

УДК 521.182.2

**В. Я. Чолій, В. П. Жаборовський**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

## МЕТОДИКА ОБРОБКИ ДАНИХ ЛАЗЕРНОЇ ЛОКАЦІЇ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

*Описано новий програмний продукт «Київгеодинаміка++», який використовується для обробки даних лазерної локації штучних супутників Землі. Описано архітектуру програми і методіку динамічної побудови бази моделей. Увагу зосереджено на моделях, використаних у продукті.*

### ВСТУП

Вивчення Землі методами геодинаміки неможливе без використання даних лазерної локації супутників. Цей метод продукує велику кількість спостережень, обробка яких можлива лише з використанням найсучасніших комп'ютерів та технологій програмування.

Для визначення і уточнення координат полюса, тривалості доби, коефіцієнтів нутації та інших параметрів обертання Землі застосовується метод диференційних поправок. Суть його полягає в тому, що маючи експериментально виміряну ( $\rho_o$ ) і теоретично обраховану ( $\rho_c$ ) відстань до ШСЗ, можна знайти поправку  $\Delta E_i$  для уточнюваного параметра  $E_i$  з системи рівнянь

$$\sum_i \frac{\partial \rho_c}{\partial E_i} \Delta E_i = \rho_o - \rho_c. \quad (1)$$

Таким способом можна визначити поправку  $\Delta E_i$  для будь-якого параметра  $E_i$ , від якого залежить  $\rho_c$ . Як правило, спочатку уточнюють параметри орбіти ШСЗ, а потім, використовуючи уточнені значення елементів орбіти, обчислюють нові значення  $\rho_c$  і уточнюють інші параметри. Значення  $\rho_c$  знаходять з рівняння

$$\rho = \mathbf{r} - \mathbf{QR}. \quad (2)$$

Тут  $\mathbf{Q}$  — матриця переходу від земної до небесної

(інерційної) системи координат,  $\mathbf{R}$  — координати станції спостереження в ЗСК,  $\mathbf{r}$  — координати супутника в ІСК, які, у свою чергу, знаходяться шляхом інтегрування рівнянь руху супутника:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}_{geo} + \mathbf{F}_{plan} + \mathbf{F}_{light} + \mathbf{F}_{other}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{F}_{geo}$ ,  $\mathbf{F}_{plan}$ ,  $\mathbf{F}_{light}$ ,  $\mathbf{F}_{other}$  — сили впливу геопотенціалу, притягання планет, тиску світла та інші (детально див. нижче).

Усі параметри, що стосуються перетворень та сил у виразах (2) та (3), аналізуються та стандартизуються Міжнародною службою обертання Землі IERS (International Earth Rotation Service) шляхом об'єднання їх у моделі. Після циклу таких робіт публікується спеціальний документ, де ці моделі описано. Його називають Стандарт IERS [6, 7]. Науки про Землю розвиваються, а разом із ними розвиваються і змінюються моделі. Тому Стандарт IERS також змінюється. Зрозуміло, що програмне забезпечення, яке використовують для геодинамічних робіт, повинно враховувати зміни стандартів. Це створює певні труднощі, особливо якщо усі моделі записано у код програми. В такому випадку необхідно переписувати великі частини коду і повністю перекompілювати програмний продукт.

Ми модернізували розроблений у 1980-х рр. минулого століття у відділі космічної геодинамі-

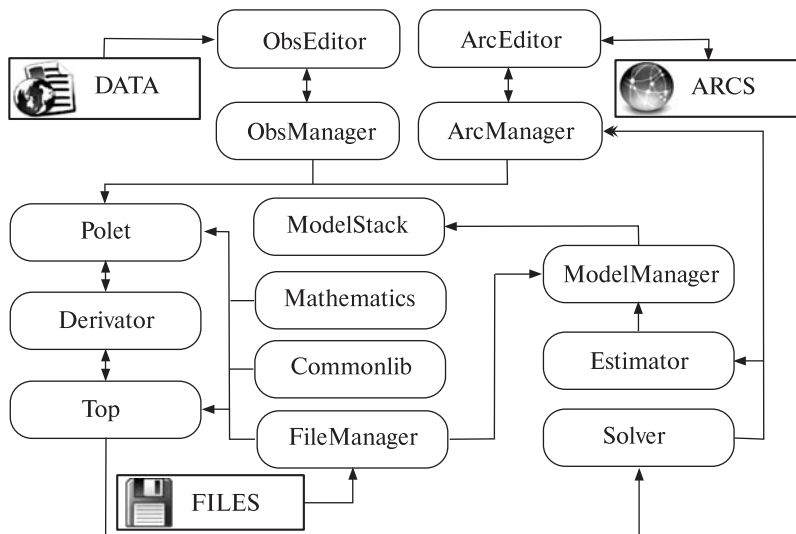


Рис. 1. Блок-схема KG++

міки ГАО НАН України програмний комплекс «Київгеодинаміка», який застосовувався для обробки даних лазерної локації ШСЗ і уточнення параметрів обертання Землі [2–4]. Він був написаний на мові програмування ФОРТРАН, а моделі, які використовувалися, були записані статично, тобто їхня заміна, чи навіть найменша модифікація, вимагала переробки усього продукту. Ми переписали його на мові програмування С++ і зробили можливим динамічну заміну моделей. Новий продукт має дуже мало спільного зі старою версією, однак назва збереглася: «Київгеодинаміка++», або скорочено KG++.

### ЗАГАЛЬНА СТРУКТУРА ПРОГРАМИ

Блок-схема програми наведена на рис. 1.

Уся система реалізована як набір виконуваних модулів та спільних динамічних бібліотек. До модулів належать ArcEditor, ObsEditor, Polet та Top. До бібліотек — Mathematics, Obslib, Arclib, Commonlib, Modellib та Derivlib. Модулі обмінюються даними за допомогою двійкових файлів, у яких міститься службова інформація і величини, які входять у вирази (1) — (3). Ці файли містять інформацію лише про певний інтервал часу (як правило, 15 діб) і певну частину орбіти, звідки і походить їхня назва «дуги».

Система звертається до бази спостережень через власну систему управління базами даних

(СУБД) ObsManager. База спостережень регулярно поповнюється спеціальним модулем, який перевіряє наявність нових спостережень на сайтах-архівах наприклад <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/slr/>, і довантажує необхідні дані.

Математичним ядром програми є бібліотека Mathematics, у якій містяться функції для роботи з матрицями, векторами та іншими математичними об'єктами. Бібліотека Commonlib містить в собі загальні функції, як-то для читання даних, перетворення кутів і т. п. Там також містяться всі константи, що використовуються у програмі (число  $\pi$ , швидкість світла в вакуумі, загальні параметри Землі, Сонця, Місяця і т. д.) і системні параметри. Також вона включає компонент FileManager, який використовується для керування файлами.

Бібліотека Modellib, найголовніша у пакеті, містить ModelManager, який слугує для роботи з моделями, необхідними для знаходження величин  $\rho_c$  і набір класів, в кожному з яких розміщується одна модель і методи для роботи з нею.

Для керування моделями створений ModelStack — ще один клас, який містить динамічно створюваний при кожному запуску на основі ini-файлів список усіх необхідних для конкретного випадку моделей. Бібліотека написана таким чином, що заміна однієї моделі на іншу такого ж типу потребує лише заміни файла з даними про модель і не вимагає ніяких змін коду.

Бібліотека Obslib містить ObsManager, який використовується для аналізу і завантаження значень  $\rho_o$  у форматі, придатному для KG++. Фактично це невелика вузькоспеціалізована СУБД, що служить джерелом спостережень, на основі яких ArcManager з бібліотеки Arclib формує дуги. Також ці модулі використовуються модулями ObsEditor та ArcEditor, які дозволяють переглядати та редагувати файли даних і файли дуг.

Головними модулями KG++ є Polet та Top. Перший призначено для інтегрування рівнянь руху (3), знаходження в єдиній системі відліку усіх величин, що входять в (1) і запису їх у дугу. Другий — для розв'язання системи лінійних рівнянь (1) відносно  $\Delta E_i$  методом найменших квадратів. Допоміжний компонент Estimator на основі знайдених  $\Delta E_i$  утворює est-файл, що містить величини поправок у вигляді, який дозволяє модулям ArcManager та ModelManager внести поправки у моделі перед наступними ітераціями. Процедура повторюється до досягнення необхідної точності. Для інтегрування рівнянь руху у модулі Polet використовується інтегратор VASOMI (VARIABLE

Step and Order Method of Integration), який реалізує метод Адамса зі змінним кроком і змінним порядком: крок та порядок інтегрування вибираються автоматично, адаптивно, на основі бажаної точності інтегрування [3, 4].

Для підготовки похідних від відстані по уточнюваних параметрах ( $\partial \rho_c / \partial E_i$  у виразі (1)) слугує спеціальний блок Derivator, який використовує методи бібліотеки Derivlib і складається з диференціаторів, причому кожен диференціатор працює з йому відповідною моделлю. Компонент Solver — це універсальний модуль для розв'язування систем лінійних рівнянь. Розв'язок, отриманий модулем Solver, обслуговується набором класів-обчислювачів, кожен з яких знаходиться у відповідності до «свого» диференціатора та «своєї» моделі. Трійка модель-диференціатор-обчислювач є основною функціональною одиницею KG++.

Загальну схему роботи представлено на рис. 2.

Уся система вантажиться динамічно на основі ini-файлів, в яких записані параметри налаштувань: інтервали часу, в яких проводяться обчислення, потрібні моделі та їхні параметри, вели-

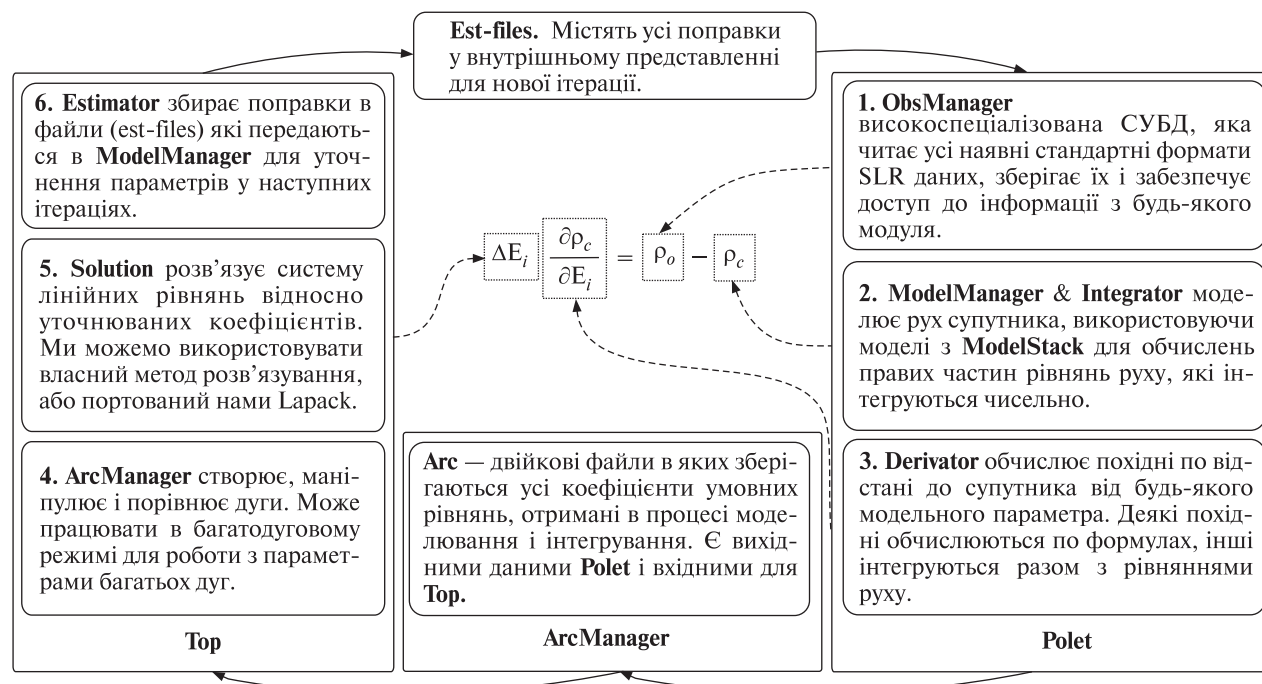


Рис. 2. Принцип роботи KG++

чини, які необхідно уточнювати, імена вхідних та вихідних файлів тощо.

### БІБЛІОТЕКА МОДЕЛЕЙ

Як уже зазначалося, ця бібліотека містить усі можливі моделі. Їх обслуговує спеціальний клас, `ModelManager`, який є синглетоном (тобто, у програмі може бути лише один об'єкт цього класу) і який на основі файлу ініціалізації динамічно формує список потрібних моделей та розташовує їх у іншому синглетоні `ModelStack`.

Моделі класифікують за типом результату, який вони повертають (`void`, `value`, `vector` та `matrix`), а також за змістом — на моделі переходів між системами відліку, моделі сил та моделі редуцції спостережень.

Програмно кожна модель є класом, який успадковується від свого базового класу: `ModelVoid`, `ModelValue`, `ModelVector` та `ModelMatrix`, які, у свою чергу, спадкуються від головного класу `Model`. Далі наведено класифікацію моделей за змістом і їхній короткий опис. Повний опис моделей дано в роботах [6, 7] та приведеній там літературі, а також у документації по `KG++`.

**Моделі перетворень.** Потрібні для приведення усіх векторів в інерційну систему відліку. Для перетворення координат використовується співвідношення

$$[\text{BCRS}] = Q(t)R(t)W(t) [\text{GCRS}], \quad (4)$$

де  $Q(t)$  — матриця прецесії-нутації (для її знаходження потрібні моделі `Precession`, `Nutation`, `PrecessionNutation`, `GeodesicPrecession`, `GeodesicNutation`, `FundamentalArguments`, `NutationFreeCore`, `FrameBias`),  $R(t)$  — матриця обертання Землі (моделі `Times`, `CelestialPole`),  $W(t)$  — матриця врахування положення полюса (моделі `CelestialPole`, `CelestialPoleCorections`),  $t$  — час у юліанських століттях від фундаментальної епохи J2000.0. Для роботи зі шкалами часу застосовується модель `Times` [1].

**Моделі сил.** Використовуються для обчислення сили, яка діє на супутник для інтегрування (3). Відповідно  $F_{geo}$  — сила, викликана геопотенціалом (моделі `Geopotential`, та група моделей `TideGeopotential` для врахування припливів у коефіцієнтах геопотенціалу),  $F_{plan}$  — гравітацій-

не притягання планет, Сонця і Місяця (модель `Ephemeris` та група моделей `EphemerisLEDE`, `EphemerisInpop`, `EphemerisEpm`),  $F_{light}$  — сила тиску світла (моделі `LightPressure`, `LightPressureIndirect`, `SatelliteSpecific`, яка має можливість користуватися циліндричною моделлю тінні, тінню по Кабелячу [8] та по Вохроукліцькому [11–14]),  $F_{other}$  — інші сили (моделі `LenseThirring`, `RelativisticPerigeeMotion`, `GeodesicPrecession`, `GeodesicNutation`, `AtmosphericDrag`, `Atmosphere` за моделлю `NRL-MSISE` [10]).

**Моделі редуцції.** Використовуються для корекції спостережних даних. Сюди відносяться поправки за атмосферу (моделі `Refraction` за Маріні-Мюреєм [9] та Гарфінкелем [5], `ZenithDelay`, `MappingFunction`), поправки до координат за рух станцій (моделі `Stations`, `StationsVariations`, та група моделей `TideStations` для врахування припливів у положеннях станцій, `Tectonics`, `AtmosphericLoading`) та інші (моделі `EarthSpecific`, `RelativisticDistance`, `KeplerianOrbit`).

### ВИСНОВКИ

Головними рисами створеного продукту є його легка адаптація до стандартів, що змінюються з часом, швидкодія та широке використання сучасних методик програмування. Ми плануємо відновити діяльність центру аналізу даних лазерних спостережень ШСЗ в ГАО НАН України і використати новий продукт після проходження ним офіційного тестового періоду `IERS`.

1. Брумберг В. А., Глебова Н. И., Лукашова М. В. и др. Расширенное объяснение к «Астрономическому ежегоднику». — М.: Наука, 2003. — 478 с.
2. Саямов В. Н., Тарадий В. К., Цесис М. Л. Алгоритмы анализа спутниковых наблюдений международной службы вращения Земли. — Киев, 1990. — 22 с. — (Препринт / АН УССР. Ин-т теор. физики; № ИТФ-90-55Р).
3. Тарадий В. К., Цесис М. Л. Вычисление траекторий искусственных спутников Земли. Построение алгоритмов и программ метода Адамса с переменным шагом и переменным порядком. — Киев, 1984. — 16 с. — (Препринт / АН УССР. Ин-т теор. физики; № ИТФ-84-60Р).
4. Тарадий В. К., Цесис М. Л. Вычисление траекторий искусственных спутников Земли. Построение алгоритмов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. — Киев, 1984. —

- 40 с. — (Препринт / АН УССР. Ін-т теор. фізики; № ИТФ-84-92Р).
5. *Garfinkel B.* Astronomical refraction in a polytropic atmosphere // *Astron. J.* — 1967. — **72**. — P. 235—254.
  6. *IERS Conventions (2003)* / Eds D. McCarthy, G. Petit. — Frankfurt, IERS Conventions Center, 2004. — 128 p.
  7. *IERS Conventions (2009)* / Eds G. Petit, B. Luzum. — Frankfurt, IERS Conventions Center, 2010. — 160 p.
  8. *Kabelac J.* Shadow function — Contribution to the theory of the motion of artificial satellites // *BAIC.* — 1988. — **39**, N 6. — P. 213—220.
  9. *Marini J. W., Murray C. W.* Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees. — Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 1973. — NASA-TM-X-70555.
  10. *Picone J. M., Hedin A. E., Drov D. P., Aikin A. C.* NRL-MSISE-00 Empirical Model of the Atmosphere. Statistical Comparisons and Scientific Issues // *J. Geophys. Res.* — 2003. — **107**. — P. 1468—1485.
  11. *Vokrouhlicky P., Farinella P., Mignard F.* Solar radiation pressure perturbations for Earth satellites. I. A complete theory including penumbra transitions // *Astron. and Astrophys.* — 1993. — **208**. — P. 295—312.
  12. *Vokrouhlicky P., Farinella P., Mignard F.* Solar radiation pressure perturbations for Earth satellites. II. An approximate method to model penumbra transitions and their long-term orbital effects on LAGEOS // *Astron. and Astrophys.* — 1994. — **285**. — P. 333—343.
  13. *Vokrouhlicky P., Farinella P., Mignard F.* Solar radiation pressure perturbations for Earth satellites. III. Global atmospheric phenomena and the albedo effect // *Astron. and Astrophys.* — 1994. — **290**. — P. 324—334.
  14. *Vokrouhlicky P., Farinella P., Mignard F.* Solar radiation pressure perturbations for Earth satellites. IV. Effects of Earth's polar flattening on the shadow structure and penumbra transitions // *Astron. and Astrophys.* — 1996. — **307**. — P. 635—644.

Надійшла до редакції 09.12.10

*V. Ya. Choliy, V. P. Zhaborovsky*

#### A PROCEDURE FOR THE PROCESSING OF EARTH'S SATELLITE LASER RANGING DATA

We present a new software, *KyivGeodynamics++*, for the processing of Earth's satellite laser ranging data. The software architecture and the procedure for dynamical compilation of the model base are described. The models used in the software are considered in detail.