

УДК 528.21

Решетило В.О., науковий співробітник науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

Кіпріанов О.Л., науковий співробітник – інженер-випробувач науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

Кузнецов В.О., начальник науково-технічного комплексу вимірювань Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ НОРМАЛЬНИХ ВИСОТ ТОЧОК ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

У статті розглянуто особливості застосування супутникових методів визначення нормальних висот точок, які будуть використовуватись в забезпеченні точної топогеодезичної прив'язки об'єктів під час випробувань.

Ключові слова: супутникові методи, нормальні висоти, квазігеоїд, геоїд, місцевість, нівелювання, локальна система

Висока точність сучасних супутникових технологій та систем поряд з можливістю проведення вимірювань у будь-який час доби та на будь-якій місцевості, створили передумови для ефективного використання супутникових методів визначення координат та висот при вирішенні наукових та практичних завдань випробувань озброєння та військової техніки.

В останні роки, методи визначення висот за допомогою супутникової системи навігації GPS (*англ. Global Positioning System — система глобального позиціонування*) все частіше використовуються при визначенні висот вихідних точок місцевості.

До застосування супутникових технологій для визначення висот застосовувалося геометричне нівелювання. Це метод нівелювання, в результаті якого визначаються нормальні висоти, необхідні для вирішення більшості топогеодезичних задач. Методом геометричного нівелювання створена Державна нівелірна мережа. Нормальні висоти геодезичних пунктів визначаються в Балтійській системі висот 1977 року, вихідним початком якої є нуль Кронштадтського футштока.

Сучасні навігаційні прилади СН-4601 та СН-3003, виробництва Державного підприємства “Оризон-Навігація” міста Сміли Черкаської області [3], а також програмне забезпечення радарної системи MFTR-2100/40, виробництва фірми Weibel та Beatronic Supply ApS Королівства Данії [2], що використовуються для топогеодезичної прив'язки об'єктів, здатні визначати координати в системах WGS-84, UTM, MGRS, ПЗ-90, СК-95, СК-42, УСК-2000, ITRF2000, але висоти точок вираховуються від еліпсоїду, який використовує ця система. Жоден з існуючих навігаційних приладів не здатен визначити нормальну висоту точки.

Під час випробувань, топогеодезична прив'язка вогневих позицій артилерії, стартових позицій пускових установок здійснюється в системі плоских прямокутних координат СК-42 з використанням нормальних висот, а все частіше WGS-84 з еліптичними висотами. Наявність різноманітних програмних засобів для топогеодезичної прив'язки з невідомими алгоритмами вирахування висот, створює неоднозначність при порівнянні результатів (обробки даних

випробувань засобами контролю), тому потрібен єдиний підхід до визначення висот точок з використанням супутникового нівелювання.

Значні фінансові витрати на розробку алгоритмів і програм, а також жорстка конкурентна боротьба між фірмами призвели до того, що усі програмні продукти є закритими від фахівців і представляються споживачам як кінцеві, єдино вірні розробки, які споживач вимушений купувати, покладаючись лише на авторитет фірми. Інформація, яка міститься в сучасній науковій і технічній літературі, у більшій частині, носять декларативний характер і відкриває лише основні принципові рішення.

Актуальним залишається питання точного визначення висот точок, які використовуються в розрахунках установок для стрільби артилерії, при створенні таблиць стрільби, вирахуванні великих відстаней, визначенні можливості прямої видимості, моніторингу зміни висот місцевості, забезпеченні польотів авіації, забезпеченні точної топогеодезичної прив'язки об'єктів під час випробувань.

Супутникова нівеляція отримала поширення після впровадження в геодезичну практику супутникових вимірювальних технологій за результатами обробки GPS/ГЛОНАСС - вимірів з точністю, що пред'являється до геодезичних визначень нормальних висот [5].

Практична роль, яку відіграють нормальні висоти, полягає в тому, що їх знання необхідне для обчислення редуцій у безпосередньо виміряні на земній поверхні величини при переході на поверхню еліпсоїда.

Традиційний спосіб набуття найбільш точних значень нормальних висот - це геометрична нівеляція, яка програє супутниковим визначенням висот за витратами та по продуктивності. Тому, створення умов та методів для практичного застосування супутникової нівеляції є одним з пріоритетних напрямів сучасного розвитку геодезії та підвищення точності вимірювань під час випробувань.

Нормальні висоти практично не залежать від вибору еліпсоїда і визначаються за результатами вимірювань, виконаних на фізичній поверхні Землі.

Нормальна система висот вигідна тим, що не вимагає гіпотез про розподіл мас усередині Землі, тому обчислити значення висоти можна досить точно, а якість отриманих висот залежить в основному тільки від якості вимірювань. Нормальні висоти можуть бути визначені з результатів нівелювання, а також обчислені за геодезичними висотами, якщо відома інформація про висоти квасігеоїда ζ [6], оскільки сума нормальної висоти і аномалії висоти дає геодезичну висоту точки поверхні Землі:

$$H_g = H_n + \zeta, \quad (1)$$

де, H_g - геодезична висота; H_n - нормальна висота; ζ - висота геоїду (квасігеоїду), яка визначається при користуванні глобальною моделлю висот геоїду EGM-2008 (Earth Gravitational Model 2008) [3].

Аномалія висоти виникає через те, що гравітаційне поле Землі не збігається з нормальним, тому нормальна висота H_n не дорівнює геодезичній H_g .

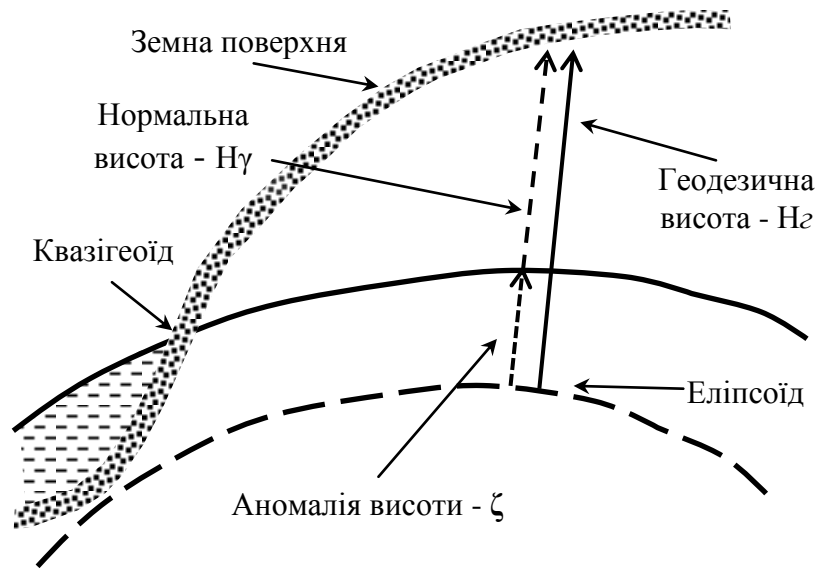


Рис.1. Виникнення аномалії висоти.

У роботах М.С. Молоденского запропоновано використовувати нормальну висоту відносно поверхні геоїда або квазігеоїда, який визначається за вимірними значеннями потенціалів сили тяжіння методом астрономо-гравіметричного нівелювання. Згідно теорії Молоденского [1] квазігеоїд співпадає з геоїдом на рівні моря і відступає від поверхні геоїду на суші. Максимальні відхилення (до 2-3 метрів) в гірських районах.

Супутникове нівелювання дозволяє вирішувати задачу, тобто отримувати нормальні висоти по геодезичним висотам і висотам квазігеоїду.

Геодезична висота може бути вирахована з використанням результатів супутникових вимірів за формулою:

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \cos B + Z \sin B - a \sqrt{1 - e^2} \sin 2B \quad (2)$$

У науковій і технічній літературі відсутні чіткі рекомендації щодо обчислення геодезичної висоти, а також, залишається нез'ясованим, параметри якого еліпсоїду необхідно обирати в формулі (2).

У більшості випадків геодезична висота H_g вираховується без перетворення координат відносно еліпсоїду WGS-84, а просто вираховується нормальна висота H_n за формулою (1).

Таким чином, за допомогою супутникових вимірювань з використанням параметрів еліпсоїду WGS-84 та значеннями аномалій [4] висот для району нівелювання можна отримати значення нормальних висот.

Однак, супутникове нівелювання не позбавлене недоліків якими являються помилки перетворення висот в локальну геодезичну систему, а також неможливість отримати нормальні висоти безпосередньо з вимірювань.

Іншим недоліком супутникових технологій являється вплив на точність результатів вимірів стану атмосфери та складностей із застосування супутникових технологій в закритій від супутникових сигналів місцевості.

Вплив помилок координат і різностей координат на вираховане значення різниць геодезичних висот між точками вельми суттєве. [9]:

$$m_n = \sqrt{\frac{S^2}{R^2} m_{xyz}^2 + m_{\Delta}^2} \quad (3)$$

де, S - відстань між пунктами; R - радіус Землі; m_{xyz} - середні квадратичні похибки координат опорного пункту, m_{Δ} - середні квадратичні похибки різностей координат між пунктами.

Реальну допомогу у вирішенні цієї проблеми можуть надати опорні пункти (репери) з відомими нормальними висотами в локальних моделях висот [10].

Досвід виконання геодезичних робіт під час випробувань ОВТ переконливо підтвердив доцільність використання локальних систем координат на території полігону або ділянці місцевості, де проводяться випробування.

Вирішення завдання щодо отримання з потрібною точністю значень нормальних висот кожного реперу по супутниковим визначенням геодезичних висот, тобто встановлення зв'язку геодезичної висоти реперу, отриманої з результатів супутникових спостережень, з нормальною висотою цього ж реперу можна здійснити двома шляхами:

1 – вирахувати за формулою (1) значення нормальної висоти реперу H_{γ} , використовуючи результати гравіметричної зйомки та обраховану за ними аномалію висоти ζ ;

2 – з використанням уточненої моделі локального геоїду (квазігеоїду) на заданий район інтерполювати значення аномалії висоти в обумовлену точку [6].

Спосіб розділення висоти на дві частини, який дозволяє на рівні точності виконуваних вимірів вираховувати кожен складову, а відповідно і їх суму, став фундаментальним для розробки сучасних методик визначення нормальних висот.

Виконання супутникового нівелювання вимагає супутникових вимірювань еліптичних висот та знання висот квазігеоїда. Висоти квазігеоїда визначають за моделлю висот квазігеоїда - набору даних і математичний апарат, який дозволяє отримувати за цими даними для району нівелювання моделі безперервного поля значень висот квазігеоїда. Ці моделі створюються спеціальними науковими центрами і містять найбільш точну інформацію про висоти квазігеоїда для конкретного регіону.

На основі супутникових технологій можна запропонувати наступну послідовність робіт з обчислення висот реперів:

- вибір кількох пунктів з відомими координатами в будь-якій системі координат;
- обчислення перевищення до зазначених пунктів в обраній системі координат;
- за значеннями висот на опорних пунктах обчислюються параметри, що дозволяють побудувати поверхню квазігеоїда;
- визначення висот інших пунктів по опорних точках;
- обчислення параметрів перетворення висот з однієї системи координат в іншу.

На підставі способу обчислення висот необхідно визначити властивості квазігеоїда за загальними пунктам, а потім виконуються польові геодезичні роботи для визначення перевищень.

Дані рекомендації щодо застосування супутникових методів повинні забезпечити підвищення точності визначення висот з точністю позиціонування.

На практиці доцільно використовувати дещо спрощений спосіб супутникового нівелювання – супутникові вимірювання виконуються на пунктах з відомими нормальними висотами. Так само як і при геометричному нівелюванні, супутниковими вимірами зв'язуються опорні пункти і всі обумовлені пункти. Виміряні збільшення геодезичних висот доповнюються відповідними приростами висот квазігеоїда. Отримані збільшення нормальних висот використовують для розрахунку нормальних висот пунктів, що визначаються (Рис.2)

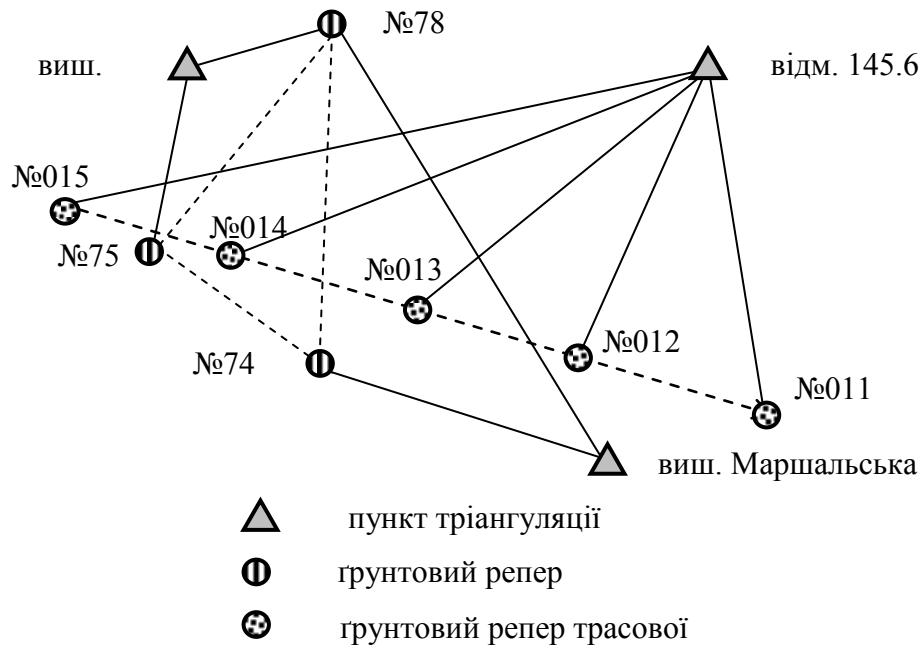


Рис.2. Схема супутникової мережі рівневих реперів.

Створена локальна система реперів може контролюватися на предмет точності та змін висот з часом супутниковими фазометричними вимірюваннями [8].

За досвідом (ZAKPOS Transcarpathian Position Determination System) [7] враховуючи локальну поправку, яка була визначена на західну частину України, <http://zakpos.zakgeo.com.ua/index.php> (Львівполітехніка), можна досягти точності у визначенні ζ на рівні $\pm 0.030 - 0,050$ м. що відповідає нівеляції II класу, нев'язка якого обчислюється $5 \text{ мм}\sqrt{L}$.

Для отримання нормальної (Балтійської) висоти за формулою (1) аномалія висоти геоїду - ζ визначалася з максимальною точністю за моделлю EGM2008 [4] для території Європи з точністю ± 0.208 м. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>.

Для визначення координат реперів використовувалось устаткування фірм Trimble та South (двочастотний приймач 5700 та RTK приймач S82T відповідно). Методи виміру – традиційний статичний і RTK (англ. Real Time Kinematic – кінематика в реальному часі). Для обробки статичних вимірів використовувалося програмне забезпечення Trimble Total Control та Leica Geo Office. Точність статичних вимірів висот не перевищувала - $mh = \pm 0,010$ м., а в режимі RTK - $mh = \pm 0,020$ м.

Трансформація у Балтійську систему висот використовувалася через EGM2008 [4] з локальною поправкою ZAKPOS. Різниця висот реперів, отримані GPS методом із геометричної нівеляції, точність визначення нормальних висот районів робіт повністю відповідає технічним вимогам і складає $mh = \pm 0,013$ м.

Таким чином, супутникове нівелювання за запропонованими способами та створення за цими вимірами локальної системи нормальних висот дозволить створити єдиний підхід до визначення висот незалежно від обраної системи координат. В обраних районах система реперів та підготовлені вимірювальні траси, з відомими поправками для переходу від геодезичних еліптичних висот до нормальних, значно скоротять час на визначення координат та підвищать точність вимірювань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Молоденский М.С. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Земли. - М. : Наука, 2001. – С. 35–58 ; ил. – (Серия "Избранные труды").

2. Інструкція з експлуатації радарної системи MFTR 2100/40. Програмне забезпечення WinTrack. UG-2625-WinTrack_Users_Guide. – С. 102–110.
3. Геодезичний комплекс ГНСС GPS/ГЛОНАСС СН-4601. Настанова щодо експлуатування АПМА.461513.011 РЭ. – С. 7–9, 42.
4. Елагин А.В. Вычисление высот квазигеоида по коэффициентам глобальной модели гравитационного поля Земли EGM2008 / А.В.Елагин // ГЕО-Сибирь-2010, VI Междунар конгр. : сб. материалов 6 т. (Новосибирск, 19-29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. – Т. 1, Ч. 1. – С.151–153.
5. Шануров Г.А. Определение высот уровенных постов спутниковым методом / Г.А.Шануров, В.З.Остроумов, В.И.Епишин // Научно-технический журнал по геодезии, картографии и навигации “Геопрофи”. – 2004 г. – № 4. – С. 11–17.
6. Маркович К.И. Анализ получения нормальных высот точек земной поверхности с использованием данных спутниковых измерений и моделей геоида / К.И.Маркович, М.В.Макарова // Вестник Полоцкого гос. университета. – 2016. – № 8. – С. 139–142.
7. Матеріали сайту UA-EUPOS/ZAKPOS (Transcarpathian Position Determination System). – Режим доступу : <http://zakpos.zakgeo.com/ua>.
8. Пакшин М.Ю. Регіональний та глобальний моніторинг довкілля за даними системи «Сорегнікус» в частині обробки радіолокаційних вимірювань інтерферометричними методами / М.Ю.Пакшин, І.І.Ляска // Матеріали науково-практичної конференції: Аерокосмічні технології в Україні – проблеми та перспективи, Національний центр управління та випробування космічних засобів, 04 жовтня 2017 р. м. Київ. – Київ, 2017.
9. Майоров А.Н. К вопросу об установлении единой общеземной системы нормальных высот, Научно-технический сборник по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии. Физическая геодезия / А.Н.Майоров. – М. : ЦНИИГАиК, 2004. – С. 12–16.
10. Рудницкая Н.И. Создание локальной модели высот квазигеоида геометрическим методом / Н.И.Рудницкая // Земля Беларуси. – 2016. – № 1. – С. 36–41.

Надійшла до редакції 14.03.2019