



Висновки. На підставі вищевикладеного можна зробити такі висновки:

1. Необхідно вдосконалити проект модернізації гравіметричної системи України з врахуванням сучасних вимог та досвіду європейських країн.

2. Виконати абсолютні вимірювання прискорення вільного падіння сучасними балістичними гравіметрами на запроєктованих фундаментальних гравіметричних пунктах.

3. Заново створити опорні гравіметричні мережі 1, 2 й 3 класів з використанням абсолютних транспортних гравіметрів типу А10 та високоточних статичних гравіметрів LaCoste&Romberg чи відповідних їм за точністю.

4. Роботи зі створення нового гравіметричного забезпечення країни повинні виконуватися в якнайкоротші терміни геодезичними підприємствами Державного агентства земельних ресурсів України.

5. Для виконання цих робіт вкрай необхідним є забезпечення належного державного фінансування.

Література

1. Бондар, А.Л. Стан та основні напрями розвитку Державної геодезичної мережі України / А.Л. Бондар, І.М. Заєць, О.В. Кучер // Вісн. геодез. та картогр. – 2001. – № 3. – С. 17-23.

2. Двуліт, П.Д. Гравіметрична мережа України: сучасний стан і перспективи розвитку / П.Д. Двуліт // Геодина-

міка. – 2009. – № 1. – С. 44-46.

3. Двуліт, П.Д. Розвиток Державної гравіметричної мережі України як пріоритетна складова програм із проблем мінерально-сировинного забезпечення країни / П.Д. Двуліт, В.А. Енгін, О.В. Кучер // Мінеральні ресурси України. – 2010. – № 2. – С. 5-6.

4. Двуліт, П.Д. Основні напрями розвитку гравіметричної мережі України / П.Д. Двуліт, О.В. Кучер // Вісн. геодез. та картогр. – 2009. – № 6. – С. 11-13.

5. Сидоренко, Г.С. Проблеми досягнення високої точності вимірів при побудові гравіметричної мережі / Г.С. Сидоренко, О.М. Мірошніченко, О.В. Кучер, І.М. Заєць // Вісн. геодез. та картогр. – 2006. – № 5. – С. 10-16.

6. Boedecker, G. International Absolute Gravity Basestation Network (IAGBN) / G. Boedecker // Absolute Gravity Observations Data Processing Standards and Station Documentation. BGI Bull. d'Inf. – 1988. – 63. – P. 51-56.

7. Krynski, J. New gravity control in Poland – needs, the concept and the design / J. Krynski, T. Olszak, M. Barlik, P. Dykowski // Geodesy and cartography. – 2013. – Vol. 62. № 1. – P. 3-21.

8. Pachuta, A. Absolutne pomiary grawimetryczne w Polsce / A. Pachuta, M. Barlik, T. Olszak [та inne] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2009. – Вип. I. – С. 74-78.

Інтернет-джерело

9. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie / Deutsches Schwerereferenzsystem. – <http://bkg.bund.de/>

Надійшла 05.11.13

* * *

УДК 528.48

Б. Є. Монюк

ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ АНТЕН РАДІОТЕЛЕСКОПІВ

Предложена и теоретически обоснована методика исследования геометрических параметров поверхностей антенн радиотелескопов лазерным трекером (на примере РТ-22). Теоретически доказана возможность достижения высокой точности определения пространственных координат точек на поверхности антенн радиотелескопов в отличие от других геодезических методов.

Method of study of geometric parameters of surfaces of radio-telescope antennas by a laser tracker on the example of the RT-22 is proposed and theoretically grounded. Theoretically proved is ability to achieve high definition accuracy of the spatial coordinates of points on the surface of the antennas of radio-telescopes in comparison to other geodetic methods.

Постановка проблеми. Визначення геометричних параметрів поверхонь антен радіотелескопів з максимально можливою точністю необхідне для виявлення їх придатності для проведення певних астрофізичних та астрометричних експериментів, прийняття рішень про подальшу їх безпечну експлуатацію та уточнення моделі наведення радіотелескопа на небесні світила і штучні супутники Землі.

Основний метод при цьому – геодезичний. Тра-

диційні методи (високоточні вимірювання електронним тахеометром у режимі без відбивача [2, 3], лазерне сканування, прецизійне нівелювання [1]) не забезпечують достатньої точності вимірювань.

Поява сучасних високоточних приладів – лазерних трекерів відкрила нові можливості, але разом з тим це викликало необхідність удосконалення самих методів вимірювань та оброблення їх результатів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються даної проблеми. За кордоном ефективно застосовують трекер для високоточних

© Б. Є. Монюк, 2013



вимірювань. Він придатний і для визначення геометричних параметрів великої оптичної поверхні дзеркала діаметром 8,4 м, яке є одним із семи сегментів наземного велетенського телескопа "Магеллан", а також для юстирування радіоастрономічних систем [5, 6, 8].

Постановка завдання: описати теоретично методику визначення геометричних параметрів поверхонь антен радіотелескопів лазерним трекером на прикладі РТ-22, розташованого у смт Кацівелі, на самому березі Чорного моря, під горою Кішка (мал. 1).

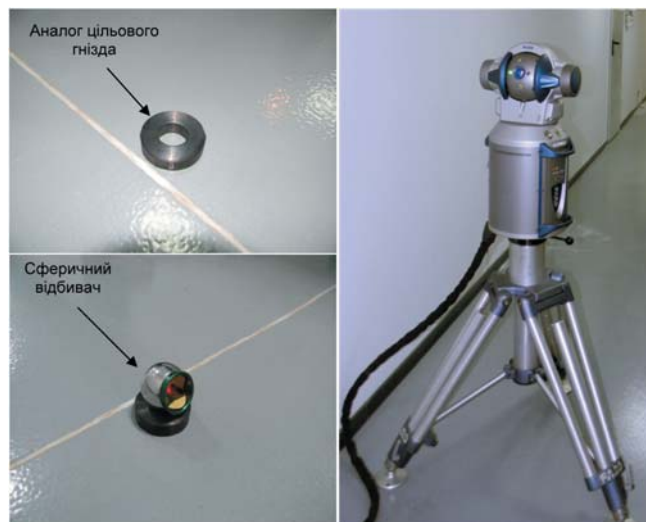
Основний зміст роботи. Діаметр антени цього радіотелескопу (22 м) дозволяє проводити спостереження в сантиметровому і міліметровому діапазонах випромінювання Сонця, зір та галактик. На території СНД він єдиний входить у мережу, що об'єднує найбільші радіотелескопи світу. Спостереження в цій мережі дають змогу вивчати структуру віддалених космічних об'єктів, тому вони є найпотужнішим засобом дослідження Всесвіту.

У 1966 р. середня квадратична похибка (СКП) виготовлення поверхні антени за допомогою прецизійного контр-шаблону становила 0,2 мм. Мається на увазі СКП відхилень реальної поверхні від апроксимуючого параболоїда обертання.



Мал. 1. Загальний вигляд радіотелескопа РТ-22

Для вирішення поставленого завдання на поверхні антени рекомендовано створити локальну інженерно-геодезичну мережу лазерним трекером, наприклад FARO ION (мал. 2), СКП вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів яким становить $(10+2,5 \cdot L(\text{м}))$ мкм, а віддалі в режимі ADM (вимірювач абсолютних віддалей) – $(8 + 0,4 \cdot L(\text{м}))$ мкм

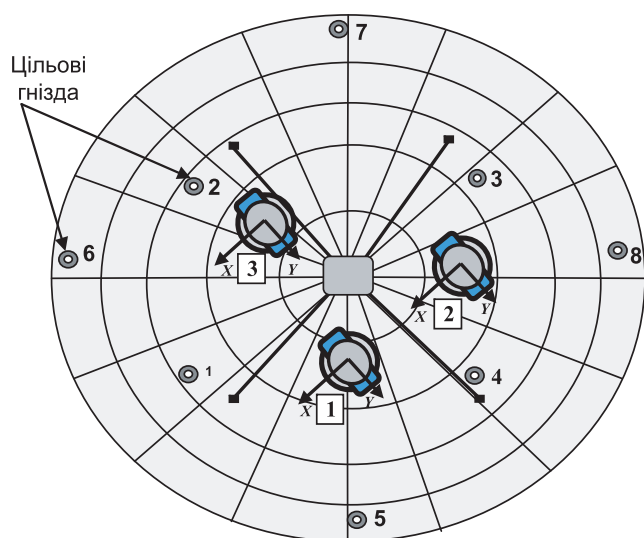


Мал. 2. Загальний вигляд лазерного трекера FARO ION і аналог цільового гнізда

[7]. Похибка вимірювання кутів, виражена в лінійній мірі, являє собою похибку в напрямку, перпендикулярному до напрямку візування. Так її легше порівнювати з похибкою вимірювання віддалі. Працюючи з формулою, за якою нормована СКП вимірювань кута, було помічено, що коли її переводити у куту міру, то вона зменшується зі збільшенням віддалі до відбивача від 1,5 до 0,6 у діапазоні віддалей від 2 до 20 м. У порівнянні з сучасними високоточними тахеометрами, СКП кутів вимірювань приблизно однакові, але СКП вимірювання віддалей трекером – у 100...1000 раз менші.

У ході метрологічної атестації та повірки двох лазерних трекерів FARO ION у лабораторії ДП "Укрметртестстандарт" було створено локальну інженерно-геодезичну мережу з 23-х пунктів, розташованих довільно в межах діапазону вимірювань приладів. Встановлено, що СКП визначення положення пунктів такої витягнутої за формою мережі для *першого трекера* у горизонтальній площині становить від 3,5 до 8,6 мкм (координата X) та від 6,7 до 57 мкм (координата Y), у вертикальній площині від 8,8 до 18,5 мкм; для *другого* відповідно від 2,9 до 3,7 мкм (координата X) та від 6,3 до 31,1 мкм (координата Y), у вертикальній площині – від 6,2 до 11,9 мкм. СКП визначення положення пунктів у горизонтальній площині значно менша за аналогічні мережі, створені за допомогою електронного тахеометра, а у вертикальній площині – високоточного нівеліра та комплекту інварних рейок. Така точність цілком задовольняє вимоги до точності визначення геометричних параметрів поверхонь антен радіотелескопів.

Опис методики. Геодезична мережа закріплюється на уявній поверхні антени радіотелескопа пунктами у вигляді кілець, спеціально виготовлених за аналогією до цільового "гнізда" для сферичного відбивача, комплектного до трекера, так, як це показано на мал. 3. Трекер встановлюють у 1-й



Мал. 3. Схема вимірювань поверхні антени радіотелескопа лазерним трекером

позиції і приводять його в робоче положення. Після цього виконують вимірювання приладом на закріплені пункти і поверхню антени на сферичний відбивач з магнітною підставкою, що входить до комплексу трекера. Поверхню антени радіотелескопа ділять на сегменти у формі трапецій. Вимірювання на кожен сегмент потрібно виконувати мінімум у 9-ти рівномірно розподілених на його поверхні точках. Визначають просторові координати мунімум 6000-7000 точок на поверхні антени в єдиній локальній системі координат.

Виконати вимірювання на точки всієї поверхні антени радіотелескопа з однієї позиції неможливо, необхідно мінімум з трьох. Перемістивши прилад у 2-гу і 3-тю позицію, потрібно виконати вимірювання на всі точки мережі та визначити просторові координати трекера методом зворотної засічки. Після успішної прив'язки трекера в системі координат 1-ї станції продовжують вимірювання на інші пункти мережі й точки поверхні антени.

Усі вимірювання здійснюють після заходу Сонця, щоб уникнути деформацій поверхні антени (сегментів) в результаті нерівномірного прогріву її прямими сонячними променями.

Після завершення вимірювань необхідно виконати вирівнювання локальної інженерно-геодезичної мережі, наприклад, за програмою АРМИГ [7]. За вихідні координати приймають координати 1-ї позиції та напрямом на найвіддаленіший пункт мережі. Це дозволить уточнити положення всіх точок на поверхні антени.

Поверхня антени радіотелескопа являє собою параболоїд. Найпростіший вигляд рівняння параболоїда має при монтажі рефлектора радіотелескопа. Рівняння параболоїда обернення, за яким обчислюється координата z дзеркала радіотелескопа, коли його оптична вісь співпадає з віссю z , а вершина параболоїда лежить на цій осі, має вигляд:

$$z_i = \frac{S_i^2}{4f_N}, \quad (1)$$

де f_N – номінальне (проектне) значення фокусної відстані параболоїда обернення, яке в РТ-22 становить 9 525 мм; S_i – відстань від осі z до точки на поверхні параболоїда з номером i .

Для виявлення відхилень реальної поверхні параболоїда від наведеного математичного рівняння така загальновідома форма представлення рівняння параболоїда не є задовільною, тому що його вісь займає у просторі невідоме положення і координати його вершини також невідомі.

У праці [3] запропоновано рівняння (вихідну функцію), що зв'язує координати точок на поверхні об'єкта параболічної форми, одержані за результатами вимірювань, та її геометричні параметри. Рівняння має такий вигляд:

$$z_i = z_0 + \frac{(x_i - x_0 - \eta_x \cdot (z_i - z_0))^2 + (y_i - y_0 - \eta_y \cdot (z_i - z_0))^2}{4f_N}, \quad (2)$$

де x_i, y_i, z_i – координати змінної точки на поверхні об'єкта параболічної форми, які визначаються з вимірювань; η_x, η_y – параметри просторової орієнтації – тангенси проєкцій кута нахилу геометричної осі параболоїда xz та yz на площини координат; x_0, y_0, z_0 – параметри просторового положення: просторові координати центра параболоїда, під яким розуміється точка перетину геометричної осі параболоїда та його поверхні.

Така математична модель має наближений характер тільки при невеликих кутах нахилу осі антени до вертикалі (до 30"). Зважаючи на те, що кут нахилу осі в ході вимірювань може досягати кількох мінут (або десятків мінут), пропонується така модель вимірювань:

$$z_i = z_0 + \frac{((x_i - x_0 - z_i \cdot \sin \beta_x)^2 \cdot \cos^2 \beta_x + (y_i - y_0 - z_i \cdot \sin \beta_y)^2 \cdot \cos^2 \beta_y)^2}{4f_N}, \quad (3)$$

де β_x, β_y – кути нахилу осі антени в проєкції на площини координат xz та yz .

Модель використано за аналогією з визначенням просторового положення та орієнтування осі циліндричного резервуара [4].

Стандартне радіальне відхилення σ_g реальної поверхні антени радіотелескопа від апроксимівної і кореляційна матриця визначуваних геометричних параметрів поверхні антени $K_{\delta r}$ обчислюються за формулами

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n g_i^2}{n-k}}; \quad K_{\delta r} = \sigma_g^2 \cdot Q, \quad (4)$$

де n – загальна кількість точок, координати яких визначено на поверхні антени трекером; k – кількість визначуваних геометричних параметрів



поверхні; \mathcal{Q} – діагональна матриця радіальних відхилень реальної поверхні антени радіотелескопа від апроксимівної; Q – матриця, зворотна до матриці нормальних рівнянь.

Це значення середнього квадратичного відхилення включає як нерівності самої поверхні (тобто похибки її виготовлення), так і (опосередковано, через похибки координат точок) похибки кутових і лінійних вимірювань трекером.

Розроблені формули реалізовані в автоматизованій системі "Radmir", призначеній для оброблення результатів визначення геометричних параметрів поверхонь параболічних антен радіотелескопів.

Висновки. Запропоновано методики вимірювань і оброблення результатів лазерним трекером за МНК визначення геометричних параметрів поверхонь антен радіотелескопів. Вирішення такої складної інженерно-геодезичної задачі із застосуванням лазерного трекера – найефективніше рішення на даний момент розвитку геодезичної техніки. Просторові координати точок на поверхні антени теоретично можна визначати з СКП 50-100 мкм, чого цілком достатньо при нормативі СКП виготовлення поверхні антени в 200 мкм.

Перспективи подальших досліджень. Методом математичного моделювання необхідно дослідити точність побудови лазерним трекером локальної інженерно-геодезичної мережі, створеної на поверхні антени радіотелескопа.

Література

1. Монин, Ю.Г. Определение упругих деформаций рефлектора радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории АН СССР / Ю.Г. Монин // Изв.

Крым. астрофиз. обсерватории. – М.: Наука, 1970. – Т. XLI-XLII. – 431 с.

2. Петров, В.В. Тахеометрическая съёмка поверхности рефлектора полноповоротной зеркальной антенны на рабочем углу места // В.В. Петров, А.С. Казаринов, Б.Л. Коган // 28-я Антенная конф. Европ. косм. агентства, 2005 г., Нордвик.

3. Самойленко, О.М. Геодезичні методи визначення геометричних параметрів динамічних об'єктів / О.М. Самойленко: автореф. дис. ... докт. техн. наук 05.24.01. – К., 2011. – 32 с.

4. Самойленко, А.Н. МПУ 331/01-2013. Метрология. Резервуары стальные цилиндрические горизонтальные и цистерны железнодорожные. Методика поверки / А.Н. Самойленко, В.В. Заец. – К.: ГП "Укрметртестстандарт", 2013. – 65 с.

5. Zobrist, T. Measurements of large optical surfaces with a laser tracker / T. Zobrist, J.H. Burge, W.B. Davison, H.M. Martin // Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation; ed. E. Atad-Ettdgui and D. Lemke, Proc. SPIE 7018 (2008).

6. Zobrist, T. Laser tracker surface measurements 8.4 m GMT primary mirror segment / T. Zobrist, J.H. Burge and H.M. Martin // In Optical Manufacturing and Testing VIII, ed. J.H. Burge, O.W. Fdhnle and R. Williamson, Proc. SPIE 7426 (2009).

Інтернет-джерела

7. Беляев В.А. Пакет прикладных программ. Автоматизированное рабочее место инженера-геодезиста (АРМИГ) / В.А. Беляев / Инструкция. – Реж. доступа: www.armig.org

8. Промышленная геодезия. – Реж. доступа: <http://prom-geo.com/services/paper>

9. FARO Technologies Inc. – Реж. доступа: www.faro.com

Надішла 04.11.13