

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Литвин Михайло Олександрович

УДК 528.2.629.78+520.88

**СПІЛЬНА ОБРОБКА GPS-, РНДБ- І
ЛАЗЕРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ
ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ ЗЕМЛІ**

01.03.01 — Астрометрія і небесна механіка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук
Хо́да Олег Олександрович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
старший науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Кислюк Віталій Степанович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
головний науковий співробітник;
доктор технічних наук, професор
Савчук Степан Григорович,
Національний університет «Львівська
політехніка» МОН України, професор.

Захист відбудеться «16» квітня 2010 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою: 03680 МСП м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.
Початок засідань о 10 годині

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою: 03680 МСП м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розісланий «___» березня 2010 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.ф.-м.н

І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом стрімко розвиваються нові методи космічної геодезії, які базуються на спостереженні об'єктів близького та далекого космосу: глобальні радіонавігаційні супутникові системи (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Compass), лазерна локація штучних супутників Землі (ЛЛС), радіоінтерферометрія з наддовгими базами (РНДБ), система доплерівської орбітографії та радіолокації супутників, лазерна локація Місяця. Використання цих методів дало змогу значно підвищити точність реалізацій Земної та Небесної систем координат та оцінок параметрів обертання Землі (ПОЗ), отримати спостережний матеріал для побудови та перевірки субдобових змін геодинамічних параметрів, здійснювати вивчення та моніторинг процесів, що відбуваються у тропосфері та іоносфері Землі, вивчати рух літосферних плит тощо.

Проте кожен з сучасних методів космічної геодезії має як сильні, так і слабкі сторони. Наприклад, глобальні радіонавігаційні супутникові системи (ГНСС) є всепогодними, дозволяють надзвичайно точно оцінити координати станцій спостереження, комплект ГНСС-апаратури коштує набагато дешевше, ніж апаратура ЛЛС-станції чи радіотелескоп. ГНСС-станції, як правило, працюють в автоматичному режимі і не потребують втручання оператора. Проте для надійних оцінок ПОЗ радіонавігаційні системи потребують створення дуже густої мережі глобально розміщених станцій спостереження і не дозволяють оцінити деякі параметри (кути нутації, $UT1$). Лазерна локація супутників не потребує надто густої мережі станцій, проте вимагає сприятливих погодних умов для спостережень і також не дозволяє оцінити усі параметри обертання Землі (кути нутації, $UT1$). Радіоінтерферометрія з наддовгими базами дозволяє за одночасними спостереженнями невеликої кількості глобально розташованих станцій оцінити усі параметри обертання Землі та отримати реалізацію Небесної системи координат, проте цей метод не дозволяє отримати положення геоцентра. Крім цього, кожен з методів має свої систематичні похибки, зумовлені методикою проведення спостережень, інструментальними похибками, а також програмним забезпеченням первинної та вторинної обробки спостережень.

Систематичні похибки можна частково усунути за допомогою поєднання спостережень різних методів у єдину систему і отримання спільного розв'язку. Підставою зводити різні спостереження в єдину систему є наявність певних зв'язків між методами. Такими зв'язками є майданчики (пункти колокації), на яких знаходяться кілька інструментів з відомими відстанями між їхніми реперними точками (локальні при-

в'язки). Крім того, спільними є деякі типи оцінюваних параметрів (тропосферна зенітна затримка сигналу, деякі параметри обертання Землі тощо).

Отже, переваги сучасних методів космічної геодезії розкриваються у повній мірі за умови отримання спільних розв'язків для геодинамічних параметрів за результатами одночасних спостережень кількох методів.

Важливою проблемою при обчисленні спільних розв'язків є побудова простих і ефективних алгоритмів та їх програмних реалізацій, які б дозволили отримати спільний розв'язок з урахуванням будь-якої наявної вимірювальної інформації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені в даній роботі, виконувалися за планом науково-дослідних тем відділу космічної геодинаміки Головної астрономічної обсерваторії (ГАО) НАН України:

- держбюджетна тема «Удосконалення методів та засобів високоточних астрономо-геодезичних вимірювань, їх обробки та аналіз з метою визначення параметрів обертання Землі та систем відліку» (2007–2009 рр., номер держреєстрації 0106U011372, шифр 236-В, виконавець);
- конкурсна тема «Інформаційно-вимірювальна GNSS система та мережна VRS-технологія забезпечення геодезичних і кадастрових зйомок у Києві та Київській області» (квітень–грудень 2008 р., номер держреєстрації 0108U003130, шифр 254-Кт, виконавець);
- конкурсна тема «Наукові основи, програмно-технічне забезпечення функціонування Української постійнодіючої ГНСС-мережі для досліджень регіональної та локальної геодинаміки» (2008–2009 рр., номер держреєстрації 0108U007891, шифр 256-Кт, виконавець);
- держбюджетна тема «Високоточне і узгоджене визначення параметрів обертання Землі і Земної/Небесної систем відліку», (2007–2008 рр., номер держреєстрації 0107U003130, шифр 244-Кт, виконавець);
- держбюджетна тема «Підтримка системи визначення параметрів обертання Землі за програмою Державної служби єдиного часу і еталонних частот», (2008–2010 рр., номер держреєстрації 0108U008287, шифр 248-Кт, виконавець);
- конкурсна тема «Інформаційно-вимірювальна GNSS система та мережна VRS-технологія забезпечення геодезичних і кадастро-

вих зйомок у Закарпатті та Чернігівщині», (квітень–грудень 2007 р., номер держреєстрації 0107U006821, шифр 246-Кт, виконавець);

- держбюджетна тема «Забезпечення функціонування Українського центру визначення параметрів обертання Землі» (серпень–грудень 2006 р., номер держреєстрації 0106U010034, шифр 239-Кт, виконавець);
- конкурсна тема «Розробка методів та програмного забезпечення для побудови систем координат та визначення параметрів обертання Землі шляхом сумісної обробки радіоінтерферометричних, лазерних та радіотехнічних спостережень космічних об'єктів» (2004–2005 рр., номер держреєстрації 0101U007476, шифр 1.4.6/200-Кт, виконавець).

Мета і завдання дослідження. Мета і задачі дослідження даної роботи наступні:

- розробити методику отримання спільного розв'язку для геодинамічних параметрів за даними сучасних методів космічної геодезії,
- проаналізувати спостереження, отримані на українських пунктах колокації з метою отримати координати станцій з урахуванням нових геодезичних прив'язок,
- розробити програмне забезпечення здатне обчислювати спільний розв'язок для координат станцій та ПОЗ, використовуючи РНДБ-, ГНСС- та ЛЛС-спостереження,
- проаналізувати спостереження експерименту CONT02 з метою доведення достовірності теоретичних результатів дисертації, а також виявлення систематичних зсувів між GPS- та РНДБ-реалізаціями Земної системи координат.

Об'єкт дослідження — реалізації Небесної та Земної систем координат та параметри перетворення між ними (параметри обертання Землі).

Предмет дослідження — вплив врахування зв'язків між GPS-, ЛЛС- та РНДБ-методами на оцінки геодинамічних параметрів.

Методи дослідження. Лазерна локація штучних супутників Землі, радіонавігаційні системи, радіоінтерферометрія з наддовгими базами, метод найменших квадратів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше отримано координати реперних точок інструментів українських пунктів колокації «Київ–Голосіїв» та «Сімеїз–Кацивелі», використовуючи дані останніх геодезичних кампаній на локальних полігонах обох пунктів.
2. Розроблено простий і ефективний алгоритм, який дає змогу отримати комбінований розв’язок за умови наявності мінімальної інформації про пункти колокації або навіть у випадку, коли локальні прив’язки невідомі.
3. Розроблено програмну реалізацію алгоритму, яка дає змогу оцінювати координати пунктів спостереження та ПОЗ шляхом об’єднання розв’язків центрів обробки ГНСС-, ЛЛС- та РНДБ-спостережень.
4. Проаналізовано спостереження, отримані в рамках проекту CONT02, обчислено спільний розв’язок для координат станцій та ПОЗ за даними РНДБ- та GPS-спостережень. Показано відхилення між GPS- та РНДБ-реалізаціями Земної системи координат.

Практичне значення одержаних результатів. Координати інструментів космічної геодезії на українських пунктах колокації можуть бути використані для дослідження систематичних відхилень між ЛЛС- та ГНСС-спостереженнями, а також для вивчення локальних деформацій (особливо для пункту «Сімеїз–Кацивелі»).

Розроблені автором алгоритм та його програмна реалізація можуть бути використані в рамках Міжнародної служби обертання Землі для отримання узгоджених рядів ПОЗ та реалізацій Небесної та Земної систем координат за даними РНДБ- та ГНСС-спостережень.

Особистий внесок здобувача. П’ять робіт виконано самостійно [1–5], одна — у співавторстві [6]. В роботі [6] автор брав участь у постановці задачі, виконав обробку GPS-спостережень та отримав комбінований розв’язок для координат та швидкостей ЛЛС- та GPS-станцій еврзайського регіону.

Апробація результатів дисертації. Результати, включені в дисертацію, були представлені на Міжнародній конференції «Journées 2005: Systèmes de référence spatio-temporels» (2005 р., м. Варшава, Польща), на Науково-практичній конференції «Нові технології в геодезії та землевпорядкуванні» (2006 р., м. Ужгород), на двох науково-практичних конференціях «Новітні досягнення геодезії, геоінформати-

ки та землевпорядкування — європейський досвід» (2005 та 2006 рр., м. Чернігів), на VI Орловській конференції «Дослідження Землі як планети методами геофізики, геодезії і астрономії» (2009 р., м. Київ), а також на семінарах відділу космічної геодинаміки ГАО НАН України.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в шести роботах: три статті в реферованих журналах [1, 4, 5] та три в матеріалах конференцій [2, 3, 6].

Структура дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (95 найменувань). Обсяг дисертації — 120 сторінок машинописного тексту, включаючи 27 рисунків та 16 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету роботи, відмічено її наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено огляду сучасних методів космічної геодезії. Наведено принципи кожного методу, основні рівняння, які описують спостережувані величини та задачі, що можуть бути розв'язані за допомогою кожного з методів. Розглянуто також можливості та підходи до створення спільних розв'язків за даними ЛЛС-, РНДБ- та GPS-спостережень.

Сучасні методи космічної геодезії базуються на реєструванні сигналів від об'єктів ближнього або далекого космосу. До таких методів відносять радіоінтерферометрію з наддовгими базами, лазерну локацію штучних супутників Землі, глобальні навігаційні супутникові системи, лазерну локацію Місяця і систему доплерівської орбітографії та радіолокації супутників (Doppler Orbit Determination and Radiopositioning, DORIS), кільцевий лазер. Оскільки на території України розміщено лише інструменти РНДБ, ЛЛС та ГНСС, в даній роботі розглядаються лише ці три методи.

РНДБ — унікальний метод, який дає змогу оцінити усі параметри орієнтації Землі та отримати реалізації як Земної, так і Небесної систем координат. Під час РНДБ-сеансу кілька радіотелескопів записують сигнали від одного і того ж радіоджерела. Час отримання сигналу реєструється за допомогою високоточних годинників на станціях. Дані сеансу записуються на магнітну плівку або на оптичний диск і передаються на корелятор, де відбувається первинна обробка спосте-

режень. На кореляторі обчислюється кореляційна функція записаних сигналів та отримуються основні спостережувані величини: різниця моментів реєстрації сигналу на станціях τ і швидкість її зміни $\dot{\tau}$. Нехтуючи гравітаційним викривленням фронту, геометричну затримку сигналу між станціями можна виразити формулою:

$$\tau = \frac{1}{c} \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{s}, \quad (1)$$

де c — швидкість світла,

\mathbf{b} — вектор бази,

\mathbf{s} — одиничний вектор напрямку на джерело.

Згідно формули (1), геометрична затримка дає змогу обчислити складову бази інтерферометра в напрямку на джерело. З іншого боку геометрична затримка залежить від геодезичних і астрометричних параметрів, які становлять інтерес (координат станцій спостереження, координат радіоджерела, параметрів обертання Землі). Якщо провести серію одночасних вимірювань за допомогою мережі станцій, можна отримати достатньо спостережень, щоб оцінити за допомогою методу найменших квадратів усі вищевказані параметри.

Метод ЛЛС полягає в наступному. Наземна локаційна станція посилає короткі когерентні лазерні імпульси, які відбиваються від кутикових відбивачів, розміщених на штучному супутнику Землі (ШСЗ). Час проходження лазерного імпульсу є основною спостережуваною величиною в ЛЛС. Крім того, обчислена топоцентрична віддаль від станції до супутника моделюється простим векторним співвідношенням:

$$\mathbf{q} = \mathbf{r} + \mathbf{R},$$

де \mathbf{q} — вектор станція–супутник,

\mathbf{r} — геоцентричний радіус-вектор станції спостереження,

\mathbf{R} — геоцентричний радіус-вектор супутника.

Накопичивши достатню кількість різниць спостережуваної і обчисленої топоцентричних віддалей, можна розв'язати задачу про побудову внутрішньо узгоджених параметрів (системи елементів орбіт ШСЗ, ПОЗ, координат локаційних станцій тощо) за допомогою методу диференціальних поправок.

Принцип роботи навігаційної системи полягає в наступному. Сузір'я супутників (космічний сегмент) передає набір сигналів на кількох частотах. Передавані сигнали містять різноманітну інформацію (навігаційні дані, інформацію про стан системи, вимірювальну інформацію тощо).

Найважливішими серед передаваних величин є кодові псевдовідстані, фаза сигналу та ефемериди супутників, які були обчислені в операційному центрі (сегмент керування та контролю) і завантажені на супутники. Користувач, маючи одночасні спостереження як мінімум чотирьох супутників та ефемеридну інформацію, спроможний отримати свої координати та швидкість. Спостережуваними величинами в GPS є кодові псевдовідстані та фази сигналу.

Кодові псевдовідстані C та фаза сигналу φ в одиницях відстані можуть бути виражені наступними співвідношеннями:

$$C = \rho + c(\delta_r + \delta^s) + T + I + \delta_c + \varepsilon_c,$$

$$\varphi = \rho + c(\delta_r + \delta^s) + T - I + \lambda N + \delta_\varphi + \varepsilon_\varphi,$$

- де ρ — істинна відстань до супутника,
 c — швидкість світла,
 δ_r, δ^s — похибки годинника станції та супутника,
 T, I — тропосферна та іоносферна затримки сигналу,
 δ_c, δ_φ — кодова та фазова затримки сигналу в апаратурі,
 $\varepsilon_c, \varepsilon_\varphi$ — шуми кодових та фазових спостережень,
 λ — довжина хвилі сигналу,
 N — стала фазова невизначеність (ціле число).

Переваги сучасних методів космічної геодезії в повній мірі розкриваються за умови отримання спільного розв'язку, який враховує усі наявні GPS-, РНДБ- та ЛЛС-дані. Можливість створення спільного розв'язку за даними різних методів космічної геодезії обумовлена наступними чинниками: існування геодезичних майданчиків, на яких розташовані кілька інструментів (так звані пункти колокації), та наявність спільних оцінюваних параметрів (табл. 1).

В даному розділі наведено основні принципи створення спільних розв'язків для геодинамічних параметрів за даними методів космічної геодезії (об'єднання на рівні розв'язків, на рівні нормальних або умовних рівнянь). Проаналізовано та вказано певні недоліки в алгоритмі отримання реалізації Міжнародної земної системи координат (ITRF), зокрема відсутність гнучкого підходу для правильного врахування локальних прив'язок на пунктах колокації.

Оскільки усі вхідні GPS-розв'язки в дисертаційній роботі виконано автором, то необхідно було провести тестування інструменту обробки — програмного забезпечення «GAMIT/GLOBK» версії 10.1. Результати цього тестування представлено у **другому розділі**. Тестуван-

Параметри, оцінювані різними методами

Параметр	РНДБ	GPS	ЛЛС
Координати квазарів (ICRF)	×		
Кути нутації	×		
Координати полюса	×	×	×
UT1	×		
Тривалість доби	×	×	×
Координати та швидкості станцій (ITRF)	×	×	×
Геоцентр		×	×
Гравітаційне поле		×	×
Орбіти супутників		×	×
Іоносферна рефракція	×	×	×
Тропосферна рефракція	×	×	×

ня проводилося на мережі станцій Локального центру аналізу ГНСС-даних (ЛЦА) ГАО НАН України і розв'язок цього центру вважався еталонним. Розв'язки ЛЦА ГАО НАНУ отримувалися за допомогою програмного забезпечення «Bernese GPS Software» версії 4.2. Дане програмне забезпечення ретельно протестоване в рамках Міжнародної ГНСС-служби та використовується переважною більшістю центрів обробки Європейської перманентної ГНСС-мережі. Період дослідження складав чотири тижні (22 лютого–20 березня 2004 р., дні року 053–080). Показано наступні основні відмінності в роботі та можливостях програмних забезпечень «GAMIT/GLOBK» версії 10.1 та «Bernese GPS Software» версії 4.2.

1. Програмне забезпечення (ПЗ) «Bernese GPS Software» може використовувати навігаційну інформацію з комбінованих файлів (sp3-файли), які формуються Міжнародною ГНСС-службою (International GNSS Service, IGS). «GAMIT/GLOBK» використовує sp3-файли лише як файли ефемерид, а поправки до показів годинників GPS-супутників бере з файлів навігаційного повідомлення, записаних приймачами на станціях або з комбінованих IGS-файлів навігаційного повідомлення. Це пояснюється тим, що комбіновані в IGS файли навігаційного повідомлення генеруються значно швидше, тому низькоточну обробку можна проводити, не чекаючи файлів точних ефемерид.
2. При зважуванні спостережень для ПЗ «Bernese GPS Software»

рекомендовано обчислювати вагові коефіцієнти для спостережень супутників з кутами місця менше 15° за формулою:

$$w(E) = \frac{1}{\cos^2 E},$$

де E — висота супутника, що спостерігається, над горизонтом. При обробці спостережень ПЗ «GAMIT/GLOBK» також можна зважувати спостереження відповідно до кута місця, проте тут користувачем задається не функція обчислення вагового множника, а функція оцінки помилки спостережень, яка має вигляд:

$$\varepsilon(E) = a^2 + \frac{b^2}{\sin^2 E},$$

де a , b — задані користувачем коефіцієнти.

При обробці вибрано рекомендовані розробниками значення:

$$a = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad b = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

При такому виборі значень a і b спостереження на середній висоті 40° (для станцій в середніх широтах) мають оцінювану похибку 10 мм, а на висоті 20° ваговий множник складатиме 0,5. Крім того в «GAMIT/GLOBK» зважуються спостереження для всіх кутів місця (в діапазоні 10° – 90°).

3. Програмний комплекс «Bernese GPS Software» має кілька варіантів формування баз. Один з них дозволяє користувачу явно задати бази. В «GAMIT/GLOBK» є лише один спосіб формування баз — за принципом утворення найменших подвійних різниць. Розробники «GAMIT/GLOBK» не планують додавати можливість задавати бази явно, а працюють над удосконаленням існуючого алгоритму. На рис. 1 зображено конфігурацію мережі, явно задану при обробці комплексом «Bernese GPS Software».
4. У ПЗ «GAMIT/GLOBK» версії 10.1 передбачена можливість використання нового формату (ANTEX) файлів варіації фазового центру антен (розробники рекомендують використовувати моделі антен, розроблені в Національній адміністрації по вивченню океану і атмосфери США (NOAA) [<http://www.grdl.noaa.gov/GRD/GPS/>]). «Bernese GPS Software ver. 4.2» використовує файли IGS-формату pcv [http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/igs_01.pcv] (у «Bernese GPS Software ver 5.0» буде можливість конвертувати

абсолютні калібровки антен у форматі ANTEX у внутрішній формат Bernese).

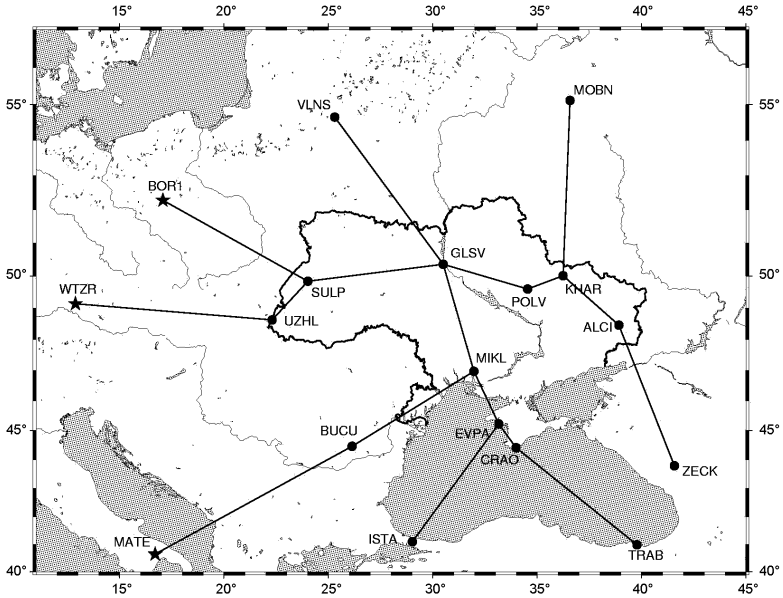


Рис. 1. Мережа GPS-станцій, що оброблялися в ЛЦА ГАО НАН України станом на березень 2004 р.

Отримано чотири тижневі розв'язки та порівняно з відповідними розв'язками ЛЦА ГАО НАН України. На рис. 2–4 показано абсолютні значення різниць оцінок координат станцій для першого тижневого розв'язку.

Показано, що параметри перетворення Гельмерта між розв'язками ЛЦА ГАО НАН України та розв'язками, отриманими за допомогою ПЗ «GAMIT/GLOBK» незначні. Найбільше значення складають зсуви по осі OZ (до 4,9 мм). Повороти між системами координат розв'язків складають 0,1–2,0 мм. З аналізу отриманих розв'язів зроблено висновки про можливість використання ПЗ «GAMIT/GLOBK» для обробки GPS-спостережень за стандартами EPN на великих базах (100–1000 км).

Проведено аналіз усіх доступних засобів отримання спільних розв'язків для геодинамічних параметрів. Одним з програмних забезпечень, які дають змогу спільно обробляти спостереження різних методів

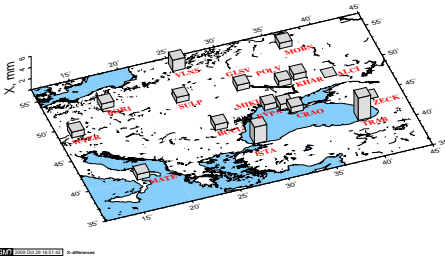


Рис. 2. Різниці абсцис

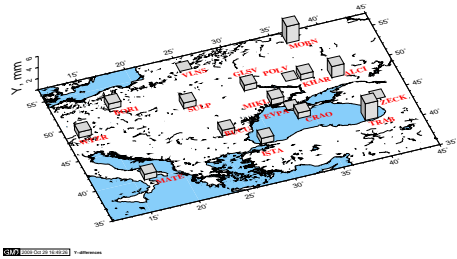


Рис. 3. Різниці ординат

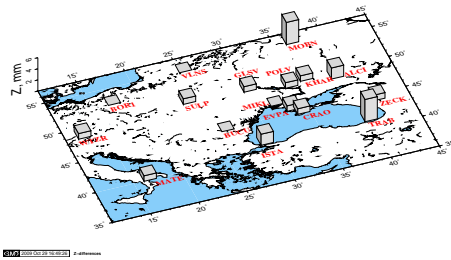


Рис. 4. Різниці аплікат

космічної геодезії (на рівні нормальних рівнянь), є програма «GLOBK». У **третьому розділі** отримано спільний розв'язок для координат та швидкостей станцій за даними спостережень ЛЛС- та GPS-пунктів євразійського регіону за допомогою ПЗ «GLOBK» (рис. 5). Період вибірки даних складав 1 січня 2002 р. – 1 січня 2005 р. Для обробки відібрано GPS- та ЛЛС-станції, які задовольняють наступним критеріям:

- станція повинна бути розташована в євразійському регіоні;
- наявність ЛЛС-спостережень штучних супутників Землі «LAGEOS-1» і «LAGEOS-2» та GPS-спостережень протягом періоду дослідження;
- існування геодезичних прив'язок між реперними точками ЛЛС- та GPS-пунктів станцій колокації;
- бази між GPS-пунктами не повинні перевищувати 2000 км.

Серед вибраних станцій у розв'язок увійшли спостереження інструментів на українських пунктах колокації «Київ-Голосіїв» та «Сімеїз-Кацивелі». Показано, що зсуви між реалізаціями систем координат GPS- та ЛЛС-розв'язків знаходяться на рівні 2–6 см, наведено мож-

ливі причини виникнення цих зсувів. Проаналізовано особливості отримання спільного розв'язку за допомогою ПЗ «GLOBK» та вказано на наявні недоліки: відсутність гнучкого способу врахування локальних прив'язок для пунктів колокації, автоматичне зниження ваги вхідного ЛЛС-розв'язку.

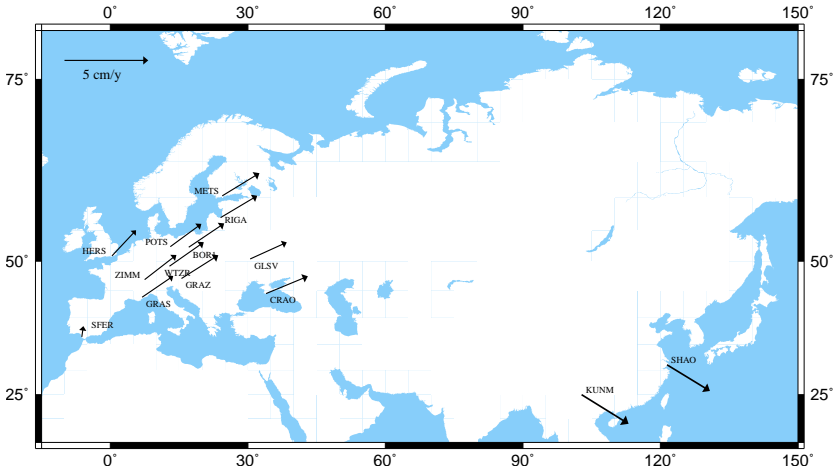


Рис. 5. Швидкості станцій колокації євразійського регіону

Отримано координати та швидкості українських пунктів колокації «Київ–Голосіїв» та «Сімеїз–Кацивелі», з врахуванням даних останніх геодезичних кампаній по визначенню локальних геодезичних прив'язок на цих полігонах. Сформовано файли локальних прив'язок для українських пунктів колокації за процедурою, яка рекомендована Міжнародною службою обертання Землі. Для ЛЛС-станції «Київ–Голосіїв» підтверджено наявність систематичного зсуву у спостереженнях за вказаний період. Координати інструментів на українських пунктах колокації на епоху 1997.0 наведено в таблиці 2.

Четвертий розділ присвячено розробці алгоритму отримання об'єднаного розв'язку для геодинамічних параметрів за даними спостережень сучасних методів космічної геодезії. Запропонований алгоритм складається з чотирьох кроків:

1. Усунення апріорних обмежень з вхідних розв'язків за формулою:

$$N_{free} = N - N_{constr},$$

Таблиця 2

Координати ЛЛС- та GPS-пунктів станцій колокації на епоху
1997.0

Пункт	X_{GPS} , м	Y_{GPS} , м	Z_{GPS} , м
	$X_{ЛЛС}$, м	$Y_{ЛЛС}$, м	$Z_{ЛЛС}$, м
«Київ– Голосіїв»	3512888,958	2068979,862	4888903,110
	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$
	3512989,234	2068968,724	4888817,246
	$\pm 0,062$	$\pm 0,075$	$\pm 0,064$
«Сімеїз– Кацивелі»	3783897,107	2551404,211	4441264,188
	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$
	3783902,377	2551405,065	4441257,451
	$\pm 0,048$	$\pm 0,045$	$\pm 0,044$

де \mathbf{N}_{free} — матриця нормальних рівнянь розв'язку без апіорних обмежень,

\mathbf{N} — матриця нормальних рівнянь розв'язку,

\mathbf{N}_{constr} — матриця нормальних рівнянь апіорних обмежень.

2. Зведення систем нормальних рівнянь до однакових апіорних значень для спільних параметрів. На цьому кроці відбувається формування спільної системи нормальних рівнянь. Нехай умовні рівняння вхідних розв'язків задаються наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_1 &= \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{e}_1; \\ \mathbf{y}_2 &= \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{e}_2; \\ &\vdots \\ \mathbf{y}_n &= \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{e}_n. \end{aligned}$$

Цим рівнянням відповідають умовні рівняння:

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_1 \Delta \mathbf{x}_1 &= \mathbf{b}_1; \\ \mathbf{N}_2 \Delta \mathbf{x}_2 &= \mathbf{b}_2; \\ &\vdots \\ \mathbf{N}_n \Delta \mathbf{x}_n &= \mathbf{b}_n. \end{aligned}$$

Запропоновано вводити рівняння зв'язку у вигляді

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{B}_i \mathbf{x}_0 + \mathbf{c}_i,$$

де \mathbf{x}_0 — вектор спостережень, що включає всі параметри векторів \mathbf{x}_i як спільні, так і не спільні.

Система нормальних рівнянь для спільного розв'язку набуває вигляду:

$$\left(\sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^T \mathbf{N}_i \mathbf{B}_i \right) \Delta \mathbf{x}_0 = \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^T \mathbf{b}_i - \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^T \mathbf{N}_i \mathbf{c}_i.$$

- 3) Введення додаткових умов для задання системи координат розв'язку:

$$\underbrace{(\mathbf{N} + \mathbf{N}_{constr})}_{\mathbf{N}_{common}} \Delta \mathbf{x}_0 = \underbrace{\mathbf{b} + \mathbf{b}_{constr}}_{\mathbf{b}_{common}},$$

- 4) Обчислення шуканих параметрів:

$$\Delta \mathbf{x}_0 = \mathbf{N}_{common}^{-1} \cdot \mathbf{b}_{common}.$$

Показано, що запропонований алгоритм має певні переваги над вже існуючими, а саме:

- не накладається жодних обмежень на наявність чи відсутність будь-яких параметрів, що оцінюються;
- алгоритм дозволяє гнучко враховувати інформацію про локальні прив'язки, навіть за умови відсутності для них повної коваріаційної інформації;
- можливість отримати комбінований розв'язок навіть за відсутності локальних прив'язок;
- можливість включення/виключення будь-якого типу шуканих параметрів (координат станцій, координат та швидкостей полюса, тривалості доби, оцінок UT1) у списку спільних параметрів;
- існує можливість дуже гнучко вибирати спільні параметри, наприклад, можна вважати спільними параметрами ординати та абсциси станцій, а абсциси — неспільними;
- запропонований алгоритм передбачає внесення мінімальної кількості апріорної інформації;
- алгоритм дає змогу комбінувати одночасно нескінченне число вхідних розв'язків (їх кількість обмежується лише пам'яттю комп'ютера).

П'ятий розділ присвячено програмній реалізації алгоритму, який викладено в четвертій главі. Програмна реалізація алгоритму називається «CoCoS» (**C**onstruct **C**ombined **S**olution). Дане програмне

забезпечення використовує як вхідну інформацію розв'язки у форматі SINEX, які отримані центрами аналізу GPS-, РНДБ-, ЛЛС-спостережень.

Основними характеристиками ПЗ «CoCoS» є:

- підтримка формату даних SINEX версій 2.01 (офіційний формат IERS) та 2.11 (модифікація та доповнення формату від Центру космічних польотів ім. Годдарта, США);
- інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс користувача, створений на базі бібліотеки графічних компонентів Qt3 [<http://doc.trolltech.com/qt3>];
- в програмному продукті реалізовано базові алгоритми та об'єкти лінійної алгебри: матриці з динамічним виділенням пам'яті, матричні оператори, LU-розклад матриць для обчислення визначника матриці та отримання оберненої матриці, перетворення Гауссольдера для розв'язання систем рівнянь методом найменших квадратів;
- усі елементарні матричні операції (додавання, віднімання, множення, транспонування) оптимізовані для паралельного обчислення, використовуючи програмний інтерфейс OpenMP [<http://openmp.org>];
- можливість задання критерію перевірки локальних прив'язок;
- можливість включення/виключення будь-якого типу параметрів у списку спільних параметрів.

За допомогою ПЗ «CoCoS» отримано спільний GPS-РНДБ-розв'язок за даними спостережень РНДБ-експерименту CONT02, GPS-пунктів колокації та за інформацією про локальні прив'язки. Отриманий спільний розв'язок порівняно з вхідними розв'язками та значеннями координат станцій з каталогу ITRF2000. Параметри перетворення Гельмерта між розв'язками приведені на рис. 6. Показано, що різниці між розв'язками знаходяться в межах похибок оцінки координат.

У **висновках** наведено основні результати дисертаційної роботи.

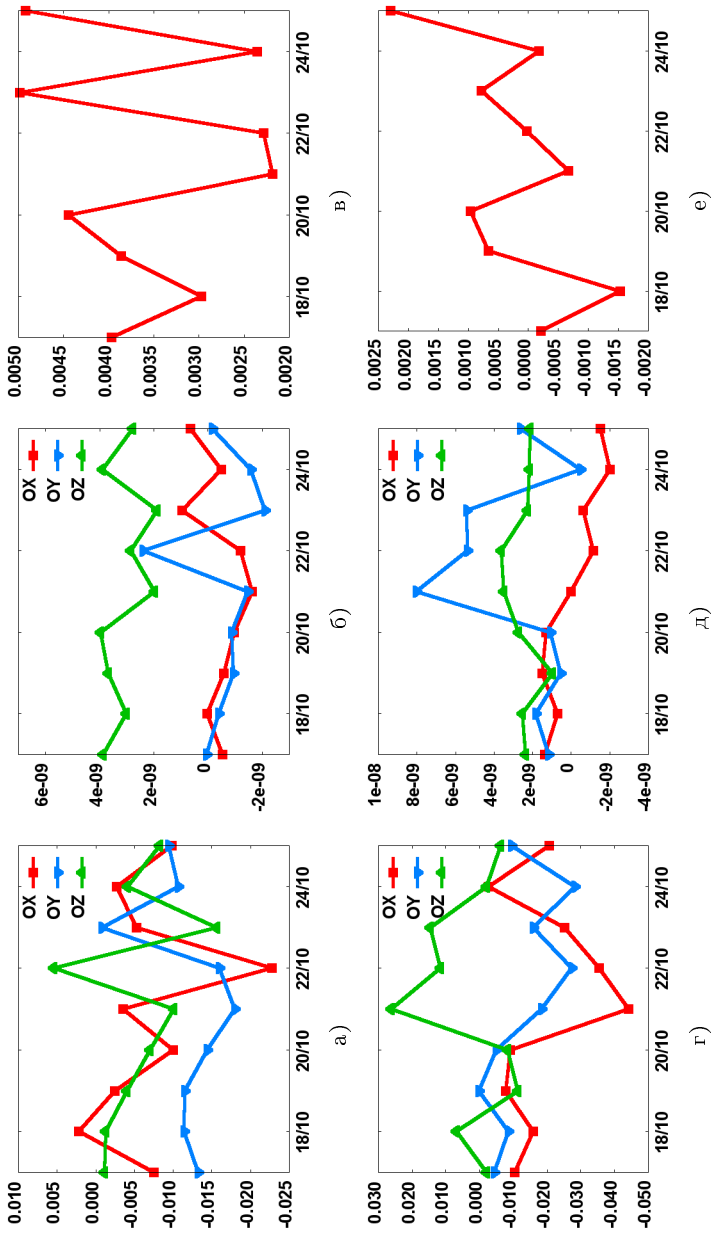


Рис. 6. Параметри перетворення Гельмерта між системами: «РНДБ» та «GPS – локальні прив'язки»
 (а) – зсув, м; б) – поворот, рад; в) – масштабний множник, мм/км), «РНДБ» та «Спільний розв'язок»
 (г) – зсув, м; д) – поворот, рад; е) – масштабний множник, мм/км)

ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена розробці програмно-алгоритмічного забезпечення для отримання спільного розв'язку для геодинамічних параметрів за даними спостережень сучасних методів космічної геодезії.

1. Отримано координати українських пунктів колокації «Київ–Голосіїв» та «Сімеїз–Кацивелі» за даними трирічного ряду ЛЛС- та GPS-спостережень та локальними прив'язками між інструментами.

2. Було розроблено нову методику отримання спільного розв'язку для геодинамічних параметрів за даними сучасних методів космічної геодезії, яка дає змогу отримувати реалізації Небесної та Земної систем координат, а також узгоджені з ними параметри орієнтації Землі.

3. Розроблено програмну реалізацію запропонованого алгоритму — ПЗ «CoCoS». За допомогою розробленого програмного забезпечення отримано спільний розв'язок для координат спостережних станцій за даними спостережень РНДБ-експерименту CONT02 та GPS-пунктів колокації та інформацією про локальні прив'язки. За допомогою аналізу отриманого спільного розв'язку доведено коректність розробленого алгоритму та його програмної реалізації.

4. Розроблені методики можна запровадити в рамках Міжнародної служби обертання Землі для регулярного отримання спільних розв'язків за даними ЛЛС-, GPS- та РНДБ-спостережень, а також для вивчення систематичних відмінностей між ЛЛС-, GPS- та РНДБ-реалізаціями Земної системи координат.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Литвин М. О.* Порівняння результатів обробки даних української перманентної GPS-мережі програмним комплексом GAMIT/GLOBK з результатами Локального центру аналізу GPS-даних ГАО НАН України / М. О. Литвин // Космічна наука і технологія. — 2005. — Т. 11, № 5/6. — С. 56–63.
2. *Литвин М. О.* Досвід використання програмного забезпечення GAMIT/GLOBK в ГАО НАНУ / М. Литвин // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землепорядкування — європейський досвід. — Випуск 1. — Чернігів, 2005. — С. 183–189.
3. *Литвин М. О.* Алгоритм отримання комбінованого розв'язку за результатами спостережень різних методів космічної геодезії / М. Литвин // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землепорядкування — європейський досвід. — Випуск 2. — Чернігів, 2006. — С. 54–58.
4. *Литвин М. О.* Алгоритм отримання комбінованого розв'язку за даними сучасних методів космічної геодезії / М. Литвин // Кинематика и физика небес. тел. — 2009. — Т. 25, №. 4. — С. 285–296.
5. *Lytvyn M.* CoCoS: A New SINEX Combination Software / M. Lytvyn // Artificial satellites. — 2008. — Vol. 43, № 1. — P. 15–24.
6. *Lytvyn M.* Determination of the collocated IERS sites coordinates with the combination of GPS and SLR data / Lytvyn M., Bolotina O. // Journées 2005: Earth dynamics and reference systems: five years after the adoption of the IAU 2000 Resolutios, Warsaw, Poland, 19–21 September, 2005. — P. 74–76.

АНОТАЦІЯ

Литвин М. О. Спільна обробка GPS-, РНДБ- і лазерних спостережень для досліджень динаміки Землі. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 — Астрометрія і небесна механіка. — Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2009.

Дисертація присвячена розробці програмно-алгоритмічного забезпечення для отримання спільного розв'язку для геодинамічних параметрів за даними спостережень сучасних методів космічної геодезії.

За даними трирічного ряду ЛЛС- та GPS-спостережень та локальними прив'язками між інструментами отримано координати українських пунктів колокації «Київ–Голосіїв» та «Сімеїз–Кацивелі».

Розроблено нову методику отримання спільного розв'язку для геодинамічних параметрів за даними сучасних методів космічної геодезії. Створено програмне забезпечення, яке дає змогу отримувати реалізації Небесної та Земної систем координат, а також узгоджені з ними параметри орієнтації Землі.

Достовірність результатів та висновків роботи перевірено за допомогою порівняння отриманих розв'язків з аналогічними результатами, отриманими в рамках Міжнародної служби обертання Землі.

Ключові слова: глобальна система визначення місцеположення, лазерна локація штучних супутників Землі, радіоінтерферометрія з наддовгими базами, спільний розв'язок.

ABSTRACT

Lytvyn M. O. Combined GPS, SLR and VLBI solutions for studying the Earth dynamics. — Manuscript.

Thesis for candidate's degree by speciality 01.03.01 — Astrometry and celestial mechanics. — Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 2009.

This work is devoted to development algorithms and their software implementations for obtaining combined solutions for Geodynamic parameters using observations from modern Space Geodesy techniques.

The positions of the Ukrainian sites "Kiev-Golosiiv" and "Simeiz-Katzively" with co-located techniques has been obtained using three year spanned SLR and GPS data.

A new approach for obtaining combined solution for Geodynamic parameters using observations from modern Space Geodesy techniques is proposed. A software implementation of proposed algorithm is developed. This software allows to obtain realizations of Terrestrial and Celestial Reference Frames and consistent set of Earth orientation parameters.

The validity of obtained results is confirmed by mutual comparison of obtained combined solutions and correspondent results from International Earth Rotation Service.

Key words: Global Positioning System (GPS), Satellite Laser Ranging, Very Long Base Interferometry (VLBI), combined solution.

АННОТАЦИЯ

Литвин М. А. Совместная обработка GPS-, РСДБ- и лазерных наблюдений для исследований динамики Земли. — Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 — Астрометрия и небесная механика. — Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2009.

Диссертация посвящена решению проблемы получения совместного решения для геодинамических параметров по данным GPS-, РСДБ- и лазернолокационных наблюдений. Решение данной проблемы позволит получить наиболее точные реализации Земной и Небесной систем координат, а также согласованные с ними наборы параметров вращения Земли.

Приведены результаты тестирования программного обеспечения для обработки GPS-наблюдений «GAMIT/GLOBK». Тестирование проводилось путём сравнения решения, выполненного программным обеспечением «GAMIT/GLOBK» с решением Локального центра анализа ГНСС-наблюдений ГАО НАН Украины. Показана пригодность данного ПО для работы по стандартам и установленным точностям Европейской перманентной ГНСС-сети на базах порядка 100–1000 км.

Получены координаты инструментов украинских пунктов коллокации «Киев-Голосеево» и «Симеиз-Кацивели» по данным лазернолокационных и GPS-наблюдений за трёхлетний период (с 1 января 2002 г. по 1 января 2005 г.), используя новейшие данные о локальных привязках между инструментами на этих полигонах. Для лазернолокационной станции «Киев-Голосеево» подтверждено наличие систематиче-

ских инструментальных ошибок в наблюдениях за указанный период. Для локальных геодезических привязок на пунктах «Киев-Голосеево» и «Симеиз-Кацивели» сформированы файлы решений в формате SINEX по методике, рекомендованной Международной службой вращения Земли.

Предложен новый простой и эффективный алгоритм получения комбинированного решения на уровне нормальных уравнений, используя как входные данные решения центров анализа GPS-, ЛЛС- и РСДБ-наблюдений. Данный алгоритм позволяет очень гибко подходить к проблеме учёта локальных геодезических привязок между реперными точками инструментов на пунктах коллокации. Кроме того, существует возможность исключать любой оцениваемый параметр из списка общих параметров.

Разработана программная реализация предложенного алгоритма — ПО «CoCoS» (Construct Combined Solution), которая позволяет получать комбинированные решения для координат и скоростей станций, параметров вращения Земли (координаты и скорости полюса, Всемирное время, изменение длительности суток, поправки углов прецессии–нутаии). Программное обеспечение «CoCoS» оптимизовано для параллельных вычислений и может использовать преимущества современных многопроцессорных компьютерных систем.

Разработанное программное обеспечение было использовано для получения комбинированного GPS–РСДБ-решения по результатам интерферометрических наблюдений геодезического эксперимента CONT02 и наблюдений GPS-пунктов коллокации. Показано, что комбинированное решение согласуется с входными решениями на уровне ошибок. Вычислены параметры преобразования Гельмерта между входными и комбинированными системами координат. Сдвиги начал систем координат решений составляют порядка 2 см, разница в ориентациях систем координат порядка $4 \cdot 10^{-9}$ рад, изменение масштабного множителя порядка $4 \cdot 10^{-8}$. На примере рядов координат для станции «Wetzell» показано, что комбинированное решение не имеет систематических отклонений и трендов относительно координат этой станции из каталога ITRF2000, приведённых на среднюю эпоху эксперимента CONT02.

Ключевые слова: глобальная система позиционирования, лазерная локация искусственных спутников Земли, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, совместное решение.