

ОГЛЯД МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ФАЗОВИХ ГНСС-ВИМІРЮВАНЬ

О. Біда, старший викладач

ORCID ID: 0000-0002-9320-7427

О. Бочко, к. е. н.

ORCID ID: 0000-0001-8297-2783

Львівський національний аграрний університет

<https://doi.org/10.31734/architecture2020.21.124>

Біда О., Бочко О. Огляд методів контролю фазових ГНСС-вимірювань

У статті розглянуто методи контролю фазових ГНСС-вимірювань за ефемеридами супутників і координатами пункту спостережень для виявлення втрат обчислень циклів і аномальних похибок на етапі попередньої обробки даних.

Виконано аналіз існуючих методів виявлення та коректного виключення аномальних похибок і втрат обчислень циклів, виявлено їх основні переваги та недоліки. Джерела похибок, що виникають у фазових ГНСС-вимірах, розділено на декілька груп залежно від їх походження.

Виконаний аналіз методів виявлення і виключення втрат обчислень циклів у фазових ГНСС-вимірах показав, що розроблені методи контролю фазових ГНСС-вимірювань використовують, в основному, лише вимірювальну інформацію, отриману безпосередньо в процесі збору супутникових вимірювань. Виявлення і коректне виправлення фазових відліків відіграє важливу роль у задачах координатно-часового та навігаційного забезпечення, зокрема у створенні високоточних супутникових ГНСС-мереж, синхронізації просторово рознесених годин, які входять до складу беззапитних вимірювальних станцій, які застосовуються для ефемеридно-часового та навігаційного забезпечення, в управлінні рознесеними в просторі об'єктами тощо. Методи ослаблення впливів різних джерел похибок можна розділити на дві принципово різні групи: застосування математичних моделей, які виводяться на підставі емпіричної залежності однієї величини від іншої, або створенням лінійних комбінацій між основними видами ГНСС-спостережень з метою виключення чи зменшення величини впливу. У разі, якщо якусь складову деякої моделі важко або неможливо врахувати, то тоді така складова входить у ряд оцінюваних параметрів, тим самим розширюючи вектор стану системи.

Перспективи наукових досліджень пов'язані з розширенням напрямів використання розробленої методики контролю фазових ГНСС-вимірювань для виявлення і виключення аномальних похибок і втрат обчислень циклів у кінематичних додатках.

Ключові слова: ГНСС, фазові вимірювання, похибки, точність, ефемериди.

Bida O., Bochko O. Overview of control methods of the phase GNSS measurements

The methods of control of the phase GNSS measurements by satellite ephemeris and coordinates of the observation point are considered in the article to detect the loss of calculation of cycles and anomalous errors at the stage of preliminary data processing.

The analysis of the existing methods for the detection and correct elimination of anomalous errors and losses of the calculation of cycles was carried out to identify their main advantages and disadvantages. Sources of the error occurring in the phase GNSS measurements are divided into several groups depending on their origin.

The performed analysis of the methods for detecting and eliminating cycle loss in the phase GNSS measurements showed that the developed methods for controlling the phase GNSS measurements use, in the main, only measurement information obtained directly in the process of collecting satellite measurements. The detection and appropriate correction of the phase readings plays an important role in the tasks of coordinate-time and navigation support, in particular, in the creation of high-precise satellite GNSS networks, synchronization of space-spread hours, which are part of the unpowered measuring stations used for ephemeral-temporal and temporal support, in managing space-spread objects, etc. The methods of mitigation of the effects of different sources of error can be divided into two fundamentally different groups: the use of mathematical models derived from the empirical dependence of one quantity on another, or the creation of linear combinations between the main types of GNSS observations to exclude or reduce the effect magnitude. If a component of a model is difficult or impossible to take into account, then such a component is included in a number of evaluated parameters, thereby expanding the state vector of the system.

The prospects for scientific research are related to the expansion of the directions of use of the developed method of control of the phase GNSS measurements for detection and elimination of anomalous errors and losses of the account of cycles in kinematic applications.

Key words: GNSS, phase measurements, errors, accuracy, ephemeris.

Постановка проблеми. Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) ГЛОНАСС і GPS активно використовують для розв'язання комплексу задач координатно-часового та навігаційного забезпечення. На сьогодні ГНСС-технології застосовують у геодезії для створення високоточних державних геодезичних мереж, мереж спеціального призначення на геодинамічних полігонах, мереж активних базових станцій, а також у задачах глобальної геотектоніки.

Висока точність визначення координат неможлива без виявлення й усунення втрат обчислень циклів і дозволу цілочисельної неоднозначності у фазових ГНСС-вимірах. Виявлення, виключення аномальних похибок і втрат обчислень циклів є актуальним завданням і вимагає розробки методики контролю фазових ГНСС-вимірювань.

Актуальність теми дослідження підтверджується тим, що одним із напрямів модернізації ГНСС-приймачів є оснащення їх високостабільними малогабаритними атомними стандартами частоти, які вже активно використовують у сучасному телекомунікаційному обладнанні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Важливий внесок у розвиток методик контролю фазових ГНСС-вимірювань зробили такі зарубіжні та вітчизняні вчені: В. Remondi, G. Blewitt, S. B. Bisnath, P. A. Gross, A. Leick, R. Langley, P. Teunissen, B. Hofmann-Wellenhof, W. Melbourne, G. Wübbena, C. Rizos, А. Жаліло, А. Карпик, М. Кешин, К. Антонович, В. Щербаков, С. Савчук. Для розв'язання цілочисельної неоднозначності вже запропоновано понад два десятки методів, проте виявлення, а головне, коректне відновлення відліків безперервної несучої фази все ще залишається не вирішеною проблемою, що призводить до зниження точності і збільшення тривалості спостережень.

Постановка завдання. Метою нашого дослідження є огляд методів контролю фазових ГНСС-вимірювань за ефемеридами супутників і координатами пункту спостережень для виявлення втрат обчислень циклів і аномальних похибок на етапі попередньої обробки даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати аналіз існуючих методів виявлення та коректного виключення аномальних похибок і втрат обчислень циклів, виявити їх основні переваги та недоліки.

Виклад основного матеріалу. Виявлення і коректне виправлення фазових відліків відіграє важливу роль у задачах координатно-часового та

навігаційного забезпечення, зокрема у створенні високоточних супутникових ГНСС-мереж, синхронізації просторово рознесених годин, які входять до складу беззапитних вимірювальних станцій, що застосовуються для ефемеридно-часового та навігаційного забезпечення, в управлінні рознесеними в просторі об'єктами тощо.

Залежно від походження можна виділити такі джерела похибок, що виникають у фазових ГНСС-вимірах [1]:

- похибки, пов'язані зі супутником (похибка, зумовлена нестабільністю ходу годинника на супутнику, затримкою сигналу між його генерацією і передачею з антени супутника, похибки ефемеридного забезпечення, похибка положення фазового центру передавальної антени супутника);

- похибки, пов'язані з приймачем (похибка положення фазового центру антени приймача, похибка, зумовлена нестабільністю ходу годинника в приймачі, затримка сигналів у приймачі, релятивістські ефекти в годиннику приймача, шуми приймача);

- похибки, спричинені середовищем поширення сигналу (тропосферна та іоносферна затримки, багатопрохідність);

- похибки математичної моделі (некоректне розв'язання неоднозначності несучої фази, набіг фази, зумовлений зміною у взаємному орієнтуванні антен супутника і приймача, похибка в координатах спостерігача);

- немодельючі похибки (перешкоди, зумовлені лініями електропередачі (ЛЕП), дизельними двигунами, несправними прийомо-передавачами, станціями мобільного зв'язку та іншими джерелами електромагнітних полів; викиди у фазових ГНСС-вимірюваннях, зумовлені іоносферними збуреннями, різними видами інтерференції).

Методи контролю втрат обчислень циклів у фазових псевдовіддальних умовно можна розділити на три групи [4].

До першої групи належать методи, які дозволяють зменшувати ймовірність появи втрат обчислень циклів за допомогою вдосконалення апаратних частин супутникового приймача. Це відбувається, в основному, за рахунок постійної модернізації приймаючих геодезичних антен, розробки досконалих кореляторів, переходу на цифрову обробку сигналів [7].

Друга група методів використовує дані, які отримані в результаті спостережень. До них належать різні комбінації кодових і фазових псевдовіддалей, а також доплерівських зміщень частоти [3].

Методи третьої групи обчислюють поправки у вимірювання і лінійні комбінації вимірювань на основі зовнішньої інформації від різних інерцій

них навігаційних систем (акселерометри, одометри, гіроскопи тощо). На основі цієї корекції з'являється можливість пошуку втрат обчислень циклів.

У табл. показано основні джерела похибок, що виникають у фазових ГНСС-вимірах, та способи їх зменшення.

Таблиця

Основні джерела похибок, що виникають в фазових ГНСС-вимірах, та способи їх зменшення

Джерело похибок	Спосіб зменшення похибок
1	2
Похибка годинника приймача	а) використання приймачів з допомогою терморегуляторного генератора; б) використання приймачів з високостабільним генератором частоти (малогабаритні атомні стандарти частоти, атомні, рубідієві, цезієві або водневі стандарти частоти); в) утворення одинарних (один приймач – два супутники), подвійних або потрійних різниць.
Тропосферна затримка	а) використання різних глобальних моделей тропосферної затримки (Н. Hopfield, J. Saastamoinen, H. Black, I. Ifadis, A. Niell та ін.); б) визначення метеопараметрів (радіометри водяної пари); в) визначення вологості складової тропосферної затримки під час вимірювання; г) усереднення тропосферної затримки за допомогою багаторазових сеансів спостережень; г) побудова локальних (регіональних) моделей тропосфери з використанням мереж активних базових станцій; д) утворення одинарних і подвійних різниць; е) утворення геометрично вільної лінійної комбінації; є) використання SINEX файлів; ж) включення вологості зенітної затримки до числа визначених параметрів.
Іоносферна затримка	а) використання моделі J. Klobuchar, закладеної в навігаційному повідомленні супутників GPS; б) використання точкової, плоскої, добової або іншої моделі; в) утворення іоносферних вільних лінійних комбінацій з двох і більше несучих частот; г) побудова локальних (регіональних) моделей іоносфери з використанням мереж активних базових станцій; г) використання CODE IONEX файлів.
Багатошляховість	а) використання антен з кільцевими компенсаторами (антени типу choke-ring), мультиплекси; б) встановлення антен у місцях з відкритим радіогоризонтом; в) вибір оптимального часу спостереження з метою усереднення помилки багатошляховості; г) застосування металевого диска (groundplane), що дозволяє «відсікати» відбиті сигнали від поверхні Землі; г) використання багатоантенного приймача, що має дві, три або більше антен; д) використання елементів приведення (антену встановлюють не на самому пункті, а на пункті з відкритим радіогоризонтом і обчислюють елементи приведення); е) не спостерігати супутники з малим відсіченням за висотою.
Шуми приймача	а) цифрова обробка сигналів; б) використання вузьких і стробових кореляторів.
Набіг фази	а) утворення подвійних і потрійних різниць; б) використання моделі обліку набігу фази.
Дозвіл цілочисельної неоднозначності	а) використання методів LAMBDA, LFAST, FARA, FASF, OMEGA та ін.; б) утворення потрійних різниць.

Методи зменшення ймовірності появи втрат обчислень циклів у фазових спостереженнях. Імовірність появи втрат обчислень циклів у фазових спостереженнях може бути зменшена за рахунок правильного проектування і розміщення супутникових антен. Іншим заходом є застосу-

вання малозумних підсилювачів, які істотно знижують шуми, що виникають у приймачах. Прикладами подібних методів є Advanced Multipath Reduction, Co-Op Tracking, J-Shield та інші.

Методи виявлення втрат обчислень циклів у фазових спостереженнях з використанням вимі-

рювальної інформації апаратури користувача. До цієї групи методів входить використання всіляких лінійних комбінацій кодових і фазових псевдовіддалей, Калмановської фільтрації, застосування поліномів різних степенів, вейвлет-аналіз, імітаційне моделювання.

Для виявлення втрат обчислень циклів у 80-х роках ХХ ст. застосовували ручне редагування даних, яке полягало в обчисленні одинарних і подвійних різниць для відповідних результатів вимірювань. Метод добре застосовувати за наявності точних координат пункту. Недоліки очевидні: великий обсяг часу на обробку спостережень і слабкий контроль за великої кількості розривів у вимірах.

Метод введення нової цілочисельної неоднозначності полягав у введенні цілочисельної неоднозначності в результаті спостережень, унаслідок чого утворювався новий вектор невідомих параметрів, який вимагав адекватної оцінки. Перевагою методу є отримання розміру зсуву за фазовою частотою. Недоліки: складність обробки матриці нормальних рівнянь і виділення корисної інформації з великої кількості параметрів [1].

У деяких роботах наводиться різницевий метод для виявлення втрат обчислень циклів. У результаті багаторазових обчислень фільтруються незначні коливання фазових спостережень, дозволяючи при цьому виявляти скачки в цих вимірах [2]. Основними недоліками методу є неможливість обліку диференціального впливу іоносфери і багатощляховості, а також те, що спосіб неможливо застосовувати для кінематичних спостережень.

У 1984 р. В. Remondi запропонував використовувати для обробки алгоритм фазових різниць. Будь-які великі втрати обчислень циклів легко відстежуються, оскільки вони діють локально на потрібну різницю. Розв'язування ведуть методом ітерацій доти, доки отримані нев'язки не будуть сходиться. виправлення втрат обчислень циклів повторюється до приведення неоднозначності подвійних різниць до допустимого значення. Основним недоліком є підвищений рівень шуму [5].

Методи виявлення втрат обчислень циклів у фазових спостереженнях з використанням зовнішньої виміральної інформації. У цьому методі для виявлення, оцінки та відновлення фазових спостережень використовують інерціальні навігаційні системи або інші види зовнішньої інформації. Дослідник О. Colombo провів експерименти з мобільним ГНСС-приймачем і мікроелектромеханічною системою, встановленими у фургоні автомобіля, на довгих базових лініях із залученням даних базової станції. Внаслідок порівняння обчислень, отриманих за допомогою супутникової апаратури і вимірювань блоку інерціальних

систем, роблять висновок про наявність втрат обчислень циклів у фазових даних [6].

У роботі [4] запропонований алгоритм пошуку втрат обчислень циклів на основі положень GPS-антени і даних, отриманих від інерціальних навігаційних систем, із застосуванням тесту об'єднаної суми для невеликих змін у середніх або стандартних відхиленнях вимірювань. У роботі запропонований метод пошуку втрат обчислень циклів на основі комплексування недорогих акселерометрів і методу точного точкового позиціонування (PPP).

Для обчислення зсувів на коротких базових лініях G. Roberts використовував акселерометри, змонтовані на мостових балках. Відхилення даних акселерометрів віддалялися на основі того, що міст є нерухомим. Скориговані дані акселерометра об'єднували з вимірами, отриманими за допомогою супутникової апаратури, для пошуку втрат обчислень циклів у фазових даних.

Висновки. Виконаний аналіз методів виявлення і виключення втрат обчислень циклів у фазових ГНСС-вимірах показав, що розроблені методи контролю фазових ГНСС-вимірювань використовують, в основному, лише вимірвальну інформацію, отриману безпосередньо в процесі збору супутникових вимірювань.

Перспективи наукових досліджень пов'язані з розширенням напрямів використання розробленої методики контролю фазових ГНСС-вимірювань для виявлення і виключення аномальних похибок і втрат обчислень циклів у кінематичних додатках.

Бібліографічний список

1. Инженерная геодезия / Е. Б. Ключин и др.; под ред. Д. Ш. Михалева. 10-е изд., перераб. и дополн. Москва: Академия, 2010. 496 с.
2. Кешин М. О. Определение неоднозначностей фаз и исправление ошибок потери цикла в фазовых измерениях спутниковых GPS. Санкт-Петербург: ИТА РАН, 1999. № 67. 39 с. (Препринт / ИТА РАН 1999).
3. Косарев Н. С. Восстановление фазы несущей: проблемы и пути решения. *Вестник СГГА*. 2012. Вып. 1 (17). С. 53-60.
4. Cohinour G. C. Global Positioning System Clock and Orbit Statistics and Precise Point Positioning. 2009. 149 p. URL: <http://etd.ohiolink.edu/view.cgi/Cohinour%20John%20C.pdf?Ohiou1249043829> (Last accessed: 04.11.2019).
5. Cross P. A., Ahmad N. Field validation of GPS phase measurements. *Proc. Int. GPS-Workshop*, Darmstadt, Apr. 10-13, 1988. Berlin etc., 1988. P. 349-360.
6. Lee H. K., Wang J. L., Rizos C. Effective cycle slip detection and identification for high precision GPS/INS integrated systems. *J. of Navigation*. 2003. Vol. 56. P. 475-486.
7. Seeber G. *Satellite Geodesy*. 2-nd ed. Berlin; New York: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

Стаття надійшла 06.11.2019