

УДК 528.3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ НОВИХ ЕКСПЕДИЦІЙ НА МЕТРОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТАХ НАУКОВОГО ГЕОДЕЗИЧНОГО ПОЛІГОНА

І. ТревогоНаціональний університет “Львівська політехніка”,
Академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного**І. Цюпак**

Національний університет “Львівська політехніка”

Ключові слова: метрологічна атестація, GNSS-виміри, GNSS-нівелювання, геометричне нівелювання.

Постановка проблеми

Сучасні геодезичні прилади є високотехнологічними і їх метрологічне забезпечення, зокрема GNSS-приймачів та електронних тахеометрів, необхідно розділити на метрологічний контроль приладів і метрологічну атестацію методу визначення геометричних і динамічних параметрів за вимірними величинами. Метрологічний контроль самих приладів, зокрема GNSS-приймачів та електронних тахеометрів, також необхідно поділити відповідно на перевірку сенсора й антени та дослідження дрейфу робочої частоти лазерного віддалеміра, які повинні виконуватися окремо у спеціальних лабораторіях. Тому тестування точності вимірних величин приладів і їх відповідність до еталонних одиниць вимірювань виконується на робочих еталонах за значенням середньої квадратичної похибки визначення параметрів, наприклад, координат точки або складових вектора між пунктами, відстані між пунктами.

Дослідження точності сучасних методів (технологій GNSS) визначення вимірюваних наземними методами величин, наприклад GNSS-нівелювання, також може виконуватися на робочих еталонах.

Для метрологічної атестації робочих еталонів все частіше застосовується технологія GNSS. До таких робочих еталонів належать еталонні лінійні бази си і фундаментальні геодезичні мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Підтримання еталонної одиниці довжини для ліній та інтервалів еталонних лінійних базисів здійснюється також метрологічною атестацією. Згідно з нормативними документами [1, 2] метрологічна атестація еталонних базисів може виконуватися комплектом базисних приладів БП-1 або групою з двох-трьох фазових світловіддалемірів, які можуть забезпечити відповідну точність базису певного розряду. На наземні виміри віддалей електронними тахеометрами чи віддалемірами істотно впливає атмосфера. У тахеометрах різних фірм формули для врахування атмосферної поправки – різні, але вказано, що максимальна похибка не повинна перевищувати 2 мм. Такої точності поправки можна досягти, якщо однорідна атмосфера на всьому шляху візирного променя. Насправді ж, чим довша лінія, тим більші похибки атмосферної поправки, через зміну підстильної поверхні вздовж візирного променя, а також зміни температури. Тому якщо лінії довші, ніж 200 м [9], необхідно температуру вимірювати через певний інтервал вздовж лінії і використовувати інтегральну формулу як модель атмосферної поправки. Така методика засто-

совується на вторинному еталоні ВЕТУ 01-03-02-98 ННЦ “Інституту метрології” і забезпечує передавання еталонної одиниці довжини з похибкою 0.1 мм [5].

У сучасній геодезії широко застосовуються супутникові технології, зокрема виміри глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). За визначеними з високою точністю координатами пунктів еталонного базису можна надійно отримувати відстані між ними [10]. При цьому необхідно враховувати рух фазового центра антен GNSS супутників і приймачів. Зміщення фазового центра антен по висоті моделюється під час опрацювання GNSS вимірів [12, 13], а в плані – суттєво виключається урівнюванням вимірів за тривалих сесій спостережень.

Метрологічна атестація фундаментальної геодезичної мережі здійснюється 3–5-добовими кампаніями GNSS-спостережень. Метрологічна атестація GPS/GNSS-приймачів потрібна, щоб перевірити можливість збереження ними масштабу геодезичної мережі [11], точності утримання чи передавання орієнтації мережі у планових координатах і, особливо, у просторовій системі координат. Також важливо знати, чи досягається за GNSS-вимірами точність визначення перевищення між пунктами або висоти пункту відносно певної рівневої поверхні, де складником є величина, отримувана із GNSS-нівелювання.

Постановка завдання

У цій роботі на основі експериментальних даних, отриманих у двох експедиціях на еталонному лінійному базисі, необхідно:

- застосувати розроблений метод [6] визначення відстаней еталонного лінійного базису технологією GNSS і оцінити їх похибки;
- оцінити похибки визначення перевищень між пунктами, отримані з опрацювання GNSS-вимірів, і порівняти їх з перевищеннями, отриманими з геометричного нівелювання за програмою другого класу;
- оцінити похибки GNSS-нівелювання у пунктах лінійного базису.

Виклад основного матеріалу

Завдання геодезичної метрології, які повинні вирішуватися на еталонних лінійних базисах і фундаментальних геодезичних мережах, такі:

- атестація і перевірка GNSS-приймачів та віддалемірних приладів;
- виконання експериментальних досліджень методів метрологічного контролю геодезичних приладів і технологій вимірювань;
- дослідження точності GNSS-нівелювання;
- вивчення припливних змін земної поверхні в локальному регіоні;
- дослідження точності моніторингу геодинамічних змін земної поверхні.

Оцінені похибки визначених ліній та інтервалів як вимірів, – менші за 1 мм (макс. 0,82 мм).

Результати GNSS-нівелювання. Просторові місцеположення пунктів, визначені технологією GPS/GNSS, переобчислюються у геодезичні координати – геодезичні широту B , довготу L і геодезичну висоту H відносно геоцентричного еліпсоїда WGS-84 або еліпсоїда Красовського, якщо задано параметри трансформації. Оскільки на еталонному лінійному базисі здійснено геометричне нівелювання за програмою другого класу, то можемо оцінити точність визначення висот пунктів або перевищень між пунктами базису.

Це також важливо і для забезпечення єдності еталонних одиниць вимірювань у перевищеннях, визначених геометричним нівелюванням і технологією GPS/GNSS.

Для контролю точності обчислення перевищень технологією GNSS виконано порівняння перевищень між пунктами геодезичного базису і такими самими перевищеннями, отриманими з геометричного нівелювання за програмою другого класу. Виявилось, що похибки обчислення перевищень за GNSS-спостереженнями (сесія спостережень – 6 год) такі: мінімальна – 10 мм, максимальна 8 мм, СКП 5 мм. Довося сесія спостережень дає дещо кращий результат: мінімальне відхилення – 8 мм, максимальне 7 мм, СКП 5 мм. Обчислено також висоти квазігеоїда відносно еліпсоїда WGS-84.

Важливо також враховувати, що геодезичні висоти H вимірюються по нормалі до еліпсоїда, а ортометричні h – по силевій лінії сили ваги (тяжіння). Різниця між ортометричними і нормальними висотами якщо висоти пунктів близько 300 м, не перевищують 0,1 мм [7].

Для дослідження точності відновлення поверхні квазігеоїда висоти квазігеоїда ζ відносно еліпсоїда WGS-84 апроксимовано двома функціями другого степеня: 1) квадратним поліномом як функцією $f(s)$ однієї змінної – відстані s від референсного пункту, відносно якого визначено координати пунктів за спостереженнями GPS/GNSS (пункти лінійного базису розташовані у створі); 2) поліномом другого степеня як функцією $f(B,L)$ двох змінних – широти B і довготи L . Результати апроксимації наведено у табл. 2.

Апроксимацію виконано також і за мінімальною кількістю вихідних пунктів, якщо відомі з геометричного нівелювання висоти крайніх пунктів базису і ще двох-трьох пунктів, що необхідно для апроксимації рівневої поверхні на цій території методом найменших квадратів. Максимальна різниця між залишковими відхиленнями, отриманими після апроксимації висот квазігеоїда за усіма пунктами і за мінімально необхідною кількістю певних пунктів, досягає 1–2 мм. Звідси, маючи висоти кількох пунктів, визначені з геометричного нівелювання, а решти тільки з опрацювання GNSS-вимірів, можна обчислювати нормальні або ортометричні висоти з похибками близько 1 см.

Відомо [4], що рівневу поверхню геоїда чи квазігеоїда можна визначати за допомогою параметрів моделі гравітаційного поля Землі. Найкращими моделями сьогодні є модель EGM96 і, особливо, EGM2008. Зазначені моделі часто застосовують для обчислення висот квазігеоїда ζ й отримання ортометричних або нормальних висот, що описано в роботах багатьох авторів, зокрема в [8, 14].

В наших дослідженнях, використовуючи гравітаційні моделі EGM2008 і EGM96, ми обчислили ортометричні h_{EGM08} і h_{EGM96} (або нормальні) висоти пунктів з GNSS-нівелювання і порівняли з висотами, отриманими з геометричного нівелювання h_L . Різниця між цими висотами пунктів дає похибку GNSS-нівелювання, або похибку представлення поверхні квазігеоїда відповідною гравітаційною моделлю у певному регіоні. З метою метрологічних досліджень важливо оцінити похибки обчислення перевищень за геодезичними висотами пунктів ($dH_i = H_i - H_0$), отриманими з GNSS-вимірів, і ортометричними ($dh_i^{ort} = h_i^{ort} - h_0^{ort}$). Похибки обчислено відносно перевищень, визначених з геометричного нівелювання dh_i^{nie} . Результати досліджень похибок GNSS-нівелювання наводимо у табл. 3 і табл. 4.

Таблиця 2

Залишкові відхилення після апроксимацій

Пункти	$f(s)$	$f(B,L)$
T1	0,000	0,000
T2	0,003	0,002
T3	-0,010	-0,011
T9	0,004	0,003
T14	0,001	0,000
T15	0,003	0,003
T16	0,003	0,003
T17	-0,006	-0,004
T21	0,003	0,005
T20	0,000	-0,002
m_{approx}	0,0053	0,0057

Таблиця 3

Похибки GNSS-нівелювання, м
(геоїд: модель EGM2008, еліпсоїд Красовського)

	$h_{EGM08} - h_i^{nie}$	$dH_i - dh_i^{nie}$	$dh_i^{ort} - dh_i^{nie}$
T1	-0,130	-0,007	-0,019
T2	-0,131	-0,008	-0,020
T3	-0,118	0,004	-0,007
T9	-0,132	-0,010	-0,021
T14	-0,128	-0,006	-0,018
T15	-0,131	-0,009	-0,021
T16	-0,130	-0,009	-0,019
T17	-0,118	0,001	-0,008
T21	-0,126	-0,009	-0,015
T20	-0,110		

Таблиця 4

Похибки GNSS-нівелювання, м
(геоїд: модель EGM96, еліпсоїд Красовського)

	$h_{EGM96} - h_i^{nie}$	$dH_i - dh_i^{nie}$	$dh_i^{ort} - dh_i^{nie}$
T1	-0,512	-0,007	-0,019
T2	-0,513	-0,008	-0,020
T3	-0,501	0,004	-0,007
T9	-0,514	-0,010	-0,021
T14	-0,511	-0,006	-0,018
T15	-0,514	-0,009	-0,020
T16	-0,512	-0,009	-0,019
T17	-0,501	0,001	-0,008
T21	-0,509	-0,009	-0,015
T20	-0,494		

За результатами досліджень (табл. 3 і табл. 4) зазначимо, що похибка GNSS-нівелювання з використанням моделі EGM2008 як відновлення поверхні квазігеоїда становить 11–13 см, а з моделлю EGM96 49–51 см. Отже, модель EGM2008 у чотири рази точніше відтворює поверхню квазігеоїда, ніж модель EGM96 у районі Яворівського НПП. А похибки визначення перевищень за ортометричними (нормальними) висотами однакові для обох моделей, максимальна похибка 2,1 см, а похибка визначення перевищень з опрацювання GNSS-вимірів не перевищує 1,0 см.

Але якщо висота вихідних пунктів відома з геометричного нівелювання, то, визначаючи перевищення за GNSS-спостереженнями, можна передавати висоти пунктів з похибками близько 1 см.

Висновки

На основі отриманих результатів зробимо висновки.

1. Розроблено метод оперативного контролю довжин ліній еталонного базису на основі технології GNSS, який забезпечує точність близько 1 мм.

2. З опрацювання GNSS-вимірів отримуємо надійніші результати (особливо для ліній >500 м), ніж з вимірювань атестованими ЕТ (для базисів з вимірюванням метеоданих тільки у пункті спостереження).

3. Висоти квазігеоїда, визначені відносно еліпсоїда WGS-84, у 9,5 рази більші, ніж відносно еліпсоїда Красовського.

4. Модель EGM2008 представляє геоїд на території Яворівського полігона з похибками 11–13 см.

5. Модель EGM2008 точніша за модель EGM96 у чотири рази.

6. Перевищення між пунктами еталонного лінійного базису визначені методом GNSS з середнім квадратичним відхиленням 5 мм.

Література

1. Базисы эталонные. Методика поверки // МИ БГЕИ 40-03. – М.: ЦНИИГАиК. – 7 с.
2. ГОСТ 8.503-84 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерения длин в диапазоне 24–75000 м. – М., 1984.
3. Мазмишвили А. И. Способ наименьших квадратов. – М.: Недра, 1968. – 440 с.
4. Марченко О. М. Референці системи в геодезії: навч. посіб. / О. М. Марченко, К. Р. Третяк, Н. П. Ярема. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 216 с.
5. ННЦ “Інститут метрології”. – <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=275/>
6. Патент на корисну модель № 83876 “Спосіб визначення довжин ліній еталонного геодезичного базису”. Зареєстровано 10.10.2013 / О. І Ванчура, І. С. Тревого, І. М. Цюпак, Г. Т. Шевченко, Г. Г. Шевченко // Бюлетень № 19. – 2013.
7. Пеллінен Л. П. Высшая геодезия (Теоретическая геодезия). – М.: Недра, 1978. – 264 с.
8. Сидоренко А. И. Некоторые результаты применения модели геоида EGM2008 в сопоставлении с другими моделями / А. И. Сидоренко // Земля и недвижимость Сибири. – 2009. – № 5(19). – С. 30–34.
9. Тревого І. С. Особливості метрологічної атестації еталонних геодезичних базисів / Тревого І. С.,

Цюпак І. М. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2014. – Вип. І (27). – С. 29–33.

10. Цюпак І. М. Точність визначення координат пунктів і довжин ліній за сесіями GPS-спостережень різної тривалості / І. М. Цюпак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – Вип. І (23). – С. 57–59.
11. Шануров Г. А. О геометрической структуре метрологического полигона для аттестации геодезических приемников ГНСС / Г. А. Шануров // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 62–64.
12. Dawidowicz K. Antenna phase center variations corrections in processing of GPS observations with use of commercial software / Karol Dawidowicz // Technical Sciences. – № 13, Y 2010. – P. 120–132.
13. Góral W. Obliczanie poprawek uwzględniających wpływ charakterystyk anten w pomiarach fazowych GPS / W. Góral, J. Kudrey // Geomatics and Environmental Engineering. – 2007. – № 1(1/1). – P. 133–139.
14. Novak P. Testing EGM08 using Czech GPS/leveling data / Pavel Novak, Jaroslav Klokocnik, Jan Kostecky, Antonin Zeman.

Аналіз результатів нових експедицій на метрологічних об'єктах наукового геодезичного полігона

І. Тревого, І. Цюпак

На основі вимірів GNSS на десяти пунктах еталонного базису і геометричного нівелювання за програмою другого класу проаналізовано результати: 1) методу метрологічної атестації ліній еталонного базису технологією GNSS; 2) дослідження точності GNSS-нівелювання із застосуванням гравітаційних моделей EGM2008 і EGM96.

Анализ результатов новых экспедиций на метрологических объектах научного геодезического полигона

И. Тревого, И. Цюпак

Выполнен анализ GNSS-измерений эталонного линейного базиса. На основе измерений GNSS, выполненных на десяти пунктах эталонного базиса и геометрического нивелирования по программе второго класса анализируются результаты: 1) метода метрологической аттестации линий эталонного базиса с помощью технологии GNSS; 2) исследования точности GNSS-нивелирования с применением гравитационных моделей EGM2008 и EGM96.

Analysis of the results of the new measurements on objects of scientific metrology geodesic polygon

I. Trevoho, I. Tsyupak

Based on measurements GNSS 10 points of standard linear basis and geometric levelling (2 class) analyzes the results: 1) the method of metrological of the certification lines standard linear basis by means technology GNSS; 2) study the accuracy of GNSS-leveling using the gravity models EGM2008 and EGM96.