

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.075>

УДК 523.98

Я. Яцків¹, О. Хода¹, М. Іщенко¹, О. Жаліло^{1,2}

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

²Харківський Національний університет радіоелектроніки,
Проспект Науки 14, Харків, Україна, 61000
e-mail: oleg@mao.kiev.ua

Про науково-дослідницьку діяльність Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України у використанні ГНСС-технологій

Представлено поточний стан науково-дослідної діяльності Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України (ГАО) з використання ГНСС-технологій. Сьогодні ГАО підтримує перманентну ГНСС-мережу, що складається з п'яти станцій (дві станції тимчасово неактивні). Всі станції включено до мережі EPN і EPOS, станції GLSV, KHAR, UZHL також інтегровані до мережі IGS. Операційний центр ГАО також забезпечує автоматичне пересилання даних із 12 станцій, встановлених іншими українськими організаціями, що входять до складу міжнародних мереж. Дані приблизно 300 українських перманентних ГНСС-станцій зберігаються у локальному центрі даних ГАО. Локальний центр аналізу ГНСС-даних ГАО використовує програмний комплекс Bernese GNSS Software для різних видів обробки даних ГНСС-спостережень. Швидка обробка здійснюється на щоденній основі для моніторингу стабільності перманентних станцій з деяких українських RTK-мереж. Всі наявні дані спостережень з українських станцій за період з 7 грудня 1997 року по 28 січня 2017 року були оброблені за стандартами EPN в ході другої кампанії переобробки ГАО і регулярної обробки. В результаті були оцінені координати в системі відліку IGB08 і зенітні тропосферні затримки для 233 перманентних станцій (202 з них — українські станції), а також швидкості для 128 ГНСС-станцій, що мають періоди спостережень більше трьох років. Створення і розвиток локальних ГНСС-мереж, а також довгострокове заповнення баз даних високоточними координатними розв'язками і оцінками швидкостей

переміщення ГНСС-станцій дозволили провести геодинамічні дослідження на місцевому рівні. За оціненими координатами і швидкостями ГНСС-станцій були знайдені еліпси викривлення та обертання. У 2016—2019 рр. Харківський національний університет радіоелектроніки у співпраці з ГАО НАН України виконав низку досліджень з метою високоточного позиціонування та ГНСС-навігації. Створено та експериментально випробувано нові реалізації сучасних методів та алгоритмів PPP-позиціонування наземних об'єктів. Похибки добових «плаваючих» PPP-розв'язків становлять 5...8 мм (з імовірністю $P = 95\%$) для статичного режиму і 5...8 см ($P = 68\%$) для кінематичного режиму. Доведена дециметрова/сантиметрова похибка визначення координат поточних супутників на низьких навколоземних орбітах (LEO) при реалізації кінематичних «плаваючих» і фіксованих PPP-розв'язків. Була запропонована розробка високоточної багато-позиційної фазової системи траєкторних вимірювань для проведення полігонних випробувань високодинамічних літальних апаратів (ВДЛА). Оцінки середніх квадратичних помилок при визначенні параметрів руху ВДЛА лежать у межах 0.05...0.40 м для координат і 0.5...1.6 см/с для складових вектора швидкості.

Ключові слова: ГНСС, перманентні ГНСС-мережі, обробка ГНСС-даних, аналіз деформацій, PPP-позиціонування, визначення траєкторії.

ВСТУП

В даний час точне позиціонування, навігація та служба часу, що забезпечуються ГНСС-технологіями, є ключовими напрямками науки і виробництва, що швидко розвиваються. Вони є однією з тем наукових досліджень Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України (ГАО), що вивчає обертання Землі протягом багатьох років.

Починаючи з 1990-х рр. GPS-спостереження (нині ГНСС) використовувалися для потреб геодезичного позиціонування і визначення параметрів обертання Землі (ПоЗ). Тому ГАО почала упроваджувати ГНСС-технології в Україні у співпраці з науковими установами Польщі, Угорщини та Німеччини. Інформацію про цей початковий період ГНСС-діяльності у галузі геодезії та геодинамічних досліджень в Україні можна знайти в роботі [6].

Нижче ми викладемо поточний стан діяльності ГАО в цій галузі знань.

Перманентні ГНСС-станції ГАО НАН України. Перша українська перманентна ГНСС-станція GLSV (Kiev/Golosiiv) була встановлена ГАО НАН України на території обсерваторії 9 грудня 1997 року. Сьогодні перманентна ГНСС-мережа ГАО складається з п'яти станцій, встановлених у різних частинах України — Києві, Смілі, Кацивелі, Харкові, Ужгороді (рис. 1). Всі станції включено до перма-

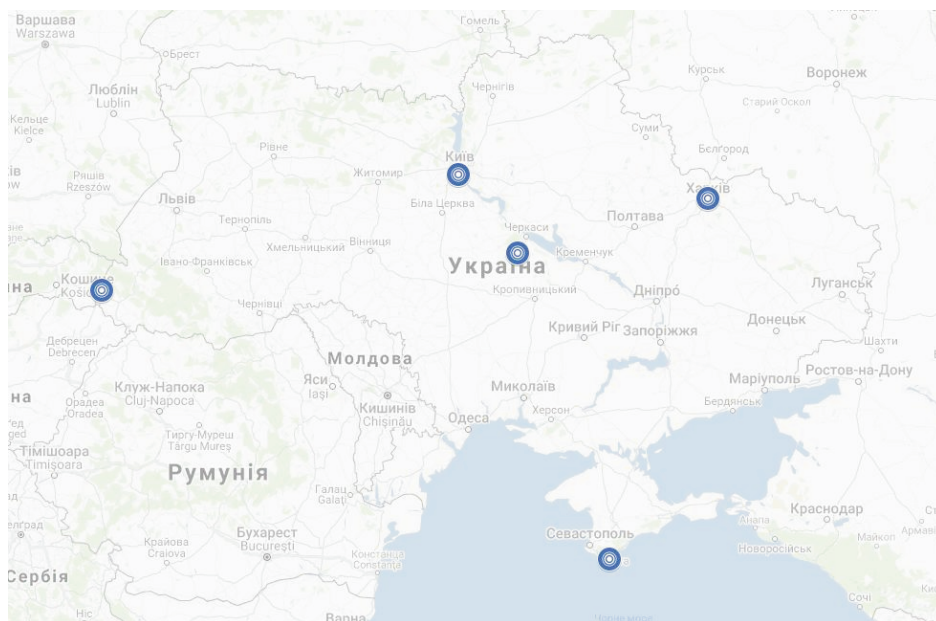


Рис. 1. Перманентні ГНСС-станції ГАО НАН України

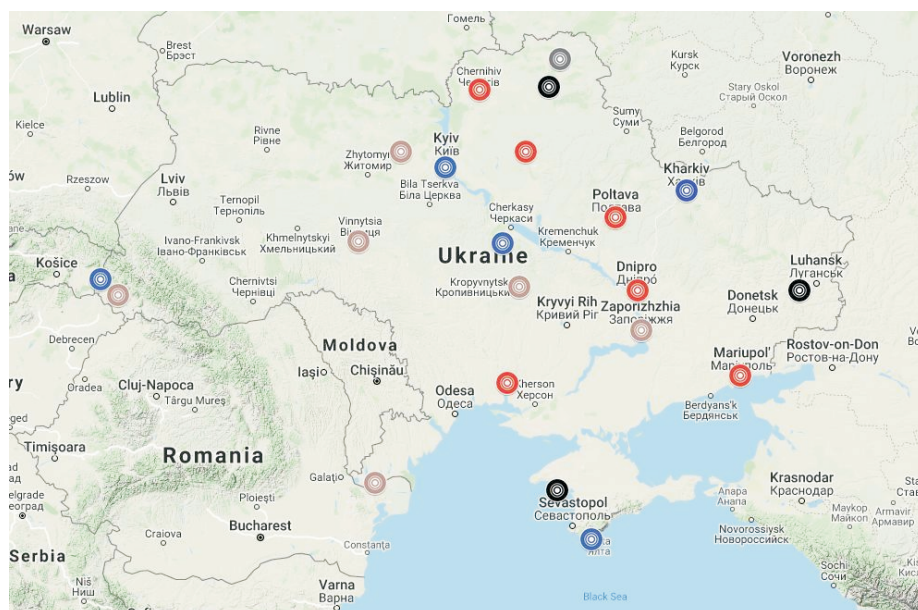


Рис. 2. Перманентні ГНСС-станції, дані яких пересилаються Операційним центром ГАО НАН України

нентної ГНСС-мережі (EPN) і до мережі Системи спостереження Європейської плити (EPOS). Станції в Києві, Харкові, Ужгороді також інтегровано до мережі Міжнародної ГНСС-служби (IGS).

Станція GLSV експлуатується зараз разом з Київським інститутом земельних відносин.

На жаль, станції в Харкові та Ужгороді зараз тимчасово неактивні через технічні проблеми.

Операційний ГНСС-центр ГАО НАН України. Операційний центр (ОЦ) ГАО забезпечує автоматичне пересилання даних не тільки зі станцій ГАО (показані синім кольором на рис. 2), але і з 12 станцій, встановлених іншими українськими організаціями, що входять до складу міжнародних мереж. Шість станцій входять до мережі системи Координатно-навігаційного забезпечення України (СКНЗУ, рис. 2, коричневий колір), ще шість є станціями приватної RTK-мережі — System.NET (рис. 2, червоний колір). Щогодини ОЦ ГАО збирає файли спостережень з цих станцій, готує їх відповідно до стандартів IGS і завантажує до міжнародних центрів даних у Німеччині, Австрії та Франції.

Локальний центр збору ГНСС-даних ГАО НАН України. Дані приблизно 300 українських перманентних ГНСС-станцій зберігаються в Локальному центрі збору ГНСС-даних ГАО. Дані з 30-секундним інтервалом спостереження від 25 українських станцій (рис. 3), а також дані з 1-секундним інтервалом від 12 українських станцій перебувають у вільному доступі на ftp-сервері обсерваторії. На рис. 4 показано наявність вільних даних з обома інтервалами.

Локальний центр аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України. Локальний центр аналізу ГНСС-даних (ЛЦА) ГАО НАН України використовує програмний комплекс «Bernese GNSS Software» для різних видів обробки даних ГНСС-спостережень — регулярної обробки з фінальними продуктами, переобробки архівних даних з репропродуктами, швидкої обробки з швидкими продуктами.

Швидка обробка здійснюється на щоденній основі для моніторингу стабільності перманентних станцій деяких українських RTK-мереж. Зараз дані з 212 українських станцій обробляються разом з даними з 35 станцій EPN. Розташування цих станцій показано на рис. 5. Результати обробки у форматі SINEX (координати станцій і зенітні тропосферні затримки на станціях) доступні на ftp-сервері обсерваторії.

Всі наявні дані спостережень з українських станцій за період з 7 грудня 1997 р. по 28 січня 2017 р. (6993 доби) були оброблені за стандартами EPN в ході другої переобробки ГАО [4] і регулярної кампанії переобробки [5]. В результаті були оцінені координати в системі відліку IGB08 і зенітні тропосферні затримки 233 перманентних станцій, 202 з них — українські станції (рис. 6).

128 станцій мають періоди спостережень понад три роки, тому вдалося оцінити швидкості для цих станцій [8]. Горизонтальну і вертикальну складові цих швидкостей представлено на рис. 7.

Геодинамічні дослідження. Створення і розвиток локальних ГНСС-мереж, а також довгострокове заповнення баз даних високоточними координатними рішеннями і оцінками швидкостей зміщення ГНСС-станцій дозволили провести геодинамічні дослідження на локальному рівні.

Основними параметрами деформації поверхні Землі є еліпси викривлення та обертання. Вісь еліпса — параметр деформації, що характеризує стиснення або видовження поверхні Землі. Параметр обертан-

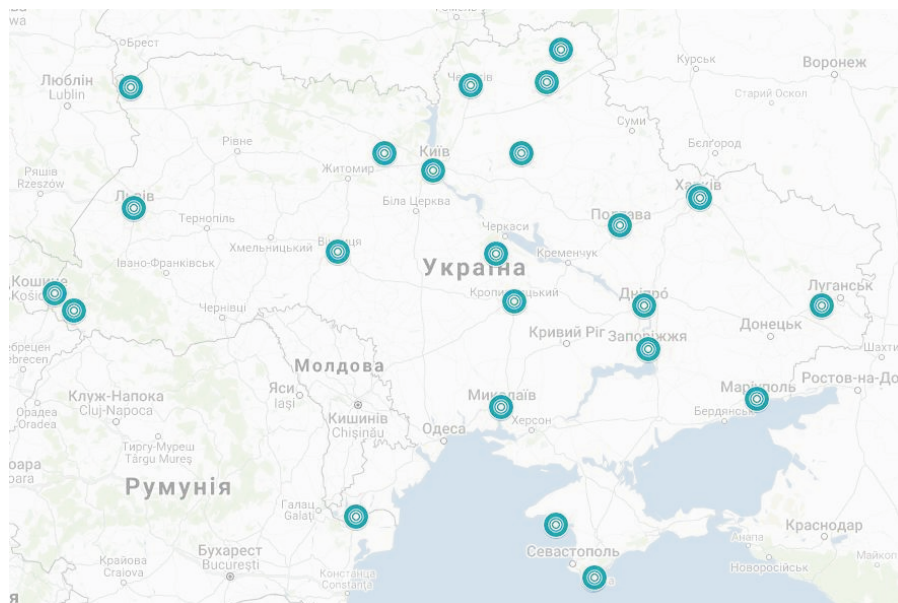


Рис. 3. Перманентні ГНСС-станції, дані яких вільно доступні на ftp-сервері ГАО НАН України

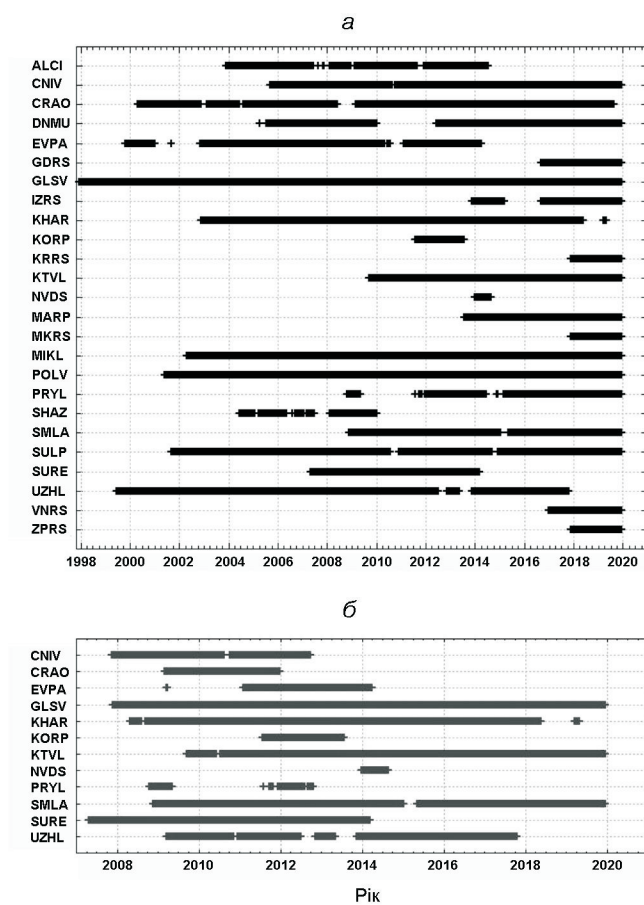


Рис. 4. Наявність даних з інтервалами спостережень 30 с (а) і 1 с (б) у вільному доступі на ftp-сервері ГАО НАН України

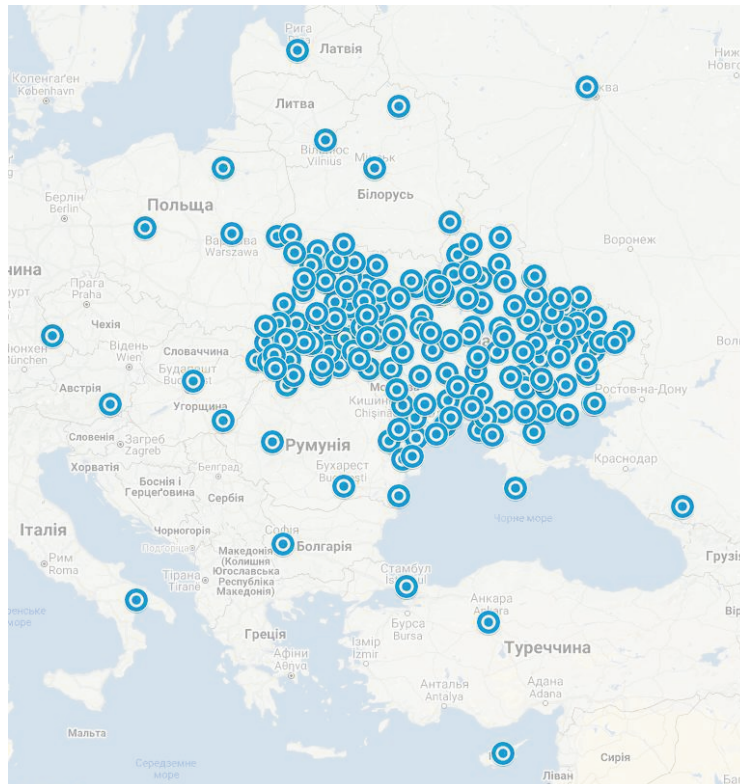


Рис. 5. Мережа ЛІА ГАО НАН України для щоденної швидкої обробки даних



Рис. 6. Мережа ЛІА ГАО НАН України для переробки та регулярної обробки

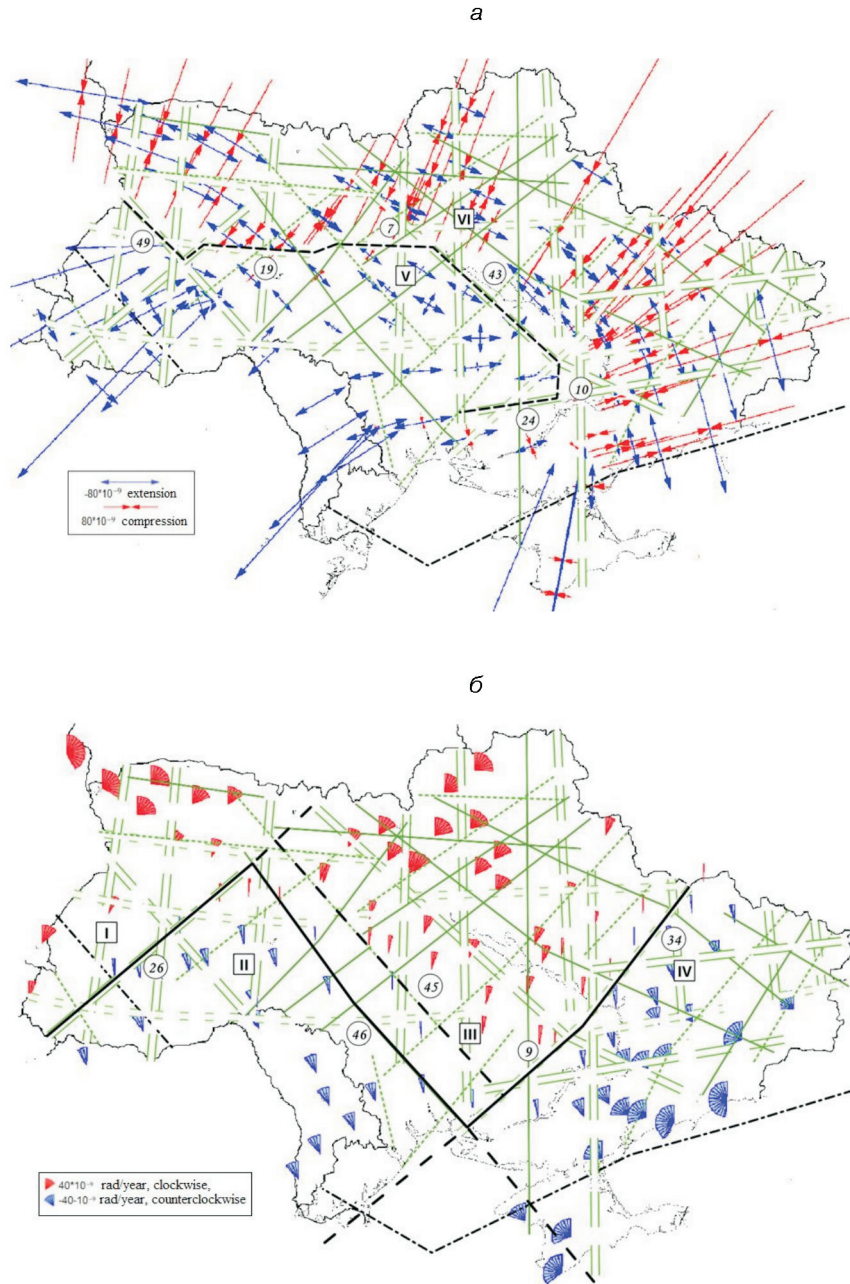


Рис. 8. Діаграми параметрів деформації земної кори, виявлені в окремих групах на основі зон лінеamentів (а — еліпси викривлення, сині стрілки — видовження, червоні — стиснення, б — обертання, червоні мітки — за годинниковою стрілкою, сині — проти годинникової стрілки). Каркасні елементи лінійних зон: 1 — трансрегіональні, 2 — регіональні 2-го порядку. Морфотипи лінеamentів: 3 — зсуви (discharges), 4 — накиди (throws). Числа в кружечках — номери лінеamentів. Суцільна лінія — межі між геоблоками переважного обертання поверхні Землі проти годинникової стрілки (II і IV блоки) і обертання за годинниковою стрілкою (I і III блоки). Штрихова лінія — межа між областями переважного видовження (V) і стиснення (VI) поверхні Землі. Штрих-пунктирна лінія — кордон Східно-Європейської платформи

геологічних і геофізичних даних, часто перевершують розломи розмірами, включаючи їх у вигляді фрагментів у мережі ліній. Лінементи кількісно численніші, ніж відомі розломи, для них характерний транзитний розподіл, який виражається в наскрізному, іноді незалежному від розташування комплексів гірських порід просторовому розташуванні.

У області V (рис. 8а) домінує видовження земної поверхні вздовж обох осей еліпса викривлення, а у області VI змішаного типу — видовження/стиснення вздовж кожної осі, які ідентифікуються по лінійних зонах північно-східного і північно-західного простягання.

Області переважного видовження поверхні Землі можна відрізнити за рядом лінеарних зон. Параметри обертання чітко простежуються у вигляді чотирьох морфоструктур (геоблоків). Це Північно-Західний (I) і Північно-Східний (II), що обертаються за годинниковою стрілкою, натомість Південно-Західний (III) і Південно-Східний (IV) — проти годинникової стрілки, які виділені лінійними зонами північно-східного і північно-західного простягання (рис. 8б) [3, 7].

Ідентифікація просторових характеристик виявлених структур стикається із певними труднощами. Можна припустити, що для горизонтальних розмірів геоблоків і зон їхнього можливого переміщення і обертання використовуються сучасні лінійні зони з ослабленими властивостями міцності порід — розломами. При цьому невідомі глибина і внутрішня структура цих блоків. Як початкове наближення можна припустити, що ця глибина може бути пов'язана з наявністю чітких меж щільності:

- осадового покриву та кристалічної основи;
- неоднорідності Конрада — поділу гранітного гнейсу і діоритно-базальтової поверхні;
- розривів Мохо — між поверхнею Землі і верхньою мантією,
- між літосферою і астеносферою, розташованою у межах України на глибинах від 50 до 220 км.

Застосування високоточного позиціонування. У 2016—2019 рр. Харківський національний університет радіоелектроніки у співпраці з ГАО НАН України провів ряд досліджень з метою високоточного ГНСС-позиціонування та навігації.

PPP-технології недиференціального (автономного) GPS-позиціонування наземних або навіколоземних об'єктів із сантиметровою точністю. У методі PPP (Precise Point Positioning) для оцінки координатних параметрів використовується допоміжна інформація (високоточні орбіти і точні значення шкали часу бортових годинників GPS-спутників, інші необхідні параметри) міжнародних (наприклад IGS) і національних центрів обробки глобальних і регіональних мереж перманентних опорних ГНСС-станцій. Створено й експериментально випробувано нові реалізації сучасних методів і алгоритмів PPP-позиціонування навіколоземних об'єктів на основі даних двочастотних спостережень GPS-сигналів [9, 10]. Отримано «плаваючі» (float) PPP-роз-

в'язки та фіксовані (fixed — з дискретним/цілочисельним розв'язанням фазової неоднозначності) PPP-розв'язки у статичному та кінематичному режимах позиціонування, проведені експериментальні дослідження характеристик (точності і збіжності/ініціалізації) цих рішень з використанням реальної вимірювальної інформації.

Створене експериментальне програмно-математичне забезпечення обробки GPS-спостережень включає такі основні блоки-модулі: попередньої обробки фазових і кодових спостережень, оцінки тропосферних, іоносферних затримок, а також фазових інструментальних затримок сигналів в трактах GPS-супутників, рішення задачі розв'язання фазової неоднозначності (РФН) недиференціальних спостережень на трасах «супутники — наземні приймачі споживачів»; визначення поточних координат споживачів.

Апостеріорна (експериментальна) оцінка точності координатно-часових визначень показала можливість досягнення сантиметрової/міліметрової точності визначення місцеположення. У випадку реалізації статичного режиму вимірювань похибки добових «плаваючих» PPP-розв'язків становлять 5...8 мм (з імовірністю $P = 95\%$). Середній час збіжності (з імовірністю $P = 95\%$) «плаваючих» PPP-розв'язків становить приблизно 30 хв для порогу сталого досягнення точності близько 5 см. У кінематичному режимі вимірювань середній час збіжності float-розв'язків до точності 5...8 см ($P = 68\%$) становить 1...2 год. Для дискретних фіксованих PPP-розв'язків середній час ініціалізації (розв'язання фазової неоднозначності) у статичному режимі вимірювань становить 15...20 хв, після чого похибки точкових оцінок координат становлять приблизно 5 см.

Визначення параметрів руху супутників на низькій орбіті Землі (LEOs) з дм/см-точністю за допомогою бортових GPS-спостережень. Для визначення параметрів руху LEOs методом PPP і оцінювання іоносферних затримок навігаційних сигналів створена і експериментально досліджена технологія обробки недиференціальних двохчастотних GPS-спостережень на борту низькоорбітальних супутників [10, 11]. В ході тестування експериментального програмного забезпечення виконана обробка бортових добових GPS-спостережень зарубіжних наукових LEOs COSMIC/FORMASAT-3 і GRACE. Отримано результати координатно-часових визначень кінематичним методом з використанням точних ефемерид і коригувань шкал часу супутників GPS, що надаються міжнародною службою IGS і французьким космічним агентством CNES.

Показано досягнення дециметрової/сантиметрової точності визначення поточних координат LEOs при реалізації кінематичних (без використання моделей руху LEOs) «плаваючих» і фіксованих PPP-розв'язків. Зокрема, експериментальні результати показали, що з використанням розроблених технологій досягається стійке визначення координат LEOs (так звані «безіоносферні» PPP-розв'язки) з похибками, що не перевищують 10...20 см ($P = 95\%$) для float-методу і 3...5 см

($P = 95\%$) для fixed-методу. Середні інтервали збіжності/ініціалізації фіксованих PPP-розв'язків становили приблизно 30 хв з імовірністю $P = 68\%$, 45...60 хв. з ймовірністю $P = 85\%$ і 90...120 хв з імовірністю, близькою до 100 %. Компоненти вектора швидкості LEOs були визначені з похибкою, яка не перевищує 1...2 мм/с ($P = 95\%$). Вищої точності визначення параметрів траєкторії LEO можна досягти лише при спільному використанні кінематичного і динамічного методів.

Високоточне визначення траєкторії високодинамічних літальних апаратів — ракет, авіаційних комплексів і космічних апаратів. Була запропонована розробка високоточної багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань (БФСТВ) для проведення полігонних випробувань високодинамічних літальних апаратів (ВДЛА). Концепція проектування і функціонування БФСТВ заснована на спільному використанні вимірювальних систем типу MISTRAM (США) і «Вега» (СРСР), а також технологій точного позиціонування з використанням ГНСС-сигналів.

В роботах [2, 9] було зроблено техніко-економічне обґрунтування реалізації системи та оцінено досяжну точність визначення траєкторій контрольованих об'єктів. Розрахункові значення середніх квадратичних похибок при визначенні параметрів руху ВДЛА лежать у межах 0.05... 0.40 м для координат і 0.5...1.6 см/с для компонентів вектора швидкості.

Розглянута система передбачає модульний принцип побудови з можливістю оптимальної реконфігурації системи під конкретні завдання визначення параметрів руху конкретних ВДЛА. Для підтвердження працездатності та точності БФСТВ створено та випробувано прототип математичних засобів і програмного забезпечення для обробки спостережень системи з використанням реальних GPS-спостережень перманентних опорних станцій України.

Дослідження показали досягнення такої точності траєкторних визначень середньоорбітальних космічних апаратів ($H = 20$ тис. км):

— у далекомірно-інтерферометричному (запитному) режимі роботи БФСТВ значення середніх квадратичних похибок (СКП) для координат лежали у межах 0.16...0.45 м, а значення СКП для складових вектора швидкості — у межах 0.7...1.0 см/с;

— в інтерферометричному (беззапитному) режимі СКП визначення поточних координат КА лежали в діапазоні 21...50 м. При цьому СКП різниць відстаней між просторово рознесеними (до 800 км) вимірювальними пунктами (ВП) БФСТВ не перевищували 7 мм, а СКП визначення розбіжностей шкал часу ВП становили 0.01 нс.

1. Верховцев В. Г. *Новітні платформні геоструктури України та динаміка їх розвитку*: Дис. ...д-ра геол. наук. Київ, Ін-т геологічних наук НАН України, 2008. 423 с.
2. Жалило А. А., Дохов А. И., Катюшина Е. В., Васильева Е. М., Яковченко А. И. Лукьянова О. А. Разработка высокоточной системы определения траекторий космических аппаратов и других высокодинамических объектов. *Прикладная*

- радиоэлектроника*. 2017. 16. № 3-4. С. 112—116.
3. Ищенко М. В., Орлюк М. И. Сравнительный анализ современной деформации и новейших движений земной поверхности на территории Украины. 2019. *Геофиз. журн.* 41. № 4. С. 161—182.
DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177381
4. Хода О. О. Оцінка координат східноєвропейських перманентних ГНСС-станцій в системі координат IGB08 для GPS-тижнів 1709–1933. *Кинематика и физика небес. тел.* 2019. 35. № 1. С. 70—80. DOI: 10.15407/kfnt2019.01.070
5. Хода О.О. Друга кампанія репроцесингу архівних спостережень в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України. *Кинематика и физика небес. тел.* 2020. 36. № 5. С. 64—81. DOI: 10.15407/kfnt2020.05.064
6. Яцків Я. С. *Наукові будні. Справа «КЧЗ»*. 2008. Київ: Академперіодика. 58 с.
7. Ishchenko M. (2018). Investigation of deformation of the earth crust on the territory of Ukraine using a GNSS observations. *Artificial Satellite*. 53(3). 117—126.
DOI: 10.2478/arsa-2018-0009
8. Khoda O. (2017). EPN Densification Project: Report of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine. Presented at the *EUREF Analysis Centres Workshop*, Brussels, Belgium, October 25 2019.
9. Zhalilo O. O., Dokhov O. I., Yakovchenko O. I. (2019). Multi-positional phase system of trajectory measurements and experimental confirmation of its accuracy using GPS-observations of the Ukrainian reference stations. *Abstracts of reports of the III scientific-practical conference «Aerospace technologies in Ukraine: problems and prospects»*. September 12—13, 2019, Kyiv, NCUVKZ. 105—106.
10. Zhalilo A., Yakovchenko A. (2016). Development of PPP-method realization for low earth orbit satellite trajectory determination using on-board GPS-observations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (EEJET)*. 5, 9(83). 33—40.
DOI: 10.15587/1729-4061.2016.81026
11. Zhalilo O. O., Yakovchenko O. I. (2019). LEOS trajectory determination using the on-board GPS-observations and PPP-technologies of their processing. *Abstracts of reports of the III scientific-practical conference «Aerospace technologies in Ukraine: problems and prospects»*. September 12—13, 2019, Kyiv, NCUVKZ. 107.

REFERENCES

1. Verkhovtsev V. (2008). New platform geostuctures of Ukraine and the dynamics of their development: Doctor's thesis. Kiev, Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine. 423 p. (in Ukrainian).
2. Zhalilo A. A., Dokhov A. I., Katiushina E. V., Vasilieva E. M., Yakovchenko A. I., Lukyanova O. A. (2017). Development of a high-precision system for determining the trajectories of spacecraft and other high-dynamic objects. *Applied Radio Electronics: Sci. J.* 16(3–4). 112—116 (In Russian).
3. Ishchenko M. V., Orlyuk M. I. (2019). Comparative analysis of modern deformation and the newest motions of the Earth surface in the territory of Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal*. 41(4). 160—180 (in Russian).
DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177381
4. Khoda O. (2019). Estimation of Coordinates of the Eastern European Permanent GNSS Stations in the IGB08 Reference Frame for GPS Weeks 1709–1933. *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. 35(1). 46—53. DOI: 10.3103/S0884591319010045
5. Khoda O. (2020). The second reprocessing campaign of historical observations in the GNSS data analysis centre of MAO NAS of Ukraine. *Kinematics Phys. Celest. Bod-*

- ies. 36(5). 243—252. DOI: 10.3103/S0884591320050050
6. Yatskiv Ya. S. (2008). Naukovi budni. Sprava «KCHZ». Kiev. Akademperiodyka. 58 p. (in Ukrainian)
 7. Ishchenko M. (2018). Investigation of deformation of the earth crust on the territory of Ukraine using a GNSS observations. *Artificial Satellite*. 53(3). 117—126. DOI: 10.2478/arsa-2018-0009
 8. Khoda O. (2017). EPN Densification Project: Report of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine. Presented at the EUREF Analysis Centres Workshop, Brussels, Belgium, October 25 2019.
 9. Zhalilo O. O., Dokhov O. I., Yakovchenko O. I. (2019). Multi-positional phase system of trajectory measurements and experimental confirmation of its accuracy using GPS-observations of the Ukrainian reference stations. *Abstracts of reports of the III scientific-practical conference «Aerospace technologies in Ukraine: problems and prospects»*. September 12—13, 2019, Kyiv, NCUVKZ. 105—106.
 10. Zhalilo A., Yakovchenko A. (2016). Development of PPP-method realization for low earth orbit satellite trajectory determination using on-board GPS-observations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (EEJET)*. 5, 9(83). 33—40. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.81026
 11. Zhalilo O. O., Yakovchenko O. I. (2019). LEOS trajectory determination using the on-board GPS-observations and PPP-technologies of their processing. *Abstracts of reports of the III scientific-practical conference «Aerospace technologies in Ukraine: problems and prospects»*. September 12—13, 2019, Kyiv, NCUVKZ. 107.

Ya. Yatskiv¹, O. Khoda¹, M. Ishchenko¹, O. Zhalilo^{1,2}

¹Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ON THE RESEARCH ACTIVITIES OF THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF THE NAS OF UKRAINE IN USING THE GNSS TECHNOLOGY

The current state of the research activities of the Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine (MAO) in using the GNSS technology is presented. Today MAO supports the permanent GNSS network that consists of five stations (two stations are temporarily inactive). All stations are included in EPN and the EPOS network, GLSV, KHAR, and UZHL stations are also integrated to the IGS network. MAO Operational Centre also provides automatic operation of 12 stations installed by the another Ukrainian organizations, that are included to the international networks. Data from approximately 300 Ukrainian permanent GNSS stations are stored in the MAO Local Data Centre. MAO Local Analysis Centre uses the Bernese GNSS Software for different types of GNSS observational data processing. The rapid processing is performed on daily basis for the monitoring of stability of the permanent stations from some Ukrainian RTK networks. All available observations data from the Ukrainian stations for the period from December 7, 1997 to January 28, 2017 were processed according EPN standards during the MAO second reprocessing campaign and regular processing. As result, the coordinates in the IGB08 reference frame and tropospheric zenith delays for 233 permanent stations (202 of them are the Ukrainian stations) as well as the velocities for the 128 stations that have observation periods more than three years were estimated. The creation and development of local GNSS networks, as well as the long-term filling of databases with high-precision coordinate solutions and estimates of the displacement speeds of GNSS stations, made it possible to conduct geodynamic

studies at the local level. Using the estimated coordinates and velocities of the GNSS stations the strain ellipses and rotation were found. In 2016–2019 Kharkiv National University of Radio Electronics in cooperation with MAO NAS of Ukraine has performed a number of studies for the purpose of high precision GNSS positioning and navigation. New implementations of modern methods and algorithms for the PPP positioning of ground objects were created and experimentally tested. The errors of the daily float PPP solutions are $\sim 5\text{--}8$ mm (with a probability of $P = 95\%$) for static mode and $\sim 5\text{--}8$ cm ($P = 68\%$) for kinematic mode. The decimeter/centimeter uncertainty of determining the current LEO satellites' coordinates when implementing the kinematic float and fixed PPP solutions is proved. The development of a high-accuracy multi-position phase system of trajectory measurements for carrying out a range field tests of highly dynamic flying vehicles (HDFV) were proposed. The estimated values of the RMS errors in the determination of the HDFV motion parameters are in the limits 0.05 to 0.40 m for coordinates and ~ 0.5 to 1.6 cm/s for the velocity vector components.

Keywords: GNSS, permanent GNSS networks, processing GNSS data, strain analysis, precise point positioning, trajectory determination

Стаття надійшла до редакції 10.12.2020

Після доопрацювання 15.12.2020

Прийнята до друку 17.12.2020