

АРХІТЕКТУРА І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ ДЛЯ ОБРОБКИ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ З ДОВГИМИ ТА НАДДОВГИМИ БАЗАМИ

1. Вступні міркування

Революційну роль в розвитку геодезії, зокрема існуючих методів визначення місцеположення географічних об'єктів, мала поява глобальних супутникових радіонавігаційних систем координатно-часового забезпечення, типу GPS (США) та ГЛОНАСС (Росія). За їх допомогою стало можливим з високою точністю і оперативністю визначити координати пунктів спостережень, в тому числі їх висотну складову.

Виробники високоточних приймачів для визначення місцеположення географічних об'єктів за сигналами супутникових радіонавігаційних систем виготовляють також прикладні пакети програмного забезпечення для обробки даних спостережень, виконаних приймачами цих же фірм. Такі пакети входять до комплекту обладнання. Вони дозволяють обробляти матеріали спостережень, які виконані на базах довжиною до 20-30 км.

На сучасному етапі розвитку геодезичної науки багато уваги приділяється створенню державних високоточних геодезичних мереж та спеціальних геодезичних мереж для вивчення глобальних і локальних геодинамічних процесів. Побудова цих мереж потребує обробки довгих та наддовгих баз супутникових спостережень, порядку 50–5 000 км. Обробка спостережень такого класу потребує певних знань та програмного забезпечення.

Міжнародні організації IGS (Міжнародна служба вивчення геодинаміки за допомогою GPS) та EPN (Європейська служба перманентної GPS-мережі) розробили для регіональних центрів обробки та аналізу даних рекомендації стосовно характеристик обробки спостережень на пунктах перманентної мережі, а саме (С. Вгуупіпх, 1997):

- частота фіксування сигналів (періодичність фіксування даних) має становити 180 с;
- мінімальна висота супутників над місцевим горизонтом–15 градусів;
- оцінку тропосферної затримки сигналу виконувати через кожні 2 години(параметри апріорної абсолютної ваги–0.1 м, відносної–5 м;
- використовувати точні орбіти супутників;
- використовувати точні відомості про орбіти та параметри обертання Землі, за даними IGS чи CODE (Європейський центр визначення орбіт);
- враховувати залежності фазових ексцентриситетів антен приймачів від висоти ШСЗ (дані надаються IGS).

Для виконання цих вимог, а також для досягнення найвищої точності обробки GPS-вимірів UNAVCO (Навігаційний консорціум університетів) рекомендує використовувати наступні програмні продукти:

- Bernese GPS Software;
- GAMIT/GLOBK;
- Gypsy-Oasis II.

Для обробки матеріалів спостережень перманентної GPS-мережі, фундаментальної геодезичної мережі та спеціальних геодезичних мереж, призначених для вивчення геодинамічних процесів в Україні планується використати програмно –

технологічний комплекс GAMIT/GLOBK який розроблено Массачусетським технологічним інститутом (США) для використання на UNIX-платформах.

Комплекс GAMIT/GLOBK – це повний пакет для обробки матеріалів GPS-спостережень, врівноваження просторових мереж та інтерпретації результатів з метою моделювання геодинамічних процесів.

Основними функціями програмного комплексу є:

- забезпечення завантаження файлів даних спостережень ;
- обчислення баз з врахуванням точних ефемерид супутників, тропосферних та іоносферних поправок, інших факторів, оцінка точності;
- відображення результатів обробки у вигляді графіків, діаграм;
- врівноваження просторових мереж, обчислення координат пунктів, оцінка точності;
- трансформація результатів обробки у різні системи координат;
- обчислення зміщень станцій, швидкостей змін їх положення, орбітальних параметрів та параметрів обертання Землі.

Програмний комплекс складається з двох взаємозв'язаних блоків:

- GAMIT–блок для обчислення векторів-баз та створення коваріаційної матриці;
- GLOBK–блок для поєднання результатів обробки по сесіях, кампаніях і методах побудови мереж (VLBI, SLR, GPS) та їх наступного врівноваження з оцінкою точності.

Головним продуктом GAMIT є вільний розв'язок баз у вигляді так званого H-файлу (можна перетворити в SINEX–формат), який містить в собі параметри оцінки бази та коваріаційну матрицю і який може бути скерований у GLOBK для комбінування даних з метою визначення координат станцій та швидкостей їх зміни, а також орбітальних параметрів та параметрів обертання Землі. Максимальна кількість станцій та сесій визначається в процесі компіляції програмного забезпечення і може бути пристосована до вимог та можливостей технічного обладнання.

Програмне забезпечення складається з окремих модулів які виконують функції підготовки даних для обробки, генерування орбіт в заданій системі координат супутників, розрахунку поправок в спостереження (обчислені мінус вираховані) та часткових похідних з геометричної моделі, фільтрації даних та їх обробки за методом найменших квадратів. Роботою цих модулів керує безпосередньо оператор, однак вони пов'язані між собою процесом обробки, а також прийнятими назвами файлів. У більшості випадків для обробки краще використовувати програми–сценарії оболонки (shell scripts) та послідовності командних файлів–результатів роботи модулів MAKEXP для підготовки даних та FIXDRV для моделювання, редагування та оцінки результатів обробки. Дані в основному редагуються автоматично, але поправки в розв'язки можуть бути відображені на екрані чи виведені на друк, тому передбачена можливість редагування даних безпосередньо оператором.

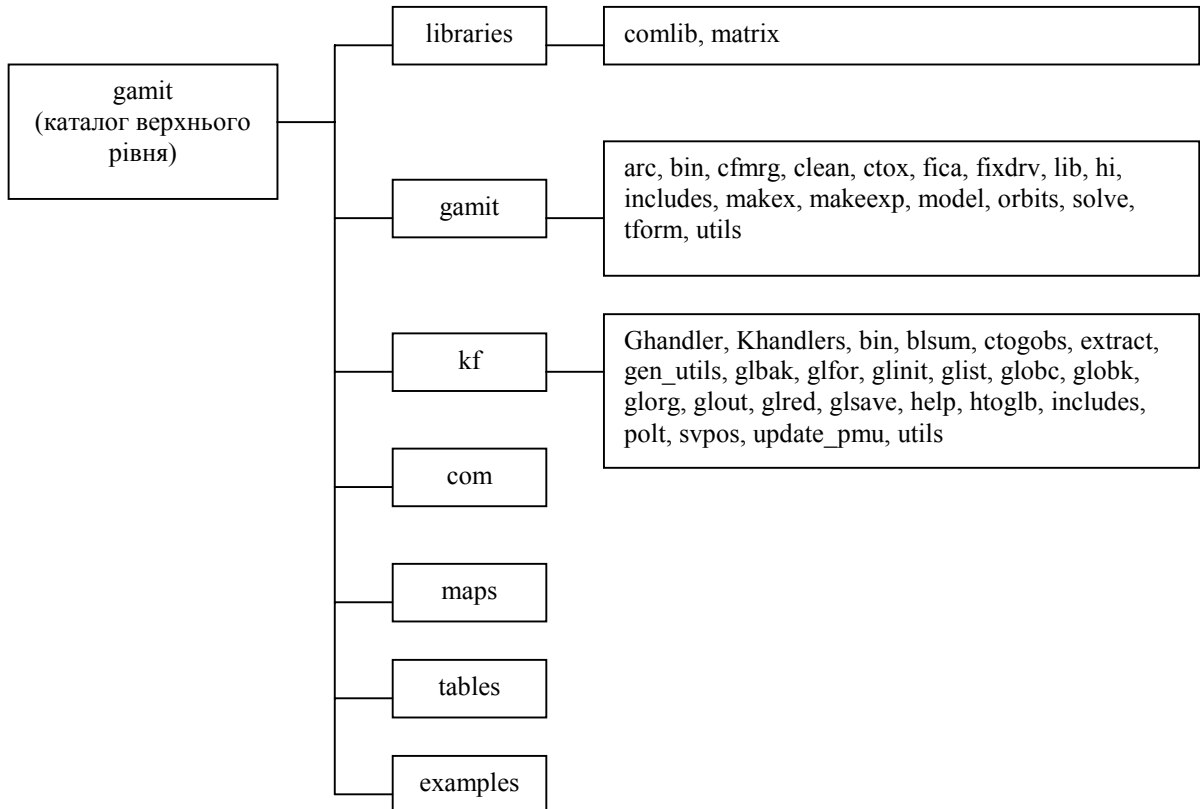
2. Структура програмного–технологічного комплексу GAMIT/GLOBK

Комплекс складається з таких модулів:

- **libraries** – містить вихідні коди загальних функцій та підпрограм, які використовуються програмами GAMIT та GLOBK;
- **gamit** – містить підкаталоги, які в свою чергу містять вихідні коди та відкомпільовані програми для GAMIT-утиліт та модулів обробки векторів – баз;
- **kf** – містить підкаталоги, які в свою чергу містять вихідні коди та відкомпільовані програми для GLOBK-утиліт та модулів врівноваження мереж;

- `com` – містить сценарії–оболонки (shell) та командні файли, які використовуються для інсталяції та запуску програм GAMIT і GLOBK;
- `maps` – містить файли карт, які можуть бути надруковані з використанням програмного забезпечення GMT;
- `tabels` – містить додаткові дані та інформаційні файли, що використовуються програмами GAMIT та GLOBK;
- `examples` – містить стандартні дані та розв'язки для тестування інсталяції програми GAMIT.

На схемі зображено структуру програмного комплексу GAMIT/GLOBK.



3. Основні етапи обробки супутникових радіонавігаційних спостережень з використанням комплексу GAMIT/GLOBK

Етап 1. Обробка векторів - баз з використанням блоку GAMIT

Створення проекту (каталогу) для обробки спостережень.

Проект для обробки спостережень передбачає створення структури каталогів в яких проводиться обробка спостережень, містяться таблиці моделей іоносфери і тропосфери та вихідні дані, а також результати обробки.

Проект, як правило, називають по найменуванню кампанії спостережень. Він передбачає створення наступних робочих каталогів:

- **raw** – каталог, де зберігаються "сирі" дані з приймачів, перетворення в RINEX – формат здійснюється за допомогою окремих утиліт;
- **rinex** – каталог, де зберігаються дані (спостережні та навігаційні) в форматі RINEX;
- **tables** – каталог, який містить необхідну додаткову інформацію, загальну для всіх GPS–днів, яка підлягає обробці;

- **shop** – каталог, де зберігаються власні розробки сценаріїв оболонки та командних файлів, необхідних для виконання обробки;
- **orbits** – каталог, що містить інформацію про орбіти, перетворену у внутрішній формат програми;
- **dayn** – каталоги, в яких генеруються розв'язки за окремими GPS – днями;
- **globk** – каталоги, де містяться щоденні розв'язки, які конвертуються в бінарний формат для імпортування у блок GLOBK і подальшого комбінування єдиного розв'язку для всієї кампанії.

Перетворення даних в RINEX-формат.

Перетворення даних з бінарного формату приймачів фірм-виробників в RINEX-формат виконується за допомогою програми TEQC (Translate, Editing and Quality Checking), яка не входить до програмного комплексу і розповсюджується окремо.

Створення додаткових файли та опис їх зв'язків з робочими файлами.

Для початку обробки необхідно створити файли з вихідними даними, в яких містяться дані про спостереження на пункті: 4-хсимвольний ідентифікатор, повна назва пункту, ексцентриситет антени, тип антени, тип приймача, номер сесії, початок та кінець спостережень; окрім цього, необхідно задати апріорні сферичні координати для кожного пункту (L-файл), а також вказати INTERNET – адреси таблиць, які будуть використовуватися при обробці і які містять інформацію про параметри обертання Землі, ефемериди Місяця і Сонця, параметри нутації, параметри відхилення супутників від орбіти, моделі положення фазових центрів антен приймачів і супутників та ін.

Створення командних файлів sestbl. та sittbl.

Файли *sestbl.* та *sittbl.* Керують роботою програм комплексу GAMIT. Вони контролюють всі аспекти обробки, починаючи від параметрів, які необхідно отримати, та закінчуючи використанням фізичних моделей.

Робота з модулем ARC

Програма *arc* генерує файл ефемерид у внутрішній формат (T-File) за допомогою методу чисельного інтегрування рівнянь руху супутників, за вихідні умови приймається вектор положення супутника який міститься в G-файлі.

Робота з модулем MODEL

Програма *model* обчислює наближені поправки та часткові похідні спостереженої фази за параметрами, які будуть обчислюватися для кожного файлу спостережень. Програма *model* виводить результати в бінарний C-файл.

Робота з модулем AUTCLN

Програма *autcln* запускається як частина комплексу GAMIT, але міститься в каталозі /kf, оскільки її стиль та призначення більш подібні до комплексу GLOBK. *Autcln* читає C-файл, отриманий програмою *model*, виконує пошук та розв'язання всіх стрибків фаз, відбраковує спостереження. Програма створює "вчищену" версію C-файла та файл, в якому ведеться протокол всіх змін, які виконані у вхідному C-файлі.

Робота з модулем MAKEXP

Програма *makexp* використовується для створення щоденних сесій комплексу GAMIT. Її основне завдання – генерування вхідних командних файлів для модуля MAKEXP. Програма *makexp* проводить пошук всіх *ripex*-файлів в даному каталозі, створює або змінює існуючий файл *session.info*, який містить відомості про час (початок - кінець) спостережень.

Робота з модулем SOLVE

Програма *solve* проводить обчислення векторів-баз за допомогою оцінки подвійних різниць фаз за методом найменших квадратів. Вхідними файлами для *solve* є: С-файл, В-файл та М-файл. Результати обробки формуються у вихідних файлах: М-файл, L-файл, G-файл, H-файл, Q-файл та O-файл.

Етап 2. Врівноваження просторових мереж, оцінка їх якості з використанням блоку GLOBK

Перетворення вхідної інформації

На початку обробки оператору доступні масиви даних у вигляді h-файлів або SINEX-файлів (Software INdependent Exchange format) – це результати початкової обробки первинних даних GPS, VLBI, SLR або наземних спостережень. Першим кроком обробки має бути перетворення цих ASCII-файлів в бінарний h-файл, який зможе прочитати програма. Це виконується за допомогою програми *htoglb*.

Перевірка вхідної інформації

У процесі врівноваження просторових GPS-мереж другим кроком має стати запуск програми *glred* для всіх (бінарних) h-файлів, які братимуть участь в обробці. За допомогою цієї програми можна відбракувати дані.

Комбінування даних

Після того як отримано набір достовірних даних, за допомогою програми *globk* обробку повторюють для отримання комбінованого розв'язку по всіх днях спостережень. Зі щоденних h-файлів формують єдиний h-файл, який репрезентуватиме положення пунктів для всієї кампанії.

Перетворення результатів в необхідну систему відліку.

Програма *globk* продукує результати врівноваження на підставі їх внутрішньої збіжності, але як частина цієї програми, або окремо може бути виконана програма *glorg* для встановлення референцної системи відліку, яка задається координатами вихідних станцій.

4. Тестування програмно – технологічного комплексу GAMIT/GLOBK

Для проведення тестової обробки автори використали дані добових спостережень на перманентних станціях GRAZ (Грац, Австрія), GLSV (Голосіїв, Україна) та JOZE (Йозефослав, Польща). Координати цих пунктів відомі, вони є в каталозі координат ITRF – 97, де вказані також швидкості їх змін. Координати та швидкості їх змін на цих станціях, обчислені на епоху спостережень 2000,6869 наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Назва	$\underline{X, м}$ $V_X, м/рік$	$\underline{Y, м}$ $V_Y, м/рік$	$\underline{Z, м}$ $V_Z, м/рік$
Координати пунктів у системі ITRF – 97 на епоху 1997.0 та швидкості їх змін			
GLSV	3 512 889,126	2 068 979,769	4 888 903,127
	-0,0203	0,0165	0,0077
JOZE	3 664 940,327	1 409 153,749	5 009 571,309
	-0,0192	0,0153	0,0051
GRAZ	4 194 423,970	1 162 702,556	4 647 245,315
	-0,0163	0,0182	0,0081
Координати пунктів у системі ITRF – 97 на епоху 2000,6869			

GLSV	3 512 889,051	2 068 979,830	4 888 903,155
JOZE	3 664 940,256	1 409 153,805	5 009 571,328
GRAZ	4 194 423,910	1 162 702,623	4 647 245,345

Для тестування було обчислено прирости координат та довжина векторів між даними станціями на епоху спостережень. Результати зведено в табл. 2.

Таблиця 2. Координати у системі ITRF – 97 на епоху 2000.6869

Назва вектора-бази		DX	DY	DZ	L
GLSV	JOZE	152 051,2051	-659 826,0244	120 668,1724	687 786,8560
GRAZ	JOZE	-529 483,6537	246 451,1823	362 325,9829	687 292,6907
GLSV	GRAZ	681 534,8587	-906 277,2067	-241 657,8105	1 159 407,8819

Обробка векторів-баз програмним комплексом GAMIT виконана згідно з вимогами IGS/EPN. Отримані результати зведено в табл. 3.

Таблиця 3 Результати обробки ПЗ GAMIT

Назва вектора-бази		DX	DY	DZ	L
GLSV	JOZE	152 051,2048	-659 826,0188	120 668.1826	687 786.8524
GRAZ	JOZE	-529 483,6444	246 451,1837	362 325.9904	687 292.6880
GLSV	GRAZ	681 534,8492	-906 277,2026	-241 657.8078	1 159 407.8724
Різниці по приростах координат та довжин бази (GAMIT мінус Каталог), мм					
GLSV	JOZE	-0,26	5,62	10,19	-3,61
GRAZ	JOZE	9,29	1,39	7,46	-2,71
GLSV	GRAZ	-9,55	4,13	2,73	-9,46

Окрім цього, проведено обробку даних спостережень на цих пунктів за допомогою програмного продукту фірми Trimble Navigation GPSurvey, v. 2.35a з дотриманням тих же вимог. Результати відображено в табл. 4.

Таблиця 4. Результати обробки ПЗ Trimble GPSurvey, v. 2.35a

Назва вектора-бази		DX	DY	DZ	L
GLSV	JOZE	152 051,2320	-659 826,0240	120 668,2360	687 786,8727
GRAZ	JOZE	-529 483,6580	246 451,1960	362 326,0230	687 292,7201
GLSV	GRAZ	681 534,8950	-906 277,2320	-241 657,8050	1 159 407,9218
Різниці (GPSurvey мінус Каталог), мм					
GLSV	JOZE	26,94	0,42	63,59	16,71
GRAZ	JOZE	-4,31	13,69	40,06	29,35
GLSV	GRAZ	36,25	-25,27	5,53	39,91

Підсумовуючи наші дослідження, можна зробити такі висновки:

1. Для високоточної обробки матеріалів спостережень на пунктах Державної геодезичної мережі (фундаментальна та 1 – класу) і спеціальних геодезичних мереж для вивчення глобальних та локальних геодинамічних процесів, побудова яких потребує обробки довгих та наддовгих баз супутникових спостережень (>100 км), **не можна застосовувати програмне забезпечення виробників GPS-апаратури**

Це пояснюється тим, що виробники програмно – технологічних засобів під час виготовлення своєї продукції не враховують таке:

- можливості оцінки тропосферної затримки;
- параметрів обертання Землі;

- зміни фазових центрів антен в залежності від положення супутників та інше (W. Gurtner).

2. За допомогою програмного комплексу GAMIT можна отримувати високоточні розв'язки баз з дотриманням практично всіх вимог міжнародних організацій, а отже цей продукт можна використати для обчислень результатів спостережень на пунктах Державної геодезичної мережі (фундаментальна та 1 – го класу) і спеціальних геодезичних мереж для вивчення глобальних та локальних геодинамічних процесів. В наведених результатах показані неврівноважені бази, отримані з добових спостережень. Різниця в довжинах векторів складають 2-10 мм (залежно від довжини бази), У компонентах вектора цей показник дещо більший, що свідчить про наступне: найбільші розбіжності в орієнтуванні баз виникають внаслідок того, що вони не були врівноважені в мережі.

Література

1. 1. *Boucher C., Altamini Z., Sillard P.* The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97). – IERS Technical Note 27. – Observatoire de Paris. – May 1999.
2. *Bruyninx C.* Minutes of EUREF Analysis Workshop. – Brussels, April 10 – 11, 1997.
3. *Documentation* for the GAMIT GPS Analysis Software – Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology; Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego.
4. *Estey L.* TEQC Summary. – Proc. – IGS Network Systems Workshop. – Annapolis, Maryland, USA, – November 2– 5, 1998.
5. *Gurtner W.* The Use Of IGS Products For Densifications Of Regional/Local Networks. – www.epncb.oma/be/pub.

О.В. Кучер, Ю.А. Стопхай
**АРХИТЕКТУРА И ИССЛЕДОВАНИЕ
 ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ
 ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ
 РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ
 С ДЛИННЫМИ И СВЕРХДЛИННЫМИ
 БАЗАМИ.**

Резюме

Дано краткое описание назначения, структуры, функций программно – технологического комплекса GAMIT/GLOBK. Приведен порядок обработки векторов – баз. Предложены результаты тестирования данного программного обеспечения.

Kucher O., Stopkhay Yu.
**STRUCTURE AND RESEARCH OF ANALYSES
 SOFTWARE FOR SATELLITE RADIO
 OBSERVATIONS PROCESSING OF LONG AND
 VERY LONG BASELINES.**

Summary.

The structure and main functions of GAMIT/GLOBK Analyses Software are given. The brief technological scheme of baselines processing are shown. The base results of testing of the software are discussed.

Науково-дослідний інститут геодезії і
 Картографії
 Тел.: (044)227-42-52, 227-36-85

E-mail: gki@nbi.com.ua