

Пленарне засідання

УДК 528.2: 519.27

Двуліт Петро Дмитрович, д.т.н., професор, **Сосонка Ірина Іванівна**, аспірантка (Національний університет «Львівська політехніка», Інститут геодезії, Львів, Україна), dvupet@ukr.net, iryna.i.sosonka@lpnu.ua

НЕКЛАСИЧНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПОХИБОК ПРОСТОРОВИХ КООРДИНАТ GNSS-ВИМІРІВ

Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS) – це сучасний термін, який використовується для опису різних супутникових навігаційних систем, таких як GPS, GLONASS, Beidou та Galileo. Ще у кінці XX ст. глобальна система позиціонування (GPS) з небувалою на той час точністю надала значний внесок у навігацію, позиціонування та наукові питання, пов'язані з точним розташуванням на поверхні Землі. З допомогою GPS, і, частково, GLONASS було успішно досліджено ряд наукових питань наук про Землю, включаючи встановлення високоточної міжнародної земної системи відліку (ITRF), обертання Землі, руху геоцентру, зміну в часі гравітаційного поля, визначення орбіт, а також дистанційного зондування атмосфери, гідрології та океанів. З розвитком наступного покоління багаточастотних і багатосистемних сузір'їв GNSS, включаючи модернізований GPS-III та GPS-III США, оновлений російський GLONASS, навігаційну систему Galileo Європейського Союзу та китайську систему Beidou, реалізуються додаткові сфери та можливості у дослідженні системи Землі за допомогою GNSS [1].

У загальному випадку для високоточного визначення координат необхідно використовувати GNSS-вимірювання, отримані в результаті оцінки затримки часу поширення навігаційного сигналу по фазі несучих коливань, які є результатом вимірів поточних навігаційних параметрів – кодової та фазової псевдовідстані.

Основні похибки GNSS-вимірювань пов'язані із:

- розходженням шкал часу між приймачем сигналів користувача та конкретної GNSS;
- розходженням шкал часу між конкретним навігаційним супутником та його навігаційною системою;
- затримка розповсюдження в іоносфері радіосигналу кожного окремого супутника до приймача користувача в робочому діапазоні частот, наприклад, L1 та L2;
- затримка розповсюдження радіосигналу в тропосфері Землі;

– цілочислова неоднозначність псевдофазових вимірювань.

Достовірна точність визначення абсолютних координат положення геодезичних пунктів, що досягнута на сьогоднішній день із GNSS-спостережень, знаходиться на рівні ≤ 1 см, а швидкостей зміни координат на рівні 1–2 мм / рік [2].

Щодо статистичного аналізу на предмет необхідності врахування ряду джерел систематичних похибок, то можливим є використання широкого асортименту математичних підходів. Одним із них є неklasична теорія похибок вимірів (НТПВ). Її визначають як сучасну теорію математичного опрацювання даних часових рядів з достатньо великим обсягом вибірки (більше 500). Відомо, що при багаторазових GNSS-вимірюваннях, фундаментальні принципи класичної теорії похибок вимірювань (КТПВ) перестають бути адекватними їх істинній практиці. Отже, неklasична теорія похибок вимірів є сучасним математичним апаратом для досліджень великих масивів вимірювальної інформації. Методи НТПВ стали використовувати в астрометрії, космічних дослідженнях, геодезичних задачах і геофізичних експериментах. За останні 25 років ідеї, підходи і методи НТПВ пройшли апробацію в різних галузях досліджень: астрономічних, космічних гравіметричних, геофізичних, геодезичних та інших [3].

Методи КТПВ, які в основному розробив Ф. Гаус, базуються на двох фундаментальних принципах: а) похибки спостережень підкоряються нормальному закону і б) в результатах вимірювань відсутні джерела систематичних похибок. Проте, починаючи із другої половини ХХ ст., наступила ера великих вибірок, у яких похибки спостережень не можна було втиснути в рамки нормального закону. Видатний англійський вчений Г. Джефферіс висловив три кардинально важливі концепції НТПВ [4]:

1. Будь-яка гіпотеза або теорія, яка має малу ймовірність, повинна бути замінена на гіпотезу або теорію, яка має мати істотно більшу ймовірність, бо неможливо забезпечити високу практичну безсумнівність наших знань.

2. Нормальний закон похибок при $n > 500$ спостережень виявляє свою повну теоретичну і практичну неспроможність.

3. Похибки при числі спостережень $n > 500$ задовільно можуть бути представлені розподілом VII типу Пірсона з діагональною матрицею Фішера.

Для дослідження точності високоточних GNSS-вимірів нами пропонується використовувати результати спостережень, що проводяться на станціях глобальних і регіональних GNSS мереж. Головною особливістю вибору станцій була наявність безперервних багаторічних рядів спостережень [5].

На території України діє (діяло) 19 перманентних GNSS станцій, включених до мереж IGS/EPN. Тривалість спостереження на станціях коливається від 0.6 року (станція IZRS, Ізмаїл, Одеська обл.) до 22.5 років.

(GLSV, Голосієво). Станом на початок 2020 р. 7 станцій EPN в Україні мали категорію А (за європейською класифікацією точності) та можуть використовуватися у дослідженнях найвищої точності. Більшість із станцій класу В ще мають порівняно малу тривалість спостережень і не включені до загальноєвропейського аналізу.

На кафедрі вищої геодезії та астрономії проводиться регулярне опрацювання даних GNSS-спостережень зазначених вище станцій мереж IGS/EPN та інших референціальних станцій України. Опрацювання даних GNSS-спостережень проводиться у програмному пакеті GipsyX. Для створення часових серій координат використовується ряд додаткових команд, спочатку для об'єднання щоденних файлів в один сумарний файл, а потім його використовують для перетворення у новий файл із часовими серіями в топоцентричній системі координат.

Застосування неklasичної теорії похибок вимірювання для діагностики результатів багаторазових GNSS вимірів починають з реалізації КТПВ, щоб вияснити питання залишкових похибок – порівняння теорії з експериментом.

З цією метою для виконання дослідження нами були підібрані п'ять перманентних станцій України (SULP, GLSV, POLV, MIKL та GRAO), для яких були використані часові ряди GNSS спостережень за 2018–2020 роки. Вихідними даними для перевірки НТПВ емпіричних розподілів похибок були просторові топоцентричні координати вказаних перманентних станцій України із обсягом спостережень в межах від 582 до 722.

Нами обчислені середні значення просторових топоцентричних координат N, E, U і похибки відхилень кожного окремого значення від середнього із вибірки. Таким чином, ми отримали часові емпіричні ряди похибок визначення просторових топоцентричних координат відповідних станцій. За цими даними нами було обчислено такі основні характеристики вибірок: асиметрія та її стандарти, ексцеси та їх стандарти, а також довірчі інтервали для цих значень. Також нами було обчислено емпіричні розподіли похибок топоцентричних просторових координат станцій та знайшли з таблиць χ^2 -розподілу значення ймовірності $p(\chi^2)$, після чого було побудовано відповідні гістограми похибок.

Розглянемо тепер ці похибки з двох точок зору, одна з яких буде базуватись на принципах КТПВ, а друга – на положеннях НТПВ. З точки зору КТПВ виміри на станціях виконані задовільно: асиметрія у всіх випадках незначна, а довірчі інтервали накривають нуль лише в 4 випадках із 15 компонент просторових координат. По ексцесу, найбільш сприятлива ситуація спостерігається для станцій SULP, POLV, MIKL і найгірша для – GLSV, CRAO. Перевірка гіпотези чи підкоряються наші емпіричні ряди похибок нормальному закону за критерієм Пірсона показали такі результати:

ймовірність P того, що виміри є вибірковими із нормальної генеральної сукупності відповідно змінюються в межах від 0.001 до 0.54. А це означає, що реальні розподіли похибок вимірів не підпорядковуються нормальному закону, але узгоджуються в рамках застарілих класичних уявлень про закон розподілу похибок великого обсягу. Розподіли похибок не є ідеальними, оскільки підтверджуються дія слабких, не вилучених із вимірювань джерел систематичних похибок. цілеспрямована робота дослідників повинна бути направлена на виявлення причин, які спотворюють реальний розподіл, щоб привести його форму до ідеалу, а асиметрію та ексцес до відповідних меж закону Пірсона-Джеффріса.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
2. Bos M. S., Fernandes R. M. S., Williams S. D. P., Bastos L. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data. *J. Geod.*, 87, 351–360.
3. Джунь И. В. Неклассическая теория погрешностей измерений. Видавничий дім: «Естеро», Рівне. 2015. 168 с.
4. Dvulit, P. & Dzhun, J. (2019). Diagnostics of the high-precise ballistic measured gravity acceleration by methods of non-classical errors theory. *Геодинаміка: науковий журнал*, 1 (26), pp. 5–16.
5. Bogusz J. & Klos, A. (2016). On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series. *GPS Solutions*, 20(4), 655–664. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0478-9>.
6. Tian Y. (2011). GPS: IDL tool package for GPS position time series analysis. *GPS Solutions.*, 15(3), 299-303. DOI: 10.1007/s10291-011-0219-7