між якістю оцінки та точністю класифікації, представлено на Малюнку 15.

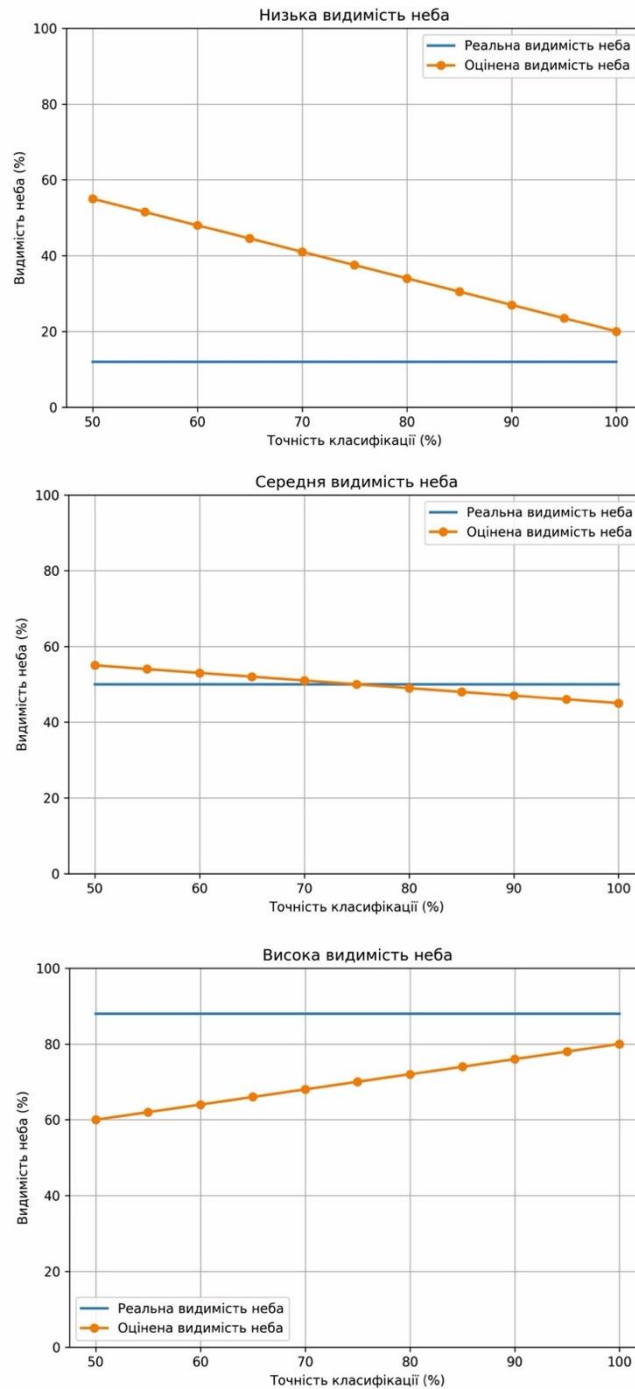


Рисунок 15. Середні значення оціненої видимості неба з різною точністю

Із рисунку 15 цілком очевидно, що продуктивність застосованого методу у випадках, коли фактична прозорість неба незначна або, навпаки, дуже висока, надзвичайно чутлива до того, наскільки коректно розрізняються лінії прямої видимості (LOS) та об'єкти, що не перебувають у прямій видимості (NLOS).

Коли небосхил закритий (типова ситуація для глибоких міських утворень), доступних супутників, видимих напряму, обмаль.

Так само, у місцевостях, де огляд практично необмежений (відкрите чи малоповерхове середовище), фіксується невелика кількість супутників у категорії NLOS.

Якщо у цих умовах трапляються хибні визначення типу супутників, формується вагоме спотворення у розрахункових обрисах, адже саме ці "рідкісні" для кожного типу супутники мають вирішальне значення при визначенні кордонів.

Звідси випливає, що розрахована межа може суттєво розходитися з істинним положенням.

При цьому, коли спостерігається помірна видимість небесної сфери (як показано на середньому графіку Рис. 15), точність оцінки демонструє помірну стійкість до хибної класифікації.

Причина цього полягає у тому, що при рівномірному розподілі супутників, що знаходяться як у прямій видимості (LOS), так і поза прямою видимістю (NLOS), помилки, допущені під час класифікації, певною мірою взаємокомпенсуються.

Внаслідок застосування адаптивного механізму зважування, середній кут підйому для обчисленої границі має тенденцію до значень, близьких до 45 градусів, що корелює з приблизною половиною видимості неба (близько 50%).

Отже, навіть при зниженні якості класифікації підсумковий результат тримається досить стабільно.

На Рис. 16 ілюструється маска неба для ситуації з типовою помірною видимістю (характерною для забудованої місцевості), де показано початкові розрахунки та подальше уточнення меж при градаціях точності класифікації у 50% та 100%.

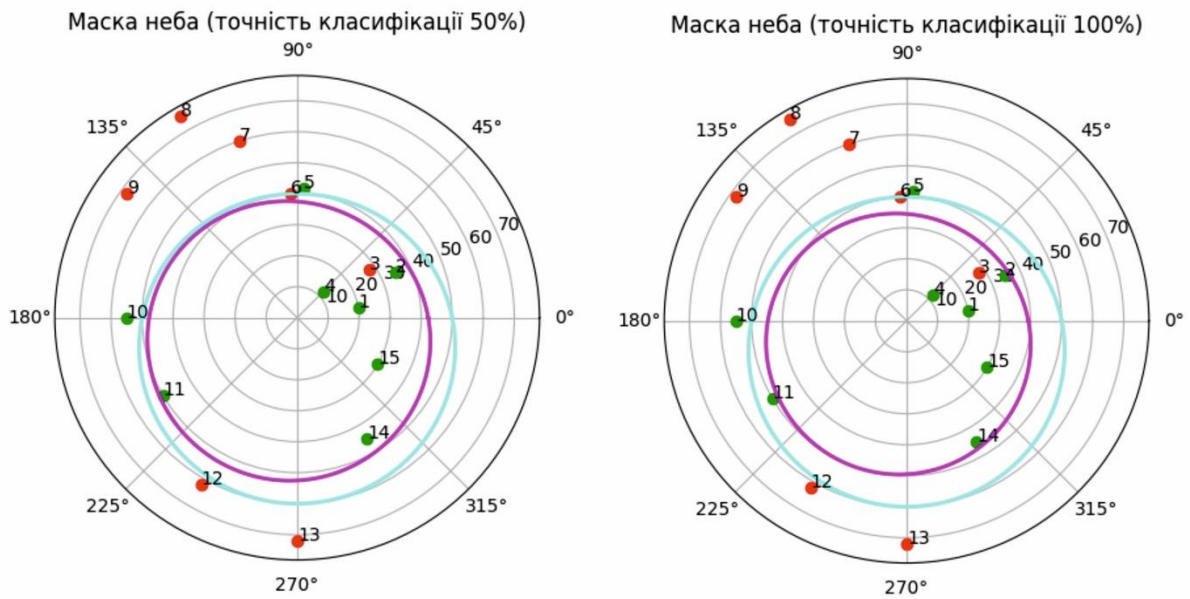


Рисунок 16. Демонстрація маски неба в середньо-міських районах з оцінкою та виправленням меж.

З отриманих даних випливає, що варіації у точності класифікації ледь помітно відбиваються на розрахованих показниках видимості неба, коли йдеться про забудову середньої насиченості.

По суті, для територій, що характеризуються помірним ступенем урбанізації, виявлено несприйнятливості алгоритму до неточностей при визначенні лінії видимості (LOS) чи її відсутності (NLOS): навіть якщо класифікатор працює менш точно, оцінена видимість неба утримується на рівні, що суттєво не відрізняється від фактичного значення.

3.3 Продуктивність з двома різними підходами до класифікації LOS/NLOS

У рамках цієї роботи ми залучили дві загальноприйняті методології для розрізнення супутників за характером отримання їхнього сигналу:

1. Використання класифікаційного порогу, що ґрунтується на співвідношенні потужності сигналу до шуму (SNR);

2. Застосування алгоритму машинного навчання (SVM), який оперує набором характеристик, отриманих від GNSS.

Величина SNR слугує мірилом добротності прийнятого сигналу.

Зазвичай, сигнали, що надходять від супутників з непрямою видимістю (NLOS), зазнають ослаблення та мають вищий шумовий фон, що логічно призводить до зменшення показника SNR.

З огляду на це, для первинного сортування можна використати елементарне порогове правило.

Для апаратури, задіяної у цьому дослідженні, цей критичний поріг було зафіксовано на позначці 35 дБ·Гц, і розмежування супутників на ті, що бачаться, та ті, що ні, відбувалося за такою умовою:

$$SV_i = \begin{cases} LOS, & \text{якщо } SNR_i \geq 35 \text{ дБ} \cdot \text{Гц} \\ NLOS, & \text{якщо } SNR_i < 35 \text{ дБ} \cdot \text{Гц} \end{cases}$$

де

SNR_i — вага (або важливість) коефіцієнта співвідношення потужності сигналу до потужності шуму для супутника з порядковим номером "i";
 SV_i — висновок щодо визначення видимості супутника.

Дана методика вирізняється легкістю впровадження та високою обчислювальною продуктивністю, водночас її достовірність суттєво обумовлена якістю прийому сигналу та специфікою апаратної частини конкретного GNSS-апарату.

Параметри точності здійснення супутникової ідентифікації за пороговим критерієм SNR, разом із середніми показниками прогнозованої

видимості небесної сфери, здобуті за допомогою цього методу, відображені відповідно у Таблицях 4 та 5.

У Таблиці 4 деталізовано метрики коректності визначення прямої (LOS) чи багатопроменевої (NLOS) видимості для кожної точки проведення експерименту, тоді як Таблиця 5 містить усереднені величини розрахованої кількості видимих супутників, виведені на підставі цієї класифікації.

Таблиця 4 Точність класифікації супутників SNR

Локація	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Точність класифікації (%)	92.1	85.5	86.2	78.5	83.8	80.0	77.3	62.5	65.3	68.4

Таблиця 5 Середнє значення та стандартне відхилення видимості неба згідно з класифікацією SNR

Локація	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Реальна видимість неба (%)	16.69	23.20	29.82	39.66	51.42	58.63	63.88	74.61	82.04	87.85
Середнє значення оціненої видимості (%)	27.51	32.92	29.34	37.00	48.76	51.72	47.66	52.40	57.82	60.60
Стандартне відхилення оціненої видимості (%)	2.37	5.59	4.06	6.18	2.77	5.56	3.67	5.16	0.90	2.37

Згідно з інформацією, поданою в Таблиці 4, для пункту P1 показник правильності класифікації досягає 92,1%, при цьому середній показник розрахункової видимості небосхилу становить 27,51%.

Дана величина доволі близько розташована до результату, зафіксованого за ідеальних умов класифікації (25,74%), що вказує на

задовільну стійкість застосованого методу навіть при застосуванні порогу SNR.

Щодо пунктів P8, P9 та P10, оцінка видимості неба наближається до рівня 60%, що корелює з даними, отриманими раніше під час моделювання для ділянок із невеликою або середньою забудовою насиченістю.

В таких обставинах число супутників у зоні прямої видимості (LOS) є адекватним, а вплив сигналів, що надходять за неосвітленим шляхом (NLOS), не набуває вирішального значення.

У міських каньйонах середньої поверховості (рівні забудови P4 та P5) розрахована видимість неба майже збігається з фактичною.

Причина цього криється у достатній кількості супутникових сигналів, як прямих (LOS), так і непрямих (NLOS), що забезпечує точне окреслення як небесної сфери, так і силуетів будівель.

Проте, варто звернути увагу на Таблицю 5, де видно, що дисперсія (стандартне відхилення) розрахункової видимості неба, коли використовується класифікація за SNR, є доволі мінливою.

Переважно, це відхилення перевищує позначку у 3%, що є значним збільшенням порівняно з результатами, отриманими за умов бездоганної класифікації.

Головна причина криється у мінливості порогової класифікації SNR протягом різних періодів спостережень.

Показники співвідношення "сигнал до шуму" здатні коливатися навіть для одного й того ж супутника, що зумовлено такими явищами, як багатопроменеве поширення, часткове затінення або змінами умов довкілля.

Отже, ідентифікація супутників як розташованих на прямій видимості (LOS) чи в умовах непрямой видимості (NLOS) може трансформуватися між епохами, що безпосередньо відбивається на

конфігурації визначеного контуру споруди та спричиняє відчутні коливання у масці неба.

Ось приклад подібної непевності, продемонстрований на прикладі точки Р6: на рисунку 17 представлені маски неба з виконаною оцінкою та подальшим виправленням країв, отримані шляхом класифікації за відношенням сигнал/шум (SNR) для часових епох 130, 131 та 132.

Ці зображення чітко показують значні зсуви у структурі країв навіть протягом доволі нетривалого періоду, що слугує доказом того, наскільки цей підхід реагує на якість визначення сигналів.

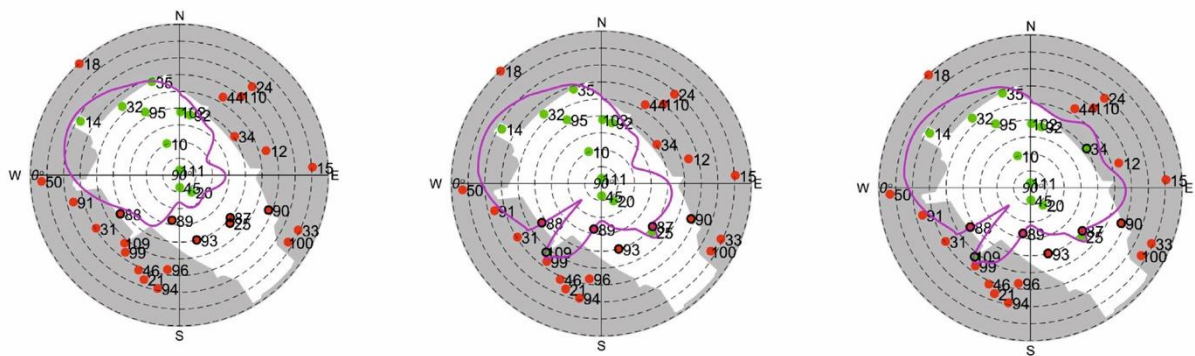


Рисунок 17. Демонстрація маски неба з оцінкою межі та виправленням

У часовому проміжку 130 (ліворуч на малюнку) розрахункова площа огляду неба сягає 42,91 відсотка.

До періоду 131 (середина зображення) цей показник збільшується до 51,48%, а в момент часу 132 (праворуч) сягає вже 56,25%.

Як свідчить Рис. 17, на етапі 130 супутники з ідентифікаторами 25, 87, 89 та 93 помилково були марковані як об'єкти, що не мають прямої видимості, хоча насправді демонстрували властивості видимості.

Вже до епохи 131 супутник номер 25 коректно перекваліфіковано на LOS, завдяки чому оцінена межа зони видимості розширилася, що спричинило зростання загального відсотка видимості відносно епохи 130.

Аналізуючи детальніше епохи 131 та 132, можна констатувати, що апарат 34, котрий насправді є об'єктом, недоступним для прямої видимості (NLOS), у 132-й епосі був упереджено визначений як такий, що має пряму видимість (LOS).

Ця помилка призвела до завищення оцінки видимості приблизно на п'ять відсотків.

Отже, ця нестійкість у процесі категоризації, спричинена хибною спрацею порогового методу за SNR, викликає помітні розбіжності у визначенні маски видимості неба та, як наслідок, збільшує стандартне відхилення отриманих даних.

З метою досягнення більшої стабільності, у розробленій методології було імплементовано класифікатор, заснований на техніці опорних векторів (SVM).

У цій моделі задіяно низку показників, отриманих із системи GNSS, а саме:

- відношення потужності сигналу до рівня шуму (SNR);
- висота супутника над горизонтом;
- зв'язаний з псевдовимірюванням залишковий член, приведений до норми;
- показник узгодженості темпу зміни псевдовимірювань.

Радіальна базисна функція (RBF) слугувала ядром.

Модель навчали, використовуючи шістдесят відсотків від загального обсягу даних, відібраних випадковим чином з усіх оглянутих місць.

Результати точності класифікації за допомогою SVM задокументовано у Таблиці 6.

Тим часом, Таблиця 7 містить середні показники та стандартні відхилення оціненої прозорості неба, розраховані на основі цих SVM-класифікацій.

Таблиця 6 Точність класифікації SVM

Локація	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Точність класифікації (%)	96.2	95.3	95.6	89.6	91.7	85.5	86.4	80.7	67.0	72.5

Таблиця 7 Середнє значення та стандартне відхилення видимості неба

Локація	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Реальна видимість неба (%)	16.69	23.20	29.82	39.66	51.42	58.63	63.88	74.61	82.04	87.85
Середнє значення оціненої видимості (%)	26.68	26.59	24.68	37.19	44.03	50.01	48.09	64.53	58.80	62.36
Стандартне відхилення оціненої видимості (%)	0.96	3.52	1.88	3.38	1.89	2.96	3.09	2.48	1.80	2.05

Згідно з даними, наведеними у Таблиці 6, метод SVM демонструє точність класифікації, що перевищує позначку у 95% для об'єктів P1, P2 та P3.

Це дає підстави стверджувати, що показники оцінювання, здобуті для цих визначених місць, майже повністю збігаються з тими, що були зафіксовані при використанні еталонного (ідеального) підходу до визначення LOS/NLOS.

Розбіжність між середнім показником видимості неба, розрахованим із застосуванням SVM, та еталонним значенням є мінімальною: вона становить лише 0,94% для точки P1, 0,72% для P2 і 1,29% для об'єкта P3.

Наявність такого невеликого відхилення цілком прийнятна для практичної реалізації завдань у міській забудові.

Однак, навіть тоді, коли класифікація досягає значної точності, цілковито прибрати систематичні зсуви все одно не виходить.

Причина цього криється у специфіці просторового розташування супутників: їхнє нерівномірне розподілення за азимутом та кутом піднесення здатне породжувати локальні спотворення у визначенні краю будівлі, що, своєю чергою, призводить до залишкових упереджень при визначенні видимості небосхилу.

Висновки

У рамках бакалаврської роботи, орієнтованої на міське середовище України, а саме з фокусом на місті Івано-Франківськ, було застосовано метод розрахунку видимості небесної сфери, котрий цілковито спирається на аналіз даних про видимість супутників GNSS.

Обрана методологія включає послідовний процес реконструкції як самого обрїю неба, так і контуру забудови, що оточує місцевість, за допомогою апроксимації зібраних вимірювань за допомогою моделі згладжування сплайнами.

З огляду на це, окреслення меж будівель здійснюється з використанням адаптивного алгоритму зважування, котрий бере до уваги особливості оточення у місці розташування приймача (глибокий "міський каньйон", забудова середньої щільності чи відкрита місцевість).

Окрім того, використано механізм коригування цієї межі, метою якого є усунення розбіжностей між визначеним станом видимості супутників (пряма видимість або непряма затінена видимість) та первинно розрахованою межею забудови.

Наші вивчення, проведені у різноманітних міських ландшафтах, продемонстрували, що коли застосовується еталонна (бездоганна) класифікація прямої та непрямої видимості, розрахована оцінка видимості небесної сфери виявляється практично ідентичною до реальної.

Водночас, навіть коли задіяно апаратне класифікування за методом опорних векторів (SVM), сконструйоване на базі GNSS-характеристик (як-от співвідношення сигнал/шум, кут піднесення, похибки псевдодальності та інші подібні параметри), цей підхід демонструє сталішу роботу, зокрема у межах помірних чи глибоких "міських каньйонів".

Саме там, де екранування сигналів та їхнє багатопромєнєне відбиття стає найбільш вираженою проблемою.

Величина розрахункової видимості небесного склепіння здатна слугувати метрикою, що об'єктивно вимірює ступінь, до якого міська забудова перекриває доступ до супутників.

Відтак, вона може бути використана як основа для підбору найкращого методу визначення координат (чи то стандартний метод найменших квадратів — WLS, більш просунутий 3DMA GNSS, чи гібридні системи).

Це набуває особливого значення при роботі з українськими міськими агломераціями, які вирізняються значною різноманітністю архітектурних ландшафтів — від старовинних кварталів із тісно розташованими будівлями до новітніх житлових комплексів та відносно відкритих просторів.

У майбутніх роботах цілком реально впровадити теперішній підхід у систему GNSS/INS, яка працює в режимі слабкої зв'язаності, з метою покращення точності та надійності визначення місця розташування за умов неоптимального супутникового сигналу.

Планується також удосконалити процес розрізнення сигналів, враховуючи специфічні для міської забудови України завади: насадження, електричні дроти, споруди тимчасового користування та подібне.

Важливим аспектом, що вимагає глибокого аналізу, є вивчення того, як саме ці перешкоди впливають на характеристики сигналу (зокрема, частотний спектр, властивості кореляції, часові зсуви коду), використовуючи апаратуру, збудовану на засадах програмно-визначеної радіоінженерії.

На сьогодні, цей алгоритм оперує даними про супутники, що є миттєвими знімками, ігноруючи при цьому їхню часову залежність.

У перспективі варто було б брати до уваги часову послідовність отриманих даних, а також задіяти приблизні дані про місцезнаходження як додатковий індикатор оточення, адже його параметри трансформуються

залежно від характеру міського ландшафту (щільно забудована зона, помірна забудова, відкритий простір).

Оскільки визначено межі будівель з вищою точністю, застосований метод можна вбудувати в систему вибору способів позиціонування, що залежить від контексту.

Це стане наступним етапом на шляху до розробки навігаційної моделі, здатної адаптуватися до умов українських міст.

Список використаної літератури

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).
4. Шевчук В. М., Заєць О. С. Основи супутникової геодезії. Київ : КНУБА, 2018. 312 с.
5. Перій С. С., Тревого І. С., Баран П. І. Супутникові геодезичні технології в інженерній геодезії. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. 356 с.
6. Гроувз П. Д. Принципи ГНСС, інерціальних та мультисенсорних інтегрованих навігаційних систем. 2-ге вид. Лондон: Artech House, 2013. 800 с.
7. Хофманн-Велленхоф Б., Ліхтенеггер Х., Вейл Е. ГНСС – Глобальні навігаційні супутникові системи: GPS, ГЛОНАСС, Galileo та інші. Відень: Springer, 2008. 516 с.
8. Каплан Е., Хегарті К. Розуміння GPS/ГНСС: принципи та застосування. 3-тє вид. Бостон: Artech House, 2017. 723 с.
9. Ванг Л., Гроувз П. Д., Зібарт М. К. Оцінка продуктивності багатосупутникових ГНСС для міських каньйонів з використанням великих

моделей міст віртуальної реальності // The Journal of Navigation. 2012. Том 65(3). С. 459–476.

10. Аджрад М., Гроувз П. Д. Інтелектуальне міське позиціонування: інтеграція зіставлення тіней з 3D-картографуванням GNSS-дальності // The Journal of Navigation. 2017. Том 70(5). С. 1111–1134.

11. Лу Ю.-Х., Хан Дж.-Ю. Аналіз видимості супутників GNSS на основі 3D-просторової інформації в міських районах // Міжнародний архів фотограмметрії, дистанційного зондування та просторової інформаційної науки. 2020. Том XLIII-B4. С. 123–128.

12. Коу Р., Ян Б., Донг З., Лян Ф. Картування просторово-часової видимості глобальних навігаційних супутників у міських дорожніх зонах на основі панорамних знімків // International Journal of Digital Earth. 2021. Том 14(1). С. 1–14.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Підвищення точності ГНСС-позиціонування в міських районах на основі оцінки видимості неба »

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)