

УДК 528.3

ЛІНІЙНІ ЕТАЛОНИ ЯВОРІВСЬКОГО НПП ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ СУЧАСНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИЛАДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ

І. Тревого, І. Цюпак

Національний університет “Львівська політехніка”

В. Волошин, О. Рудик

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

Ключові слова: метрологічна атестація, GNSS-виміри, GNSS-нівелювання, еталонний лінійний базис, фундаментальна геодезична мережа.

Постановка проблеми

Сьогодні для вимірювання довжин ліній у геодезії, особливо великих (понад 1 км), застосовуються лазерні віддалеміри (електронні тахеометри) та GNSS-приймачі. І електронні тахеометри (ЕТ), і GNSS-технологія дають змогу отримувати довжини ліній у двох площинах: горизонтальній і вертикальній. Лінії у вертикальній площині – це висоти або перевищення відносно моделі Землі (математичної або фізичної). Виміряні довжини ліній, як і перевищення, отримані безпосередніми (наземними) і посередніми (супутниковими) методами, повинні бути порівнюваними, тобто необхідно забезпечити єдність вимірювань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з метрологічного забезпечення робочих еталонів

Перевірку точності роботи приладів, які складаються з певних блоків, доцільно здійснювати тестуванням кожного з блоків окремо [3]. Скажімо, для приймачів GPS/GNSS такими блоками є антена, сенсор і контролер. Тестувати перші два радіоблоки варто на спеціальних екзаменаторах у заводських умовах. Але точність відновлення одиниці вимірювань у вимірних або визначених величинах необхідно встановлювати у польових умовах на робочих еталонах. Відомо, що робочими еталонами є еталонні геодезичні мережі та еталонні лінійні базиси [14].

Метрологічна атестація GPS/GNSS-приймачів потрібна для перевірки можливості збереження ними масштабу геодезичної мережі [19], 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, складником якої є величина, отримувана із GNSS-нівелювання.

Ураховуючи зростання точності сучасних геодезичних приладів, необхідно забезпечити, щоб

точність еталонних лінійних базисів була кращою щонайменше утричі, порівняно із засобами вимірювальної техніки, які тестують. Метрологічну атестацію еталонного базису можна виконувати або базисним комплектом інварних дротів [2], або комплектом (з двох–трьох) відібраних високоточних фазових лазерних віддалемірів [2], або пристроєм підвищеної точності, до якого входить прецизійний лазерний віддалемір ПЛД-1М [4], або застосуванням GPS/GNSS-технології за спеціальною методикою [8]. Для вимірювання інтервалів базису можна використовувати інтерферометри [14]. Зазначимо, що сьогодні метрологічну атестацію лінійних базисів найчастіше виконують тестованими високоточними електронними тахеометрами або прецизійним віддалеміром ПЛД-1М.

Враховуючи викладене, необхідно проаналізувати результати виконаних метрологічних атестацій метрологічних об'єктів Яворівського НПП.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Визначення вимірюваних величин

Під час вимірювання ЕТ використовується польярна система координат з центром у пункті вимірювань, тобто топоцентрична, а в технології GNSS, як у супутникових методах, – геоцентрична прямокутна система координат. У першому випадку використовуються безпосередні виміри похилої віддалі та кутів (горизонтального і вертикального або зенітної відстані). А у другому – опосередковані: через спостереження супутників, положення яких визначаються попередньо із урахуванням впливу гравітаційного поля Землі та інших природних явищ [5], до яких належать і ті, що приводять до змін напрямків осей геоцентричних систем координат (інерціальної та земної) [1].

Для врахування впливу природних явищ на тіло супутника як точки в центрі його маси, у просторі та пункту на поверхні Землі застосовують відповідні моделі цих явищ. Вплив явищ на положення супутника і пункту в супутникових технологіях враховують динамічно під час прогнозування руху супутника і формування параметричних рівнянь для визначення параметрів орбіти супутника, координат пунктів. Вони взаємно узгоджуються, що і забезпечує високу

точність визначення параметрів з розв'язків системи параметричних рівнянь.

2. Метрологічна атестація еталонної фундаментальної геодезичної мережі

Для метрологічної перевірки сучасних геодезичних приладів, розроблення методики лінійних вимірювань, зокрема GNSS-нівелювання, і розроблення нових методів перевірки на Яворівському науковому геодезичному полігоні (НГП) підтримуються два метрологічні об'єкти (рис. 1): 1) фундаментальна геодезична мережа і 2) еталонний лінійний базис.

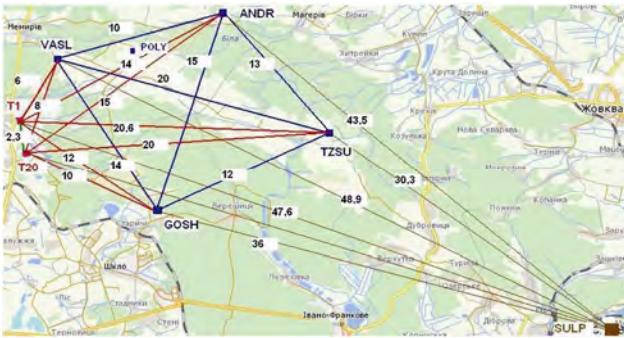


Рис. 1. Схема фундаментальної геодезичної мережі й еталонного лінійного базису

Метрологічна атестація фундаментальної геодезичної мережі здійснюється з 2002 р. з опрацювання GPS/GNSS-спостережень. Записування спостережень виконується переважно з інтервалом 10 с, що дає змогу краще розв'язувати невизначеності й виправляти стрибки фази. Спостереження, як правило, виконуються добовими сесіями, загальною тривалістю 3–5 діб. У 2005–2008 рр. атестації здійснювалися щорічно. Це дало змогу оцінити швидкості зміни координат пунктів мережі й вивести середні значення координат пунктів на початкову епоху цього періоду 2005,4767. Оцінювання показало надійне визначення цих величин [11]. Ще дві кампанії GNSS-спостережень виконано у 2010 і 2013 рр. [15].

За результатами шести кампаній GNSS-спостережень (2005–2008, 2010 і 2013 рр.) оцінка внутрішньої точності мережі не перевищує $3 \cdot 10^{-7}$ [15].

3. Розвиток мережі геометричного нівелювання

Відомо, що з опрацювання GNSS-спостережень можна визначати і висоти пунктів або, краще, перевищення між пунктами відносно математичної та фізичної моделей Землі, відповідно, геодезичні та нормальні висоти. Похибка визначення геодезичної висоти за спостереженнями GNSS може досягати 5–6 мм. У разі визначення нормальних висот пунктів за результатами GPS-нівелювання виникають додаткові похибки, спричинені моделюванням поверхні квазігеоїда [9]. Через похибку визначення поверхні квазігеоїда точність GPS-нівелювання або обчислення нормальних висот

може становити від кількох сантиметрів [20] до кількох десятків сантиметрів [21].

Для контролю похибки результатів GPS-нівелювання, які можна отримати за різними методиками, необхідно пункти еталонного лінійного базису і фундаментальної геодезичної мережі перетворити на реперні точки. Для цього висота кожного пункту повинна бути отримана з геометричного нівелювання II класу [17]. У 2014–2016 рр. розвинено мережу геометричного нівелювання II класу (рис. 2). Загальна довжина подвійних ходів нівелювання з прив'язкою до реперів I класу становить 120 км. Нівелювання здійснено кодовим нівеліром Leica DNA-03. Нев'язки у полігонах нівелювання від 2,1 до 3,3 мм.



Рис. 2. Схема мережі геометричного нівелювання II класу

Опрацьовуючи результати геометричного нівелювання, вводили поправки [9] за непаралельність прямовисних ліній і за відхилення прямовисних ліній. Для обчислення останніх необхідне вимірювання сили тяжіння у точках стояння рейок, а практично у місцях розташування реперів, які є кінцевими точками секцій нівелювання. У цих самих точках виміряно геодезичні координати (B – широта і L – довгота). Широта кожного репера необхідна для обчислення нормального значення сили тяжіння g у цих точках. У роботах науковців Львівської політехніки [6, 10] вже описано створення гравіметричної мережі і виконано гравіметричне знімання території наукового геодезичного полігона. Точність гравіметричних визначень близько 1 мГал.

4. Метрологічна атестація еталонного лінійного базису

Еталонний лінійний базис (ЕЛБ) функціонує з 2003 р. Метрологічна атестація ЕЛБ здійснюється високоточними електронними тахеометрами (ЕТ), а також технологією GNSS (див. таблицю). Першу атестацію ЕЛБ здійснили метрологи ННЦ “Інститут метрології” установкою вищої точності [4], у яку

входить прецизійний лазерний віддалемір ПЛД-1М. Лінії ЕЛБ виміряно з СКП 0,2...0,5 мм.

Метрологічна атестація ЕЛБ з 2003 до 2014 рр.

Рік атестації	Прилади
2003	ПЛД-1М, прецизійний лазерний віддалемір
2006	Trimble 5700, приймачі GPS
2006	Trimble 5601 DR-Standard, електронний тахеометр
2007	Trimble 5601 DR-Standard, електронний тахеометр
2009	Leica TCR1201+R400, електронний тахеометр
2009	Trimble 5700, приймачі GPS
2010	Trimble 5700, Leica GX1230GG, приймачі GPS/GNSS
2011	ET Leica TM 30R, електронний тахеометр
2011	ET Trimble S8, електронний тахеометр
2011	Trimble5700, Leica GX1230GG, NovAtel Nov L1L2VA, приймачі GPS/GNSS
2012	ET Leica TM 30R, електронний тахеометр
2012	ET Trimble S8, електронний тахеометр
2012	Trimble5700, Leica GX1230GG, приймачі GPS/GNSS
2013	Leica TCR1201 (02.07.2013), електронний тахеометр
2013	Trimble S8 (17.07.2013), електронний тахеометр
2013	Trimble S8 (12.12.2013), електронний тахеометр
2014	Trimble 5700, Trimble R7, Leica GX1230GG, South S82T, приймачі GPS/GNSS

Якщо за еталонні значення довжин інтервалів Яворівського ЕЛБ прийняти виміри 2003 р., то СКП вимірювання інтервалів ЕЛБ електронними тахеометрами і технологією GNSS, відповідно дорівнює 0,91 і 0,78 мм. Середнє квадратичне відхилення вимірювання інтервалів базису ET і технологією GNSS становить 0,54 мм. Отже, порядок похибок вимірювання інтервалів ЕЛБ ET (точність $\pm(1+1 \cdot 10^{-6} \cdot D)$ мм) і технологією GNSS загалом однаковий. До того ж похибки вимірювання ліній ET, що перевищують 200 м (з ура-

хуванням поправки за атмосферний вплив за вимірами метеоданих тільки у початковій точці) зростають і для лінії близько 2230 м можуть досягати 4–5 мм. За технології GNSS похибка визначення віддалі залежить, в основному, від тривалості сесії спостереження і незначно (до 0,2–0,3 мм для ліній 10–20 км) від довжини лінії.

Визначення довжин ліній ЕЛБ за методикою [8] у всіх комбінаціях за одночасними цілодобовими GNSS-спостереженнями на 10 пунктах показало, що із 45 ліній 28 мають похибки до 0,1 мм, а похибки 42 ліній – менші за 0,5 мм. Максимальна похибка дорівнює 0,82 мм.

Висновки

1. Внутрішня похибка визначення координат пунктів фундаментальної геодезичної мережі менша за $3 \cdot 10^{-7}$, що відповідає точності еталону першого розряду.

2. Довжини ліній технологією GNSS можна визначити з похибками, меншими за 1 мм.

3. За результатами метрологічних атестацій пункти ЕЛБ і фундаментальної геодезичної мережі стабільні протягом понад 10 років.

Література

1. Абалакин В. К. Основы эфемеридной астрономии / В. К. Абалакин. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
2. Базисы эталонные. Методика поверки // МИ БГЕИ 40-03 [Электронный ресурс]. – М., 2003. – Режим доступа: www.OpenGost.ru.
3. Горб А. Анализ и проблемы точности GPS-измерений в сетях опорных станций / А. Горб, А. Прокопов, Г. Сидоренко, И. Тревого // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2005. – Вип. II. – С. 26–33.
4. ГОСТ 8.503–84 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерения длин в диапазоне 24–75000 м. – М., 1984.
5. Гофманн–Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцезнаходження (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн–Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ. третього вид. під ред. Я. С. Яцківа. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.
6. Створення оптимальної опорної гравіметричної мережі в районі геодезичного наукового полігона / Двудіт П. Д., Тревого І. С., Паляниця Б. Б., Волчко П. І. / Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Ліга–Прес, 2004. – С. 17–19.
7. Друзюк В. Сучасні геодезичні прилади і технології: науково-технічне метрологічне забезпечення / В. Друзюк, А. Мазур, І. Тревого, І. Цюпак // Метрологія та прилади. – 2010. – № 3. – С. 19–26.
8. 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** // Бюллетень ДП “УІПВ”. – 2013. – № 19.
9. Пеллинен Л. П. Высшая геодезия (Теоретическая геодезия) / Л. П. Пеллинен. – М.: Недра, 1978. – 264 с.
 10. Локальне уточнення моделі гравітаційного поля в районі наукового геодезичного полігона / Тревого І. С., Марченко О. М., Дзуліт П. Д., Савчук С. Г., Волчко П. І. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Ліга-Прес, 2003. – С. 32–38.
 11. Тревого І. Аналіз зміни координат пунктів Яворівського наукового геодезичного полігона / І. Тревого, І. Цюпак, С. Савчук [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2009. – Вип. 1. – № 17. – С. 46–50.
 12. Тревого І. Еталонний геодезичний базис оригінальної конструкції / І. Тревого, О. Денисов, І. Цюпак, В. Гегер, В. Тимчук // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. – Львів: Ліга-Прес, 2010. – Вип. 1(19). – С. 43–49.
 13. Тревого І. С. Вдосконалення еталонної геодезичної мережі наукового геодезичного полігона / І. С. Тревого, І. М. Цюпак, В. М. Друзюк, В. У. Волошин // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – GPS і GIS-технології: зб. наук. пр. XV Міжнар. симпоз. (Алушта (Крим), 13–18 верес. 2010 р.). – Львів, 2010. – С. 34–36.
 14. Тревого І. С. Стан і проблеми метрологічного забезпечення лінійних вимірювань в Україні / І. С. Тревого, В. С. Купко, О. Л. Костріков, І. М. Цюпак // Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні: Матер. V Міжнар. наук.-практ. конфер. (м. Ужгород, 28–30 жовтня 2010 р.). – Ужгород, 2010. – С. 6–11.
 15. Тревого І. С. Фундаментальна геодезична мережа як метрологічне забезпечення сучасних супутникових технологій / Тревого І. С., Цюпак І. М. // Вісник геодезії та картографії. – 2014. – № 3. – С. 5–7.
 16. Тревого І. С. Метрологічна атестація еталонних базисів технологією GNSS / Тревого І. С., Цюпак І. М. // Метрологія та прилади. – 2014. – № 6. – С. 52–55.
 17. Тревого І. С. До метрологічного забезпечення GNSS-нівелювання на робочих еталонах / Тревого І. С., Цюпак І. М., Волчко П. І. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів. – 2015. – Вип. 82. – С. 29–40.
 18. Цюпак І. М. Точність визначення координат пунктів і довжин ліній за сесіями GPS-спостережень різної тривалості // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2012. – Вип. I (23). – С. 57–59.
 19. Шануров Г. А. О геометрической структуре метрологического полигона для аттестации геодезических приемников ГНСС / Г. А. Шануров // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 62–64.
 20. Novak P. Testing EGM08 using Czech GPS/leveling data / Pavel Novak, Jaroslav Klokocnik, Jan Kostecky, Antonin Zeman. – http://www.isgeoid.polimi.it/Newton/Newton_4/Report_EA4_Czech.pdf
 21. Trevoho I. S. Determination of normal height points of the standard of geodetic test field by GNSS technology / Trevoho I. S., Tsyupak I. M. // Метрологія та прилади. – 2015. – № 4. – С. 50–54.
 22. The results of the research of metrological certification of the standard baselines in horizontal and vertical planes by GNSS technology / Trevoho I. S., Tsyupak I. M., Rudyk O. V. // Techniki inventaryzacji i monitoringu obiektow inzynierskich / Redakcja naukowa Mieczyslaw Kwasniak. – Warszawa, 2015. – P. 44–51.

**Лінійні еталони Яворівського НГП
для перевірки сучасних геодезичних
приладів і технологій**
І. Тревого, І. Цюпак,
В. Волошин, О. Рудик

Проаналізовано результати метрологічної атестації спеціальної фундаментальної геодезичної мережі й еталонного лінійного базису як робочих еталонів. Підтверджується висока точність і надійність застосування технології GNSS для метрологічної атестації еталонних об'єктів.

**Линейные эталоны Яворовского НГП
для поверки современных геодезических
приборов и технологий**
И. Тревого, И. Цюпак,
В. Волошин, А. Рудик

Проанализировано результаты метрологической аттестации специальной фундаментальной геодезической сети и эталонного линейного базиса как рабочих эталонов. Подтверждается высокая точность и надежность применения технологии GNSS для метрологической аттестации эталонных объектов.

**Standard baselines of Yavoriv
scientific geodetic of test field
for verification of modern geodetic
instruments and technologies**
I. Trevoho, I. Tsyupak,
V. Voloshyn, A. Rudyk

The article analyzes the results of metrological certification of special fundamental geodetic network and the standard baselines as working standards. It confirms the high accuracy and reliability of the use of GNSS technology for metrological certification of standard objects.