

П. П. Король – кандидат географічних наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування і кадастру Волинського національного університету імені Лесі Українки;
М. О. Гаврисюк – студентка III курсу географічного факультету Волинського національного університету імені Лесі Українки

Застосування радіоінтерферометричного методу при виконанні високоточних робіт у геодезії

Роботу виконано на кафедрі геодезії, землевпорядкування та кадастру ВНУ ім. Лесі Українки

Розглянуто теоретико-методичні та науково-практичні аспекти застосування методу радіоінтерферометрії з наддовгими базами (РНДБ-методу). Особливу увагу приділено практичним напрямкам застосування цього методу. Окремо окреслено коло питань, що можуть вирішуватися за допомогою РНДБ-методу, і перспективи його використання в практиці геодезичних та землевпорядних робіт.

Ключові слова: радіоінтерферометрія з наддовгими базами, радіотелескоп, квазар, мазер, високоточні вимірювання.

Король П. П., Гаврисюк М. О. Применение радиоинтерферометрического метода при выполнении высокоточных геодезических работ. В данной работе рассматриваются теоретико-методические и научно-практические аспекты применения метода радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ-метода). Особое внимание уделяется практическим направлениям применения данного метода. Отдельно очерчен круг вопросов, может решаться с помощью РСДБ-метода и перспективы его использования в практике геодезических и землеустроительных работ.

Ключевые слова: радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, радиотелескоп, квазар, мазер, высокоточные измерения.

Korol P. P., Havrysiuk M. O. The Usage of Radiointerferometric Method Under the Execution of Highly Accurate Geodesic Tasks. Theoretical-methodical and scientific-practical aspects of the usage of radiointerferometric method with overlong bases (ROLB-method) are studied in this paper. Special attention is paid to practical directions of the usage of this method. The range of questions that can be solved with the help of ROLB-method and the prospects of its usage in the practice of geodesic and land managing tasks are separated.

Key words: radiointerferometrics with overlong bases, radiotelescope, quasar, maser, highly accurate measurements.

Постановка наукової проблеми та її значення. У XIX ст. розпочалось ктивне вивчення космічних об'єктів в інфрачервоному спектрі електромагнітного випромінювання, а в 30-х роках XX ст. виникла нова галузь астрономії – радіоастрономія, справжній розвиток якої розпочався після Другої світової війни. Значна довжина радіохвиль створює чимало серйозних перешкод для розвитку цієї галузі й передбачає використання телескопів із високою роздільною здатністю. Роздільна здатність телескопа залежить від співвідношення довжини хвилі та його апертури. Для отримання потрібної роздільної здатності, що релевантна роздільній здатності оптичного телескопа в режимі роботи з довжинами хвиль порядку 5000 ангстрем ($5 \cdot 10^{-7}$ м), радіоантена, яка працює на довжинах хвиль порядку 1 м, повинна мати в мільйон разів більші розміри.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що радіосигнали від декількох невеликих антен, що рознесені на значні відстані, можуть синтезувати сигнал із роздільною здатністю, що еквівалентна роздільній здатності однієї антени з великою апертурою. При цьому ефективна апертура телескопа співвідносна до максимальної відстані між антенами. Метод синтезування зображення, що ґрунтується на інтерференції радіохвиль, одержав назву радіоінтерферометрії з наддовгими базами (РНДБ).

До цього часу радіоінтерферометрія з наддовгими базами є найбільш прогресивним радіоастрономічним методом, що використовується в різних галузях наукових досліджень. Радіоінтерферометричні системи створюються для отримання більш високого кутового дозволу. Одна з найбільших у світі повноповоротна 100-метрова антена в Ефельсберзі (Німеччина) приймає сигнал на довжинах хвиль 10 см і створює кутовий дозвіл 10–3 радіан. Для проведення досліджень із більш високою роздільною здатністю використовуються лише радіоінтерферометричні системи. Класичний радіоінтерферометр будується за принципом об'єднання двох або більше повноповоротних антен з ідентичними прийомними пристроями й лініями зв'язку. Найбільший

радіоінтерферометр такого типу – MERLIN, що розміщений в Англії, забезпечує максимальну довжину бази 217 км, об'єднує шість антен діаметром від 25 м до 76 м, працює в діапазоні частот від 151 МГц до 24 ГГц і забезпечує кутовий дозвіл від 0,01" до 1" залежно від використаного діапазону довжин хвиль.

Подальше збільшення роздільної здатності радіастрономічних систем можливо лише за рахунок використання методу радіоінтерферометрії з наддовгими базами (РНДБ) [1].

Аналіз останніх досліджень із цієї проблеми. У 1938 р. радянські радіофізики Л. І. Мандельштам і М. Д. Папалексі розробили радіоінтерференційний метод прецизійного вимірювання відстаней, що сьогодні широко застосовується в геодезії та інших прикладних науках [3].

У 60-х роках ХХ ст. метод РНДБ отримав практичну реалізацію, зокрема в 1965 р. М. С. Кардашов, Л. І. Матвієнко й Г. Б. Шоломицький удосконалили теоретичну базу та запропонували метод радіоінтерференційних спостережень на незалежних антенах, що розміщені на міжконтинентальних відстанях [2]. Реалізація цього методу забезпечила отримання значного обсягу даних, що використовуються для дослідження радіоґалактик, квазарів і джерел мазерного випромінювання. Розробка радіоінтерференційних методів дала змогу перейти до дослідження твердої поверхні Венери. Метод радіоінтерферометрії з наддовгою базою зробив можливим здійснення вимірювання релятивістського викривлення траєкторій поширення радіохвиль гравітаційним полем Сонця [4].

Мета й завдання дослідження. У роботі розглянуто основоположні засади радіоінтерферометричних досліджень із застосуванням радіоінтерферометрів із наддовгими базами, що використовуються під час проведення високоточних геодезичних вимірювань. Основним завданням дослідження є обґрунтування доцільності, актуальності та перспективних напрямів застосування РНДБ-методу для розв'язання різноманітних прикладних, зокрема геодезичних задач.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження. Метод РНДБ використовується для вимірювання надвеликих відстаней (до тисяч кілометрів) і в поєднанні з лазерною супутниковою альтиметрією є основним методом побудови глобальних геодезичних мереж. На відміну від методу оптичної інтерферометрії в радіоастрономії, що передбачає використання радіотелескопів для вимірювання коротких відстаней, цей метод передбачає використання радіоінтерферометрів (PI), робота яких ґрунтується на синхронному інтегруванні роботи декількох радіотелескопів (РТ).

Радіоінтерферометр складається з декількох радіотелескопів, що розміщені на відстані декількох тисяч кілометрів і наведені на один і той самий **квазар** – квазізоряне позаґалактичне джерело з надзвичайно широким спектром шумового радіовипромінювання. Квазари розміщені на відстанях 10–100 млн світлових років від Землі, тобто практично віддалені в нескінченність, тому радіохвилі, що надходять від квазара, мають ідеально плоский фронт, а сигнали, які потрапляють на радіотелескопи, є строго паралельними. Шумові сигнали абсолютно ідентичні, однак надходять на системи радіотелескопів із певною часовою затримкою τ один відносно одного, що зумовлюється різницею ΔS відстаней від радіотелескопів до квазара. РНДБ-метод дає змогу визначити довжину вектора бази D з помилкою 2–3 см і напрям на квазар – із точністю до 0,001 за обома кутовими координатами. На сьогодні найвідомішим радіотелескопом є уведений у дію 1980 р., синхронізований РТ VLA («Very Large Array»), що встановлений у пустельній місцевості штату Нью-Мексико (США). Цей РТ складається з 27 повноповоротних 25-метрових параболічних антен, які розміщені у формі літери Y з довжиною плечей 19–21 км.

Суть РНДБ-методу полягає в такому: на двох пунктах земної поверхні, що утворюють базу радіоінтерферометра, із високою точністю визначається інтервал часу між моментами надходження однієї й тієї ж хвилі від квазара [4]. Між безпосередньо виміряною величиною часової затримки та компонентами вектора пункт–пункт (база радіоінтерферометра) існує така залежність.

$$c\tau = R'_{i_1 i_2} \cos\psi, \quad (1)$$

де c – швидкість поширення електромагнітних хвиль; τ – часова затримка; R' – вектор бази радіоінтерферометра і напрямок на квазар; $i_1 i_2$ – номери пунктів; ψ – кут між базою радіоінтерферометра й напрямком на квазар [2].

Напрямний косинус кута ψ можна представити у вигляді:

$$\cos\psi = \frac{\Delta X'_{i_1 i_2}}{R'_{i_1 i_2}} L + \frac{\Delta Y'_{i_1 i_2}}{R'_{i_1 i_2}} M + \frac{\Delta Z'_{i_1 i_2}}{R'_{i_1 i_2}} N, \quad (2)$$

де γ, δ – сферичні координати квазара в середній Гринвіцькій системі координат; L, M, N – напрямні косинуси напрямку на квазар; $\Delta X'_{i_1 i_2}, \Delta Y'_{i_1 i_2}, \Delta Z'_{i_1 i_2}$ – компоненти бази інтерферометра.

Принцип побудови вхідного сигналу такий: довжина вектора бази D складає $\Delta S / \cos\beta$, а оскільки $\Delta S = \tau v$, то $\tau = (D/v) \cos\beta$, тобто часова затримка τ ураховує довжину вектора бази D . Вона визначається на основі кореляційного методу: на радіотелескопах шумові сигнали від квазара записуються на широкосмугові магнітофони (відеомагнітофони), а тоді синтезуються на кореляторі, використовуючи зсув, що забезпечує максимум кореляційної функції K на відповідний момент $\tau = 0$. Номінальна величина часового зсуву визначає часову затримку τ . При цьому точність вимірювання затримки залежить від ширини максимуму кореляційної функції, тобто спектр записуваних сигналів визначає їх когерентність.

Унаслідок обертання Землі різниця ходу ΔS , а отже й часова затримка τ , періодично змінюються з деякою частотою, яку називають частотою інтерференції f . За вимірними величинами τ і f можна отримати різницю ходу ΔS і її зміну в часі. Величина ΔS є функцією радіус-векторів центрів антен радіотелескопів у напрямку на квазар.

Підставляючи рівняння (2) у рівняння (1), отримують основне рівняння методу радіоінтерферометрії з наддовгою базою (РНДБ):

$$c\tau = \Delta X'_{i_1 i_2} L + \Delta Y'_{i_1 i_2} M + \Delta Z'_{i_1 i_2} N. \quad (3)$$

Зауважимо, що рівняння РНДБ-методу залежно від поставлених завдань можна розв'язувати або відносно параметрів обертання Землі (координат полюса), або відносно різниць координат між кінцями бази радіоінтерферометрів [3].

Записи сигналів на радіотелескопах повинні бути приведеними до єдиної шкали часу. Для цього годинники на обох станціях синхронізуються. Місцеві незалежні стандарти частоти й часу контролюються хроностабільним атомним еталоном – водневим мазером із відносною нестабільністю $2 \cdot 10^{-14}$ с/добу. *Мазер* – це аналог лазера, що працює в радіодіапазоні на частоті хвиль $\approx 1,4$ ГГц при довжині хвилі 21 см, а нестабільність порядку $2 \cdot 10^{-14}$ с означає, що нестабільність такого «годинника» становить 0,4 с/млн р. Відмітки часу записуються на магнітофони одночасно із записом радіосигналів на обох станціях РНДБ, і саме за зсувом однойменних міток визначається затримка τ при кореляційній обробці записів.

Висновки й перспективи подальших досліджень. У перспективі отримана за допомогою РНДБ-методу картина руху мазерів дасть змогу пояснити динаміку турбулентних хмар, зокрема природу їх руху в результаті космічного вибуху.

Хоча метод радіоінтерферометрії з наддовгими базами (РНДБ-метод) розроблений передусім як інструмент для астрономічних спостережень, однак він знайшов практичне використання й під час вивчення глобальних рухів літосферних плит, обертання Землі, викривлення земної поверхні під дією приливно-відпливних сил, а також під час проведення високоточних геодезичних вимірювань і землевпорядних робіт.

Обговорюється можливість використання РНДБ-методу для визначення відносних вертикальних рухів земної кори на ділянці між двома наддовгими (10 тис. км і більше) РНДБ-станціями, зокрема досліджується взаємозалежність довжин базисних ліній до відносних вертикальних рухів станцій.

Список використаної літератури

1. Крылов В. И. Космическая геодезия : учеб. пособие / Крылов В. И. – М. : УПП «Репрография» МИИГАиК, 2002. – 175 с.
2. Куштин И. Ф. Геодезия : учеб.-практ. пособие / Куштин И. Ф. – М. : «Изд. ПРИОР», 2001. – 448 с.
3. Мацко П. В. Геотроніка та картографія / П. В. Мацко ; під ред. А. М. Голубева. – Херсон : ХДУ, 2007. – 184 с.
4. Микиша А. М. Космические методы в геодезии / Микиша А. М. – М. : Знание, 1983. – 64 с.
5. Шумаков Ф. Т. Спутниковая геодезия / Шумаков Ф. Т. – Х. : ХНАМГ, 2009. – 88 с.

Адреса для листування:

Кафедра геодезії, землевпорядкування
і кадастру, ВНУ ім. Лесі Українки,
проспект Волі, 13, м. Луцьк, 45000.

Статтю подано до редколегії
14.05.2012 р.