

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ І ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 681.3

ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ НА ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦІЙНІЙ СТАНЦІЇ “ЛЬВІВ-1831”

С. Апуневич, А. Білінський, С. Апуневич, Я. Благодир

*Львівський національний університет імені Івана Франка
Астрономічна обсерваторія
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів
slr1831@ukr.net*

Лазерна локація штучних супутників Землі (Satellite Laser Ranging (SLR)) – один з найважливіших методів геодезичних та геофізичних досліджень. Спостереження в лазерній локації полягає у вимірюванні відрізка часу, протягом якого надкороткий лазерний імпульс подорожує від наземної станції до супутника та у зворотному напрямі (віддалеметрія). Станція лазерної локації Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка належить до Міжнародної служби лазерної локації під кодом “LVIL-1831”.

Для первинного опрацювання результатів спостережень використовують стандартний алгоритм Ермонсо (Herstmonceaux), який зазначає порядок отримання зі спостережень і теоретичних передбачень для орбіт супутників (ефемерид) результатів у вигляді так званих нормальних точок, які пересилають у міжнародні центри опрацювання даних. Донедавна на станції “Львів-1831” використовували закриті програмне забезпечення, яке постачав виробник апаратного комплексу. З огляду на зміни у форматах вхідних і вихідних даних, зміни і модернізацію приймальної апаратури виникла потреба розробки власного програмного комплексу, що складається з системи керування телескопом у реальному часі, системи реєстрації та первинного опрацювання.

Для первинного опрацювання даних автори розробили програму під кодовою назвою NoPo. У ній використано новітні методи інтерполяції та апроксимації, а також методи аналізу часових рядів, статистичної фільтрації. Програма є вільним програмним забезпеченням, реалізована мовою С для платформи на базі ОС Linux.

Ключові слова: лазерна локація штучних супутників Землі, лазерний імпульс, первинне опрацювання, інтерполяція, апроксимація.

У 2002 р. Львівська станція лазерної локації штучних супутників Землі “Львів” була введена до мережі Міжнародної служби лазерної локації (International Laser Ranging Service, ILRS) [2]. Із того часу результати всіх спостережень після первинного опрацювання відправляють у міжнародний центр збирання й опрацювання даних Європейської гілки ILRS — Eurolas Data Center (EDC) при інституті DGFІ у Мюнхені,

Німеччина. Також дані передають в Український центр параметрів обертання Землі при Головній астрономічній обсерваторії НАН України у м. Києві.

Служба ILRS приймає в мережу станції, що відповідають певним критеріям щодо точності вимірювань та формату вхідних і вихідних даних. Окрім спостережень, до вхідними даними у лазерній локації є передбачення щодо орбіти супутників (ефемериди). Із 30 червня 2006 р. попередній формат вхідних даних (Tuned Inter-Range Vector, TIRV) визнано застарілим і введено новий формат масиву даних передбачень (Consolidated Prediction Format, CPF). Нещодавно також змінено формат вихідних даних на новий (Consolidated Laser Ranging Data, CRD). Унаслідок цих змін виникла потреба в модернізації і навіть докорінній зміні програмного забезпечення для первинного опрацювання даних. На станції “Львів” використовують пакет програм, який постачав у вигляді двійкових виконавчих файлів для MS DOS Латвійський університет разом з комплексом приймальної апаратури понад 10 років тому [3, 4].

Сам алгоритм обчислення нормальних точок з вимірювань відрізків часу, протягом яких лазерний імпульс повертається відбитим від супутника та його реєструє приймальна апаратура не означений у формі чіткого стандарту. Як стандартний ILRS рекомендує алгоритм, запропонований у 1984 р. на міжнародній нараді в Англії, обсерваторія в Ермонсо (Herstmonceux) [1], який і отримав відповідну назву. Цей алгоритм реалізують самостійно станції, проте у повністю відкритому доступі такого програмного забезпечення немає.

Результати вимірювань, виконуваних на Львівській лазерно-локаційній станції (ЛЛС), відповідають вимогам ILRS щодо точності. Щоб відповідати також стандартам ILRS для форматів вхідних і вихідних даних, вирішено реалізувати пакет програм первинного опрацювання “з нуля”.

Вхідні дані у форматі CPF мають вигляд табульованих із певним фіксованим інтервалом значень передбачуваної орбіти супутника в земній барицентричній системі координат, реалізацією якої є система відліку ITRF (International Terrestrial Reference Frame) з декартовими координатами x, y, z . Перед даними подають заголовок з інформацією про супутник, часовий проміжок, поправки тощо. Наприклад:

```

H1 CPF 1 HTS 2007 11 29 12 8331 ajisai NONE
H2 8606101 1500 16908 2007 11 29 0 0 0 2007 12 04 0 0 0 240 1 1 0 0 0
H5 1.0100
H9

10 0 54432 85200.00000 0 -1662596.064 -6144358.151 -4613345.826
10 0 54432 85440.00000 0 -266985.897 -5764120.358 -5340434.965
10 0 54432 85680.00000 0 1158259.635 -5164130.172 -5816055.583
10 0 54432 85920.00000 0 2553843.728 -4372622.231 -6018061.085
10 0 54432 85920.00000 0 2553843.728 -4372622.231 -6018061.085
10 0 54432 86160.00000 0 3860845.091 -3424600.602 -5937158.074

```

Власне результати спостережень виводять у файли, що містять результати калібрування по мішені та результати вимірювань часу поширення надкороткого лазерного імпульсу від передавача до приймача (враховуючи відбивання від супутника). Наприклад, результати калібрування по мішені на ЛЛС “Львів” мають вигляд

```

8606101
2007-11-29
0
5.1
40
760

15993.200498000 71347.5 71347.5
15993.400498400 142592.5 102.5
15993.600498000 142624.5 134.5
15993.800497200 142517.0 242.0

```

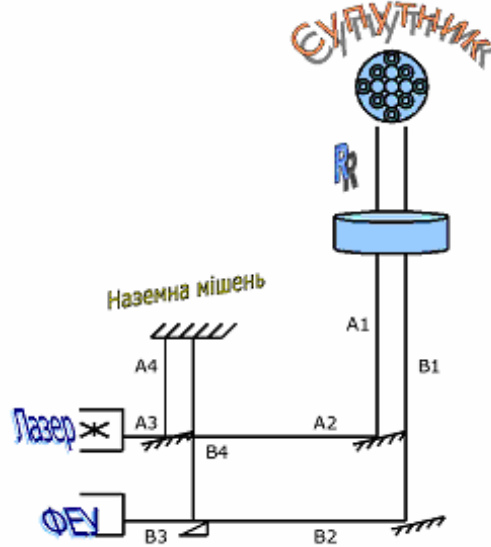


Рис. Врахування часу ходу променя в оптичній системі телескопа

Для подальших обчислень нам необхідно знайти середнє значення калібрування i , враховуючи оптичний шлях у системі (рисунок), визначити електронну затримку апаратури, обчислити реальний час прольоту до супутника і назад. Відстань від головного дзеркала до наземної мішені (калібрування) $R_{\text{мішень}} = 30,242\text{м}$. Час проходження променя від джерела через оптичну систему з врахуванням електронної затримки d

$$T_{\text{супутн}} = (R + A_1 + A_2 + A_3 + B_1 + B_2 + B_3) / c + d, \quad (1)$$

де R – відстань до супутника; A_i , B_i – відстані як позначено на рисунку. Під час калібрування сигнал проходить оптичну систему телескопа за час

$$T_c = (A_3 + A_4 + B_3) / c + d. \quad (2)$$

Справжній час, за який імпульс досягає супутника і повертається для детектування у приймальний блок, наносекунди:

$$T_{\text{спр}} = T_R + 69\text{нс} - \langle T_c \rangle,$$

де T_R – час поширення лазерного променя до супутника і назад; $\langle T_c \rangle$ – середнє значення часу калібрування. Приклад файлу із даними спостережень супутника:

```

8606101
2007-11-29
0
5.1
40
760

16170.200501600    19380964604.0    -43.0
16170.400499200    19374201186.5    -64.5
16170.600500000    19367439130.0    -23.0
16170.800498800    19360678774.0    -32.0
16171.400499600    19340398059.0     8.0
...

```

За цими даними обчислюють нормальні точки, згідно з кроками алгоритму Ермонсо.

1. Обчислення лишків (відхилів) передбачень (prediction residuals) $PR = O - P$, де O – масив спостережуваних даних; P – масив передбачень на моменти спостережень. Для визначення PR треба звести передбачення і спостереження до спільної системи лічби часу в секундах від епохи початку CPF. Наступний крок – інтерполяція геоцентричних положень супутника (файл CPF) на моменти спостережень (пострілу), для цього використовують поліноміальну інтерполяцію за Лагранжем. Для обчислення передбачень часу поширення лазерного імпульсу з наземної станції до супутника і назад використовують геоцентричні (ITRF) координати станції та проінтерпольовані геоцентричні (ITRF) передбачувані координати супутника; ITRF має декартову систему координат. Отже, відстань від станції до супутника на момент пострілу визначають за такими простими співвідношеннями:

$$D(i) = \sqrt{\Delta X^2(i) + \Delta Y^2(i) + \Delta Z^2(i)},$$

$$\Delta X(i) = X_{\text{передбачень}}(i) - X_{\text{станції}},$$

$$\Delta Y(i) = Y_{\text{передбачень}}(i) - Y_{\text{станції}},$$

$$\Delta Z(i) = Z_{\text{передбачень}}(i) - Z_{\text{станції}},$$

де $X_{\text{станції}}, Y_{\text{станції}}, Z_{\text{станції}}$ – координати станції в системі ITRF, $X_{\text{передбачень}}(i), Y_{\text{передбачень}}(i), Z_{\text{передбачень}}(i)$ – передбачувані геоцентричні координати супутника. Враховують коефіцієнт – поправку на центр мас супутника: $D_{\text{реал}}(i) = D(i) - \text{коэф.}$, та обчислюють передбачуваний час поширення лазерного променя до супутника і назад: $P(i) = 2 * D_{\text{реал}}(i) / c$ (c – швидкість світла у вакуумі).

За цим означенням обчислюють лишки передбачень $PR = O - P$.

2. Усунення великих викидів (вікно). На цьому етапі відкидають дані, що не потрапляють у вікно 2σ , яке визначають за стандартними формулами статистики для ряду величин x_1, \dots, x_N :

$$\sigma(x_1, \dots, x_N) = \sqrt{\text{Var}(x_1, \dots, x_N)};$$

$$\text{Var}(x_1, \dots, x_N) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2;$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j.$$

3. Обчислення $f(PR)$ – функції тренду для часового ряду лишків передбачень. Загалом методи статистики пропонують широкий набір засобів визначення функції тренду. Ми використали найпростіший з них – апроксимацію функцією загального вигляду, а конкретно – лінійною комбінацією поліномів Чебишова. Для цього використано готову програму з книги [5]. Стандартне формулювання алгоритму Ермонсо не дає конкретних рекомендацій щодо функції тренда, лише зазначає, що ця функція не повинна осцилювати. Отже, лінійна комбінація із поліномів Чебишова третього–четвертого порядку дає цілком задовільний результат.
4. Обчислення лишків апроксимації (fit residuals) $FR = PR - f(PR)$. На цьому кроці оцінюють середньоквадратичний розкид лишків апроксимації та знову (як у кроці 2)

відкидаються точки, які випадають поза наперед означене вікно у середньоквадратичних відхиленнях ($n = 2,5$ або $n = 3,0$).

5. Повторення пунктів 3 та 4 до досягнення збіжності. Це, можливо, найменш чітко сформульований крок в алгоритмі. В інших реалізаціях цей процес виконують вручну чи напіввручну з візуальним контролем. Точки відкидають, доки не буде досягнуто максимальної близькості розподілу залишених точок до нормального. Сьогодні ми ще в пошуках такого варіанта фільтрування точок і досягнення збіжності, який міг би автоматично усувати викиди, не втрачати корисної інформації та не призводити до переоцінки точності.
6. Наступні кроки формують масив нормальних точок. Часовий ряд лишків апроксимації розбивають на інтервали, у кожному з них обчислюють середнє значення лишків апроксимації $\langle FR \rangle_i$ і середню епоху; визначають найближчі до середньої епохи спостережувану точку O_i та лишок FR_i ; обчислюють нормальну точку за формулою: $NP_i = O_i - FR_i + \langle FR \rangle_i$, обчислюють середньоквадратичне

$$\text{відхилення для кожного інтервалу: } RMS_i = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_j (FR_j - \langle FR \rangle_i)^2}.$$

Цей алгоритм реалізували на мові програмування С [6], пакет програм отримав назву NoPo. Тестували програму за даними локації супутника Ajisai. В таблиці наведено результати попереднього опрацювання даного супутника з використанням старої програми SatCom та нової програми NoPo.

Таблиця

Результати попереднього опрацювання результатів спостережень з використанням програми SatCom та нової програми NoPo

SatCom T, pc	NOPO T, pc	SatCom NP, pc	NOPO NP, pc	SatCom RMS, pc	NOPO RMS, pc
16186000498	16194200501	18849277032	18575684817	400	583
16214800500	16224200501	17895586671	17589187554	420	528
16246000501	16254600502	16888720781	16616804607	395	475
16275800501	16284200500	15957918935	15701912282	376	466
16304600502	16314200503	15092998079	14813478167	416	525
16333400502	16344400501	14268986713	13966766114	404	585
16363800500	16374200503	13452494561	13187705233	391	557

Наприклад, унаслідок обробки ми одержали сім нормальних точок. На цьому етапі розробки програми таку точність можна вважати допустимою, ведуть подальшу роботу в напрямі заміни деяких підпрограм на ефективніші, особливо це стосується фільтрації даних.

Отже, ми реалізували алгоритм, запропонований ILRS. На відміну від програми попереднього опрацювання, яку ми використовували досі, нова програма “відкрита” в сенсі відкритих вихідних текстів, що дає змогу моментально реагувати на нові пропозиції з боку Міжнародної служби лазерної локації, а також адаптувати її до потреб інших станцій. Програма працює під операційною системою Linux. Це зроблено також для спрощення роботи спостерігача та автоматизації всього процесу спостереження.

Нова програма має стати доповненням до вже наявних програм, які використовують під час підготовки, ведення та опрацювання даних на ЛЛС “Львів”.

1. *Алгоритм Ермонсо*. Доступно з http://ilrs.gsfc.nasa.gov/products_formats_procedures/normal_point/np_algo.html
2. *International Laser Ranging Service*. Доступно з: <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>.
3. *Pavenis A.* SLR telescope support software // Astronomical Observatory University of Latvia, Sep.1997.79 p.
4. *Безпалько В.А. и Рыбаков А.С.* Система измерения и компьютерной обработки сигналов лазерного импульсного дальномера // Институт электроники и вычислительной техники Латвийского ун-та. 19 с. Доступно з: <http://www.edi.lv>.
5. *William H.* Numerical Recipes in C. Press // Cambridge University Press. New York. 1997. 994 p.
6. *Прага С.* Язык программирования C // Москва, Санкт-Петербург, Киев. 2002. 883 с.

PROCESSING OF OBSERVATION DATA FOR ARTIFICIAL EARTH SATELLITES AT THE SATELLITE LASER RANGING STATION “LVIV-1831”

S.V. Apunevych, A.I. Bilinsky, S.Ye. Apunevych and Ya.T. Blagodyr

*Astronomical Observatory, Ivan Franko National University of Lviv
8 Kyrylo and Mefodiy St., 79005 Lviv, Ukraine
slr1831@ukr.net*

Satellite Laser Ranging (SLR) appears to be one of the most important techniques for geodesic and geophysical explorations. An observation in frame of the SLR represents measurements of the time intervals needed for ultra-short laser pulse to pass from Earth-based station to the satellite and back, which is the essence of solving any ranging problem. The SLR-station of Astronomical Observatory (Ivan Franko National University of Lviv) is included to the International Laser Ranging Service under the code ID “LVIL-1831”. For the initial data processing, a standard Herstmonceux algorithm is used. It defines the order for calculating so-called normal points from the observations and theoretical predictions for satellite orbits, to be directed to the international data centers. Till recently, the SLR-station “LVIV-1831” has used the software supplied by producer of the hardware, with the closed code. The changes in the input and output data formats, as well as upgrades of the receiving equipment have raised a necessity for development of original software bundle, to include the real-time guiding system, the detection system, and the data processing one. For the data processing the authors have developed a computer program under the codename NoPo. It uses novel methods for interpolation and fitting, time-series analysis and statistical filtering. The software is a shareware implemented in the programming language C for Gnu/Linux platform.

Key words: satellite laser ranging, laser pulse, data processing, numerical methods.

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ
ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ НА ЛАЗЕРНО-
ЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ “ЛЬВОВ-1831”**

С.В. Апунович, А.И. Билинский, С.Е. Апунович, Я.Т. Благодир

*Астрономическая обсерватория
Львовского национального университета имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия, 8, 79005 г. Львов
slr1831@ukr.net*

Лазерная локация искусственных спутников Земли (*англ.* SLR, Satellite Laser Ranging) – один из важнейших методов геодезических и геофизических исследований. Наблюдения в лазерной локации заключаются в измерении промежутка времени, необходимого сверхкороткому лазерному импульсу для преодоления расстояния от наземной станции к спутнику и назад (дальнометрия). Станция лазерной локации Астрономической обсерватории Львовского национального университета имени Ивана Франко входит в Международную службу лазерной локации (ILRS) под кодом “LVIL-1831”. Для первичной обработки результатов наблюдений используется стандартный алгоритм Эрмонсо (Herstmonceaux), который определяет порядок получения из наблюдений и теоретических предсказаний для орбит спутников (эфемерид) результатов в форме так называемых “нормальных точек”, которые пересылаются в международные центры обработки данных. Еще недавно на ЛЛС “Львов-1831” использовалось закрытое программное обеспечение. В связи с изменениями в форматах входных и исходных данных, заменами и модернизацией приемной аппаратуры возникла необходимость разработки собственного программного комплекса, который состоит из системы управления телескопом в реальном времени, системы регистрации и первичной обработки результатов. Для первичной обработки данных авторами разработана программа под кодовым названием NoPo. В ней используются новейшие методы интерполяции и аппроксимации, а также методы анализа временных рядов и статистической фильтрации. Программа является свободным программным обеспечением. Она реализована на языке C для платформы на основе ОС Linux.

Ключевые слова: лазерная локация искусственных спутников Земли, лазерный импульс, первичная обработка, интерполяция, аппроксимация.

Стаття надійшла до редколегії 11.05.2009

Прийнята до друку 30.06.2009