

DOI: 10.32347/2076-815X.2024.85.95-107

УДК 528. 2

к.т.н., доцент **Гончаренко О.С.**,

ou5us@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0353-2470,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

Денисюк Б.І.,

denysiuk_b@nubip.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1692-8551,

Національний університет біоресурсів і природокористування України,

д.т.н., професор **Катушков В.О.**,

kva_08@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3264-413X,

к.т.н., професор **Кузьмич О.Й.**,

kuzok@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1762-6344,

Київський національний університет будівництва і архітектури.

СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ ПРЯМОВИСНИХ ЛІНІЙ ТА ПОВЕРХНІ ГЕОІДА

Сьогодні глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) широко використовуються для розвитку національних геодезичних мереж та геодезичних досліджень. Однак, існують деякі застосування, де спостереження ГНСС повинні бути інтегровані з традиційними наземними геодезичними вимірюваннями. Для того, щоб інтегрувати спостереження ГНСС і традиційні вимірювання за допомогою високоточної зенітної камери, необхідно знати відхилення вискової лінії, що визначається як кут між вектором сили тяжіння і еліпсоїдальною нормаллю в даній точці.

Якщо астрономічні та еліпсоїдні координати визначені одночасно, можна одразу отримати значення відхилень вискових ліній. За значеннями відхилень вискових ліній можна визначити хвилястості (ондуляції) геоїда за допомогою астрономо-геодезичного нівелювання. Також можна визначити ортометричну висоту, якщо відома висота еліпсоїда (GPS) і хвилястість геоїда.

ПЗЗ-датчик з телескопом, спрямованим в зеніт, в поєднанні з DGPS дозволяє визначити еліпсоїдальні координати, а також астрономічні координати приблизно за півгодини з високою точністю.

Ключові слова: відхилення вискових ліній; ГНСС-спостереження; традиційні геодезичні вимірювання; геодезична мережа; вектор сили тяжіння; астрономо-геодезичне нівелювання; ондуляції геоїда.

Вступ. Астрономо-геодезичний метод визначення геоїда - єдиний, за допомогою якого можна безпосередньо отримати вертикальне відхилення

виска на поверхні Землі шляхом порівняння астрономічних і геодезичних координат. Ще одна величина, що бере участь в моделюванні геоїда, - це різниця висот геоїда і еліпсоїда. Різниця може бути отримана за допомогою гравіметричних вимірювань, комбінованих спостережень GNSS з геометричним нівелюванням або за допомогою коефіцієнтів гравітаційного потенціалу, визначених за допомогою супутникових вимірювань. Знаючи різницю висот геоїда і еліпсоїда, можна отримати вертикальні відхилення на поверхні геоїда.

Отже, геоїд відображає аномалії в розподілі мас і неоднорідності щільностей в земній корі над певною зоною або глобально для всієї поверхні Землі.

Крім гравіметрії, GNSS - нівелювання, наземні астрономіко-геодезичні методи здатні виявляти короткохвильові ондуляції геоїда.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В останні роки в ряді країн почали використовувати спеціальні цифрові зенітні камери (ЦЗК), що є більш компактними пристроями ніж зенітні труби. ЦЗК мають також і інші переваги: можуть транспортуватися, працюють у важкодоступних районах, забезпечують коротку тривалість спостережень. Завдяки цьому, значно розширюється коло задач [8], які можуть бути вирішені за допомогою ЦЗК, а саме: визначення астрономічних координат місця в різних ландшафтних умовах – рівнинних та гірських, припливно-відпливних зонах морського узбережжя і ділянок штучних водойм, що підтоплюються, річкових естуарій. Спостереження тривають 30-40 хв. разом із установкою апаратури (значно менше ніж класичні методи з використанням теодоліта). Вимірювання вільні від впливу рефракції, власних похибок спостерігача, завдяки автоматичній реєстрації положення точки Зеніту і зірок на ПЗЗ-матриці.

Після 70-х років минулого сторіччя основні поліпшення в методах астрономіко-геодезичних спостережень були досягнуті завдяки розробці зенітних фотоапаратів в Ганноверському університеті (Gessler 1975; Wissel 1982) і ETH Zurich (Bürki 1989). Італійський (Birardi 1976) та австрійський (Chesi 1984) інститути розробили аналогічні інструменти для астрономіко-геодезичних спостережень. Завдяки повністю автоматизованій реєстрації епох експозиції і показів рівня, ці системи забезпечували високий рівень точності і спрощені процедури спостереження в порівнянні зі старими системами. Такі системи використовувалися в багатьох європейських і американських країнах (наприклад, Швейцарії, Австрії, Німеччині, Данії, Греції, Канаді, Бразилії, Венесуелі). Однак отримання координат зірок із зображень здійснювалося вручну або напівавтоматично з використанням компаратора, і процес на одній станції зазвичай займав 3-5 годин.

У 2000-х роках в астрономо-геодезичних дослідженнях відбулася революція в зв'язку з винаходом сенсорної технології цифрового зображення (прилад із зарядовим зв'язком – ПЗЗ). Найбільш поширені існуючі переносні камери «Зеніт» (TZK2 і TZK3), в яких використовувалися фотоплівки, були перероблені і оснащені камерами CCD в Університеті Ганновера.

Ефективні і повністю автоматизовані системи, розроблені в Німеччині і Швейцарії (Hirt and Bürki 2003; Bürki et al. 2004; Hirt 2004; Müller et al. 2005; Hirt) надихнули багатьох інших дослідників в галузі геодезії в розробці власних цифрових зенітних камер: **Україна** (Боровий В.О., Бурачек В.Г., Гончаренко О.С., Карпінський Ю.О. 2004), **Польща** (Kudrys 2007), **Латвія** (Abele et al. 2012; Zariņš et al. 2016; Zarins et al. 2018), **Туреччина** (Halıcıolu et al. 2012; Halıcıolu et al. 2016), **Китай** (Wang et al., 2014; Tian et al., 2014 року) і **Угорщина** (Hirt et al. 2014 року).

Кожна з цих систем має унікальні конструктивні особливості, включаючи компоненти обладнання та програмне забезпечення для автоматизації. Актуальність даного напрямку досліджень сприяло успішному використанню цифрових зенітних камер в багатьох важливих проектах.

Перша вітчизняна цифрова зенітна камера (ЦЗК) була розроблена колективом авторів в 2004 році і в тому ж році отримано патент на винахід [5].

Компоненти вдосконаленої системи містять: дзеркально-лінзовий телескоп, камеру CCD, двохосьовий інклінометр, блок формування мітки зеніту, блок оброблення інформації, одночастотний GPS-приймач, який використовується для визначення точного часу та геодезичних координат. Процес установки і вимірювання займає в середньому 30 - 40 хв.

Щоб виключити помилки розбіжностей інструментальних осей, зображення знімаються за різними азимутами. З цієї причини калібрування азимута в цифровій зенітній камері виконується для чотирьох азимутальних напрямків, розділених на 90° .

Зірки на отриманих зображеннях ідентифікуються за допомогою точних зоряних каталогів. Для цієї дії необхідно знати наближені координати центру зображення в екваторіальній системі. Зірка ідентифікується за зенітною віддаллю, місцевим зоряним часом і геометрією камери CCD, які потім зіставляються з координатами зірки в каталозі. Визначення потенційних зірок і порівняння їх із інформацією каталогу виконується за допомогою спеціального програмного пакету. Астрономічні координати, обчислені на основі зображень зірок, і геодезичні координати використовуються для отримання компонентів відхилень прямої лінії.

Процес використання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), що триває у світі для розвитку національних геодезичних мереж та

геодезичних робіт, пов'язаний з Міжнародною землею референційною системою (ITRS) [14]. Однак, існують деякі застосування, де спостереження ГНСС мають бути інтегровані з традиційними тривимірними наземними геодезичними вимірюваннями за допомогою тахеометрів, які пов'язані з астрономічною топоцентричною системою координат (наприклад, підземні інженерні вишукування, гідротехнічне будівництво, моніторинг тощо). Для того, щоб поєднати ГНСС спостереження та високоточні вимірювання за допомогою тахеометрів, необхідно знати відхилення прямої лінії, що визначається як кут між вектором сили тяжіння і еліпсоїдальною нормаллю в даній точці.

Виклад основного матеріалу

Завдяки своїм простим рівнянням, еліпсоїд обертання, який сплюснутий на полюсах і близький до фізичної форми Землі, є зручним для визначення координат у геодезичних мережах. Проте еліпсоїд набагато менш придатний як поверхня відносності для визначення висот. Потреби у фізичній інформації приводять до геоїда, який визначається як екіпотенціальна поверхня, що збігається з середнім рівнем Світового океану, є геометричним місцем точок простору, що мають однаковий потенціал сили ваги [14]. Геоїд - поверхня, що має неправильну складну форму. Рівнева поверхня геоїда в кожній точці перпендикулярна до вискової лінії. Практичне значення та важливість цієї моделі полягає в тому, що лише за допомогою виска, рівня, нівеліра та інших геодезичних приладів можна простежити положення рівневих поверхонь, тобто, в нашому випадку, геоїда.

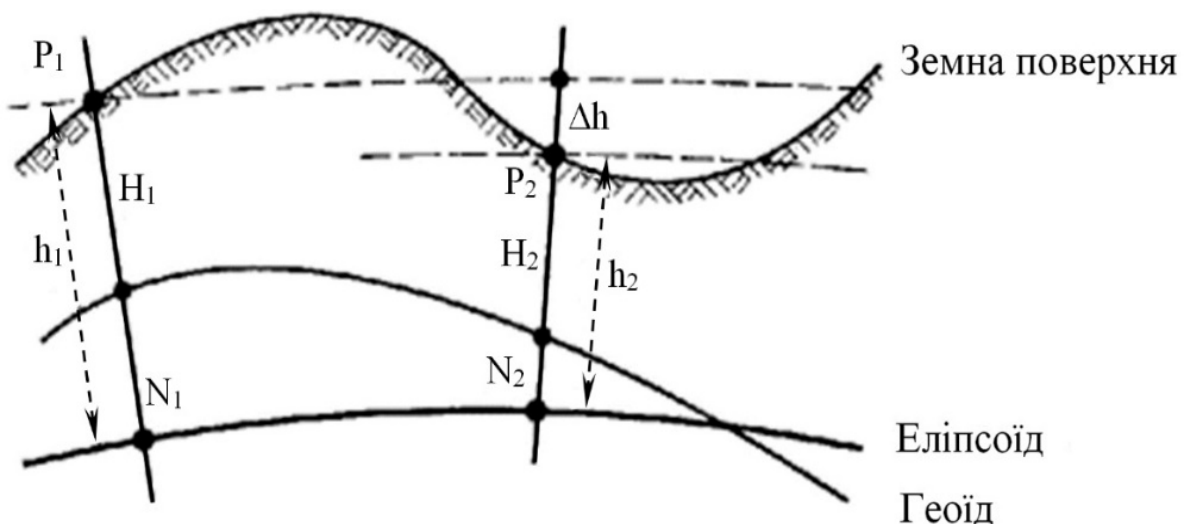


Рис. 1. Співвідношення між висотами

Вертикальна відстань між геоїдом та конкретним еліпсоїдом називається хвилею (ондуляцією) геоїда N . Віднімаючи цю хвилю від висоти еліпсоїда h вимірної за допомогою GPS, отримуємо ортометричну висоту H , яка визначається як лінійна відстань, виміряна від геоїда до точки поверхні.

$$H = h - N \quad (1)$$

або згідно з рис. 1

$$\Delta H = \Delta h - \Delta N \quad (2)$$

Кут θ (рис. 2) між напрямками нормалі еліпсоїда і прямовисною лінією в точці Р називається відхиленням прямовисної лінії. Зазвичай θ розкладають на дві складові і визначають як

$$\xi = \varphi - B \quad (3)$$

відхилення в площині меридіану і

$$\eta = (\lambda - L) \cos B \quad (4)$$

відхилення в площині першого вертикалу.

Астрономо-геодезичне визначення геоїда

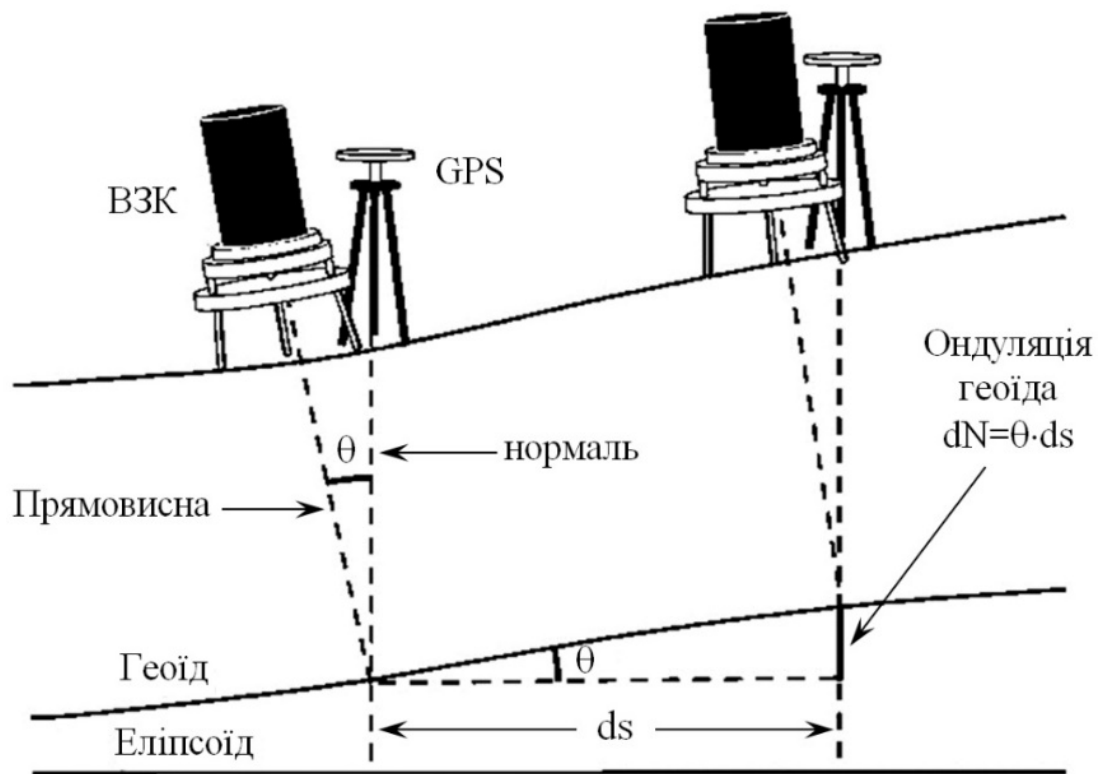


Рис. 2. Методика визначення висот геоїда

Згідно з рисунком 3 відхилення вискової лінії в заданій площині θ можна виразити через відхилення в площині початкового меридіану ε , площині першого вертикалу η та азимуту площини A :

$$\vartheta = \varepsilon \cdot \cos A + \eta \cdot \sin A \quad (5)$$

Ондуляції геоїда (рис.2) можуть бути обчислені за формулою

$$dN = \theta \cdot ds \quad (6)$$

Профіль геоїда будується за результатами вимірювань на станціях спостережень. Для визначення точності побудови профілю прийнято, що

кутовій величині в 1" на відстані 1км відповідає дуга довжиною близько 5мм. Тоді за значенням віддалі між суміжними станціями спостережень та величиною складової відхилень прямовисної лінії θ можна обчислити одиничний приріст ондуляції геоїда:

$$\sigma dN = 5\text{мм} \cdot \frac{ds[\text{м}]}{1000[\text{м}]} \cdot \frac{\sigma\theta["]}{1["]} \quad (7)$$

Для визначення відхилень вискових ліній потрібні дві системи координат. По-перше, це земна система, в якій визначаються астрономічні координати, і друга - еліпсоїдальна система, де визначаються геодезичні координати.

Положення зірок із зоряних каталогів наведено в екваторіальній системі. Координатами зорі в цій системі є пряме зоряне сходження α і схилення δ .

Координати зорі (схилення δ і пряме сходження α) зазвичай дуже швидко змінюються з часом. Причини цих змін пов'язані із власним рухом Землі, прецесією та нутацією, аберацією, паралаксом, рефракцією, зведенням середнього положення до видимого положення. Впливом паралакса можна знехтувати при спостереженні нерухомих зірок. Тут відстань від спостережної станції до центру мас Землі мала порівняно з відстанню до зірок.

Конструкція вимірювального комплексу та технологія вимірювання

Для досягнення необхідної точності визначення еліпсоїдальних координат застосовується принцип диференціального GPS, який використовує диференціальні поправки між станціями. Але DGPS забезпечує не тільки еліпсоїдальні координати; також важливо отримати точну інформацію про час з точністю до 50 нс RMS (час GPS \rightarrow UTC) на час експозиції. Цей процес контролюється за допомогою GPS-приймача, який отримує GPS-дані, диференціальні поправки і декодує дані в момент експозиції позначеного сигналом TTL. Перевага використання GPS для визначення часу є те, що відсутня похибка через персональні рівняння і його використання є дуже простим.

Телескоп має фокусну відстань 1000 мм і апертуру 180 мм. Для зменшення фокусної відстані до 500 мм між телескопом і ПЗЗ-камерою розміщено фокусний редуктор.

Ідея спільного використання зенітної камери та приймача GPS полягає в тому, щоб фіксувати поле зору в зенітному напрямку з усіма навколишніми зорями у фіксований момент часу. В цьому випадку визначається головна точка ПЗЗ-сенсора.

Зображення необхідно попередньо обробити за допомогою програмного забезпечення. Обробка зображень необхідна тому, що вплив атмосфери,

телескопа, самого ПЗЗ і пов'язаної з ним електроніки мають тенденцію погіршувати якість зображення [12].

Після обробки зображення виконується ідентифікація зорі та піксельного вимірювання її положення.

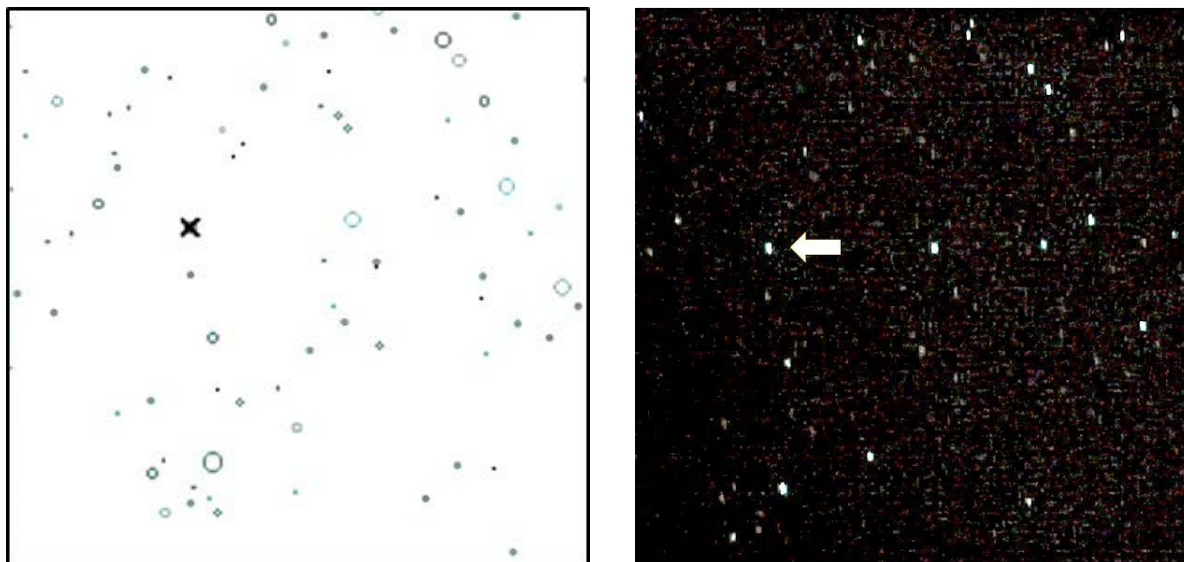


Рис 3. Ідентифікація зорі та вимірювання пікселів

Після того, як ці дані стають доступними для програми, починається процес сканування та ідентифікації зір в автоматичному режимі.

Координати опорних зірок беруть із зоряного Каталогу, що містить інформацію про власний рух зірок. Ця інформація представлена на лівій частині рис. 3. На правій частині відповідне ПЗЗ-зображення. На цей момент доступні координати положення зорі (α , δ) та виміряні координати пікселів.

Для того, щоб початок системи координат зображення збігався з центром сенсора, необхідно виконати перетворення системи координат пікселів (стовпців, рядків) в тангенціальну систему координат зображення (ξ , η).

Виміряні координати мають бути перетворені у спільну систему відліку. Але перед цим не ідентифіковані зірки мають бути відфільтровані. Через наявність кількох однакових зірок використовується перетворення Гельмерта.

$$\begin{bmatrix} \xi_D \\ \eta_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \xi_i \\ \eta_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (8)$$

ξ_D , η_D - обчислені координати зображення;

ξ_i , η_i - виміряні координати зображення;

a, \dots, d - параметри перетворення.

Визначення невідомих здійснюється за методом найменших квадратів.

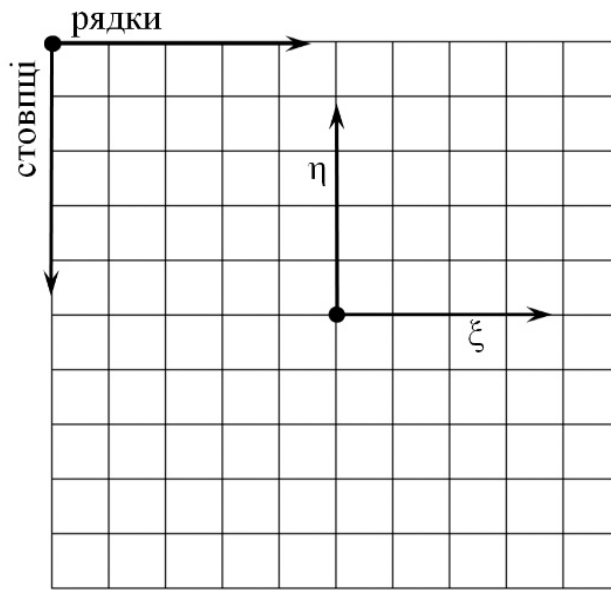


Рис. 4. Координати пікселів та координати зображень

Наступним кроком аналізу є перехід положення зорі від середнього до спостереженого положення.

Важливим є перетворення зоряних величин (α, δ) у стандартні координати (x, y) . [12].

$$x = - \frac{\cos \delta \cdot \sin(\alpha - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta \cdot \cos(\alpha - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta} \quad (9)$$

$$y = \frac{\sin \delta_0 \cdot \cos \delta \cdot \cos(\alpha - \alpha_0) - \cos \delta_0 \cdot \sin \delta}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta \cdot \cos(\alpha - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta}$$

і навпаки

$$\alpha = \alpha_0 + \arctan\left(\frac{-x}{\cos \delta_0 - y \cdot \sin \delta_0}\right) \quad (10)$$

$$\delta = \arcsin\left(\frac{\sin \delta_0 + y \cdot \cos \delta_0}{\sqrt{1 + x^2 + y^2}}\right)$$

Де α_0 і δ_0 є наближеними координатами, наприклад визначений місцевий зоряний час спостереження (α_0) та еліпсоїдальна широта місцезнаходження (δ_0).

Для інтерполяції центра датчика у полі зірок, які зараз описуються у стандартній системі координат потрібні формули перетворення, які встановлюють зв'язок між вимірними координатами та їхніми стандартними координатами.

Існує два способи перетворення:

- Фотограмметрична формула

$$\begin{aligned} \xi &= x_0 + C \cdot (x + y \cdot \kappa + x \cdot y \cdot \omega + (1 + x^2) \cdot \varphi) + x \cdot dC \\ \eta &= y_0 + C \cdot (y - x \cdot \kappa + (1 + y^2) \cdot \omega + y \cdot x \cdot \varphi) + y \cdot dC \end{aligned} \quad (11)$$

де: ξ, η – виміряні координати;
 x, y – стандартні координати;
 x_0, y_0 – центр датчика;
 κ, ω, ϕ – обертання;
 C – фокусна відстань.

- Астрометрична формула (8-параметричне перетворення)

$$\begin{aligned} x &= a + b \cdot \xi + c \cdot \eta + g \cdot \xi \cdot \eta + h \cdot \xi^2 \\ y &= d + e \cdot \xi + f \cdot \eta + h \cdot \xi \cdot \eta + g \cdot \eta^2 \end{aligned} \quad (12)$$

де: ξ, η – виміряні координати;
 x, y – стандартні координати;
 $a...g$ – параметри перетворення.

У фотограмметричному способі всі параметри визначаються самостійно, в той час як 8-параметричне перетворення визначає параметри недиференційовано.

Наближені координати мають бути скориговані залишками. Координати головної точки повинні бути скориговані обчисленими зсувами x_0 та y_0 та відповідно a та d .

Етапи аналізу реалізовано в авторській програмі, яка базується на цій спеціальній послідовності спостережень.

Точність перетворення знімків у загальну систему координат становить 0,2 пікселя, а інтерполяція головної точки в полі зірок відбувається з точністю до 0,3 секунди.

Зазвичай більшість зір на зображенні ідентифікують за умови, що відповідні еталонні зорі доступні у вибраному зоряному каталозі. Для всіх ідентифікованих зоряних величин обчислюється перетворення Гельмерта, з якого отримується набір покращених параметрів перетворення. Покращені параметри перетворення використовуються для повторного перетворення зображень зір. Це відбувається тоді, коли зорі, що утворюють основу, розташовані дуже близько одна до одної, і застосування розрахованих параметрів перетворення призводить до більших похибок екстраполяції.

Якщо ідентифікація всього зоряного поля не вдалася, тобто загалом ідентифіковано менше ніж 4 зорі, інші зорі можна вилучити з матриці відповідностей і знову застосувати лінійне перетворення до зоряного зображення.

Для наступних етапів обробки використовуються лише ідентифіковані зорі.

Висновки і перспективи подальших досліджень

В статті подано огляд відповідних методик астрономічних спостережень та алгоритм обчислення координат точки зеніту. Розглянуто такі технічні аспекти, як розпізнавання об'єктів, методика визначення центра зображення зірки та реєстрації епохи. Наведено опис поточної експериментальної цифрової зенітної камери.

На основі міркувань, де розглядається точність методу центру ваги та точкової передавальної функції, можна стверджувати наступне: за допомогою методу центру ваги можна досягти точності від 0.3" до 0.5" для вимірювання зоряних центрів. Точкова передавальна функція з Гауссовим розподілом дозволяє вимірювати зоряні центри з точністю приблизно від 0.2" до 0.3" і, отже, є в 1,5 рази точніше, ніж метод центру ваги. До обох методів відноситься те ж саме, що точність центрування залежить від відношення сигнал/шум і, відповідно, від видимої яскравості. Чим вище відношення сигнал/шум, тим точніше можна визначити центр зорі. Якщо спостерігаються ділянки неба, де є достатня кількість зірок і, відповідно, є достатня кількість зоряних зображень, то в процесі оцінювання бажано розглядати лише зображення зоряних величин до 12-ї зоряної величини. Метод центру ваги можна використовувати для попередньої редукції астрометричних даних.

Визначення відхилень прямовисних ліній за допомогою переносного комплексу ЦЗК та GPS- приймача є досить зручним і компактним засобом вимірювань. Виконані експериментальні дослідження високоточної зенітної камери підтвердили теоретичні розрахунки, зокрема, точність визначення астрономічних координат не перевищує $\pm 0,35''$. Максимальне коливання значень складових відхилення прямовисної лінії в площині меридіану склало $0,45''$, а в площині першого вертикалу - $0,80''$ [7,9]. На думку авторів, значне коливання величини η пов'язано з температурними змінами в атмосфері, що характерно для весняної погоди. Проте середні квадратичні похибки із результатів вимірів знаходяться в межах допустимого. Перевагу слід надавати методу розрахунку відхилень вертикальних компонентів біля земної поверхні, щоб уникнути будь-яких поправок, пов'язаних з висотою над геоїдом у випадку гірської місцевості.

Список використаних джерел

1. Бурачек В.Г. Вдосконалення методики астрономо-гравіметричного нівелювання / В.Г. Бурачек, О.С. Гончаренко, Р.Х. Греку // Інженерна геодезія. – 2000. – Вип. 42. – С. 25–28.
2. Гончаренко О.С. Короткохвильові ондуляції геоїда і необхідність їх вивчення астрономо-геодезичними та гравіметричними засобами / О.С. Гончаренко, В.Я. Вітенко // Інженерна геодезія. – 2002. - Вип. 48. - С. 83–88.

3. Гончаренко О.С. Ефективність визначення вискових ліній за допомогою засобів GPS і високоточної зенітної камери / О.С. Гончаренко // Інженерна геодезія. – 2003. – Вип. 49. – С. 68–72.
4. Гончаренко О.С. Зенітна камера / О.С. Гончаренко // Інженерна геодезія. – 2004. – Вип. 50. – С. 46–50.
5. Деклараційний патент на винахід UA 63575 А, МКИ G02B17/00. Пристрій для спостереження зірок в зеніті / Боровий В.О., Бурачек В.Г., Гончаренко О.С., Карпінський Ю.О (Україна).-№ 2003054111; заявл.06.05.2003; опубл.- 15.01.2004, Бюл. № 1.
6. Гончаренко О.С. Врахування редуції GPS- антени під час вимірювань за допомогою високоточної зенітної камери / О.С. Гончаренко // Інженерна геодезія. – 2005. – Вип. 51. С. 95–97.
7. Гончаренко О.С. Дослідження елементів моделі вимірювань високоточною цифровою зенітною камерою / О.С. Гончаренко, В.М. Гладілін // Інженерна геодезія. – 2006. – Вип.52. – С. 45–50.
8. Гончаренко О.С. Можливість використання астрономо-геодезичних і супутникових засобів для пошуку корисних копалин / О.С. Гончаренко, Б.І. Денисюк // Інженерна геодезія. – 2008. – Вип. 54. – С. 51–54.
9. Гончаренко О.С. Високоточне визначення профілю локального геоїда за допомогою цифрової зенітної камери та засобів GPS / Гончаренко О.С.// Інженерна геодезія. Київ, 2011. - Вип. 57. - С. 10-14.
10. Ceylan A.: Determination of the deflection of vertical components via GPS and leveling measurement: A case study of a GPS test network in Konya, Turkey. Scientific Research and Essay Vol.4 (12), December 2009, pp. 1438-1444.
11. Vittuari L., Tini M. A., Sarti P., Serantoni E., Borghi A., Negusini M. and Guillaume S.: A Comparative Study of the Applied Methods for Estimating Deflection of the Vertical in Terrestrial Geodetic Measurements. Sensors, 2016, 16, 565.
12. Schildknecht, Th.: Optical astrometry of fast moving objects using CCD-detectors. Vol. 49, Geodätisch - physikalische Arbeiten in der Schweiz, 1994.
13. Seidelmann, P.K.: Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. Hrsg. v. P. K. Seidelmann. Mill Valley; University Science Book, 1992.
14. Teunissen, P.J.G.; Kleusberg A.: GPS for Geodesy. Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York 1998.

PhD, associate professor **Honcharenko Oleksandr**,
Taras Shevchenko National University,
Senior Lecturer **Denysiuk Bohdan**,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Doctor of Technical Sciences, Professor **Katushkov Volodymyr**,
PhD, associate professor **Kuzmych Oleksandr**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

MODERN METHODS OF DETERMINING PLUMBLINE AND GEOID SURFACE DEFERENCES

Today, global navigation satellite systems (GNSS) are widely used for the development of national geodetic networks and geodetic research. However, there are some applications where GNSS observations should be integrated with traditional

ground-based geodetic measurements (e.g., underground engineering surveys, monitoring of hydraulic structures, etc.) In order to integrate GNSS observations and traditional measurements using a high-precision anti-aircraft camera, it is necessary to know the deviation of the plumb line, defined as the angle between the gravity vector and the ellipsoidal normal at a given point.

If the astronomical and ellipsoidal coordinates are determined simultaneously, you can immediately obtain the values of the plumb line deviations. Using the values of the deviations of the plumb lines, you can determine the undulations (ondulations) of the geoid using astronomical and geodetic leveling. You can also determine the orthometric height if you know the height of the ellipsoid (GPS) and the waviness of the geoid.

A CCD sensor with a telescope pointed at the zenith, in combination with DGPS, allows you to determine the ellipsoidal coordinates, as well as the astronomical coordinates in about half an hour with high accuracy.

Determining the deviations of plumb lines using a portable DSC set and a GPS receiver is a fairly convenient and compact measurement tool. The experimental studies of the high-precision anti-aircraft camera confirmed the theoretical calculations; in particular, the accuracy of determining astronomical coordinates does not exceed $\pm 0.35''$. The maximum fluctuation of the values of the components of the plumb lines deviation in the meridian plane was $0.45''$, and in the plane of the first vertical - $0.80''$.

Keywords: plumb line deviation; GNSS observations; traditional geodetic measurements; geodetic network; gravity vector; astronomical and geodetic leveling; geoid ondulation.

REFERENCES

1. Burachek V.H. Vdoskonalennia metodyky astronomo-hravimetrychnoho niveliuvannia / V.H. Burachek, O.S. Honcharenko, R.Kh. Hreku // Inzhenerna heodeziia. – 2000,. – Vyp. 42. – S. 25–28. {In Ukrainian}
2. Honcharenko O.S. Korotkokhvylovi onduliatsii heoida i neobkhdnist yikh vyvchennia astronomo-heodezychnymy ta hravimetrychnymy zasobamy / O.S. Honcharenko, V.Ia. Vitenko // Inzhenerna heodeziia. – 2002. - Vyp. 48.- S. 83–88. {In Ukrainian}
3. Honcharenko O.S. Efektyvnist vyznachennia vyskovykh liniy za dopomohoiu zasobiv GPS i vysokotochnoi zenitnoi kamery / O.S. Honcharenko // Inzhenerna heodeziia. –2003. – Vyp. 49. – S. 68–72. {In Ukrainian}
4. Honcharenko O.S. Zenitna kamera / O.S. Honcharenko // Inzhenerna heodeziia. – 2004. –Vyp. 50. – S. 46–50. {In Ukrainian}

5. Deklaratsiinyi patent na vynakhid UA 63575 A, MKY G02B17/00. Prystrii dlia sposterezhennia zirok v zeniti / Borovyi V.O., Burachek V.H., Honcharenko O.S., Karpinskyi Yu.O. (Ukraina). - № 2003054111; zaiavl.06.05.2003; opubl.-15.01.2004, Biul. № 1. {In Ukrainian}
6. Honcharenko O.S. Vrakhuvannia reduktsii GPS- anteny pid chas vymiriuvan za dopomohoiu vysokotochnoi zenitnoi kamery / O.S. Honcharenko // Inzhenerna heodeziia. – 2005. – Vyp. 51. S. 95–97. {In Ukrainian}
7. Honcharenko O.S. Doslidzhennia elementiv modeli vymiriuvan vysokotochnoiu tsyfrovoiu zenitnoi kameroiu / O.S. Honcharenko, V.M. Hladilin // Inzhenerna heodeziia. – 2006. – Vyp. 52. – S. 45–50. {In Ukrainian}
8. Honcharenko O.S. Mozhlyvist vykorystannia astronomo-heodezychnykh i suputnykovykh zasobiv dlia poshuku korysnykh kopalyn / O.S. Honcharenko, B.I. Denysiuk // Inzhenerna heodeziia. – 2008. – Vyp. 54. – S. 51–54. {In Ukrainian}
9. Honcharenko O.S. Vysokotochne vyznachennia profilu lokalnoho heoida za dopomohoiu tsyfrovoi zenitnoi kamery ta zasobiv GPS / Honcharenko O.S.// Inzhenerna heodeziia. Kyiv, 2011. - Vyp. 57. S. 10-14. {In Ukrainian}
10. Ceylan A. Determination of the deflection of vertical components via GPS and leveling measurement: A case study of a GPS test network in Konya, Turkey. Scientific Research and Essay Vol. 4 (12), December 2009, pp. 1438-1444. {in English}
11. Vittuari L., Tini M.A., Sarti P., Serantoni E., Borghi A., Negusini M. and Guillaume S.: A Comparative Study of the Applied Methods for Estimating Deflection of the Vertical in Terrestrial Geodetic Measurements. Sensors, 2016. 16. 565. {in English}
12. Schildknecht, Th.: Optical astrometry of fast moving objects using CCD-detectors. Vol. 49, Geodätisch - physikalische Arbeiten in der Schweiz, 1994. {in English}
13. Seidelmann, P.K.: Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. Hrsg. v. P.K. Seidelmann. Mill Valley; University Science Book, 1992. {in English}
14. Teunissen, P.J.G.; Kleusberg A.: GPS for Geodesy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1998. {in English}