

АВТОМАТИЗАЦІЯ АСТРОМЕТРИЧНОЇ ОБРОБКИ, ОТОТОЖНЕННЯ ЗІРОК НЕГАТИВА В МЕТОДІ ТЕРНЕРА ДЛЯ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ ОБ'ЄКТІВ

В.У.Клімич

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул.Волошина, 54

Розглядається питання автоматизації обробки результатів спостережень геосинхронних об'єктів в лабораторії космічних досліджень УЖДУ і завершальний її етап: створення підпрограми вибору опорних зірок негатива з електронної версії зоряного каталога PPM для епохи 2000,0.

Вступ

Геостаціонарні супутники обертаються навколо Землі в площині екватора з кутовою швидкістю, що співпадає з швидкістю добового обертання Землі. Радіус такої колової орбіти $r \approx 6,61069 \cdot a_e$ (a_e – екваторіальний радіус Землі).

Більшість супутників, що запускаються на геостаціонарну орбіту, знаходяться в вузькій зоні (діаметром ~ 150 км), що оточує ідеальну геостаціонарну орбіту. Відслідковувати стан цієї зони особливо важливо, так як там знаходиться велика кількість супутників зв'язку, навігаційних і ін. (керованих і пасивних) супутників. Є цілий ряд так званих зон “колокації”: в довготних вікнах радіусом $0,1^\circ$ (75 км довжини геостаціонарної орбіти) спостерігається від 2 до 8 супутників.

Служба Контролю Космічного Простору Росії регулярно проводить каталогізацію геосинхронних об'єктів. Від України до цієї служби входить лише пункт Ужгород. Це найзахідніший пункт Служби і західну ділянку зони можна контролювати тільки з Ужгорода. Спостереження в Ужгороді ведуться, в основному, в діапазоні $-30^\circ < \lambda < 30^\circ$ (λ – географічна довгота підсупутникової точки) на камері SBG [1]. Дослідження зони геостаціонарних об'єктів в лабораторії космічних досліджень (ЛКД) проводиться в співробітництві з ГАО НАНУ (Київ) [1,2].

Характеристика масиву результатів вимірювань.

Автоматизація процесу обробки результатів спостережень геостаціонарних об'єктів в ЛКД розпочалася в 1995 році для госпдоговору «Сеть-3» (керівник А.Г.Кириченко). Для обробки почав використовуватися комп'ютер IBM. З Москви були доставлені плата до комп'ютера і відповідна програма, яка виміри “Аскорекорда” (спеціального вимірювального приладу) переводила в цифрову форму і заносила в комп'ютер. Одержаний масив даних – це прямокутні координати x, y на негативі, виражені в мм з точністю 5 нм (це відповідає 2,5 м довжини на геостаціонарній орбіті). Розміри негатива: 12см×9см. Він охоплює ділянку зоряного неба розміром $8^\circ \times 6^\circ$. За один здвоєний сеанс спостережень (дві ночі спостережень з інтервалом 1-2 дні) одержують біля 50 знімків (кожна ділянка геостаціонарної зони є на 4 негативах). На кожному негативі є зображення 3-11 супутників. Для визначення точних координат цих супутників на негативі вибирають 20-30 опорних зірок, координати яких α, δ (і координати швидкості власних рухів) є в зоряних каталогах. Вже по одному негативу програми дають можливість визначити орбіту супутника: процес фотографування проводиться так, що на негативі отримується по 3 зображення кожного

супутника і по 4 зображення кожної зірки. Вимірювання координат кожного положення на "Аскорекорді" проводиться двічі. Отже, з кожного негатива одержується числовий масив розмірністю 400-600 значень.

Програма "Усереднення"

Після закінчення вимірювання негатива запускається спеціальна програма, яка (1) усереднює кожні 2 виміри, (2) проводить пошук можливих помилок вимірювань, (3) приводить масив у формат, зручний для користування.

Пошук помилок проводиться за двома критеріями. (1) Різниця між двома вимірами кожного положення не повинна перевищувати 0,01 мм. (2) Так як при фотоз'йомці відповідні зображення всіх зір одержуються одночасно, то різниця координат двох сусідніх положень (1-2, 2-3, 3-4) для двох зір (n -ої і $n+1$ -ої) не повинна перевищувати 0,15 мм ($d^2x < 0,15$ мм, $d^2y < 0,15$ мм). Досить великі допустимі різниці d^2x , d^2y можуть бути зумовлені різними рефракцією, дисторсією і ін. для двох різних зірок і їх положень. Поправки за рефракцією, дисторсією і т.д. вводяться в методи Тернера.

Програма "Метод Тернера"

Метою спостережень геостаціонарних об'єктів є одержання точних координат супутників. Їх обчислення можна проводити за методом Тернера. Для створення відповідної програми був використаний з деякими змінами алгоритм для програми методу Тернера для низькоорбітальних супутників. Процес обчислення для одного негатива на комп'ютері IBM тривав декілька хвилин (без врахування вводу опорних зірок). За кошти договору-контракту по цій же тематиці "Сеть-3" (Росія, Москва) було закуплено комп'ютер PENTIUM і ін комп'ютерну техніку. Процес обчислення прискорився на порядок.

Для визначення екваторіальних координат α , δ супутників програма виводить з файла масив прямокутних координат x , y опорних зірок і супутників (що є результатом роботи програми "Усереднення"), а також використовує координати α , δ опорних зірок. Далі потрібно виконати наступні досить трудомісткі операції: (1) знайти опорні зірки негатива на зоряній карті; (2) виходячи з координатної сітки карти, знайти ці зірки в зоряному каталозі (використовувався каталог SAO [3] на епоху 1950,0); (3) виписати з каталога координати α , δ опорних зірок і координати μ_α , μ_δ швидкостей їх власних рухів; (4) ввести ці дані в комп'ютер.

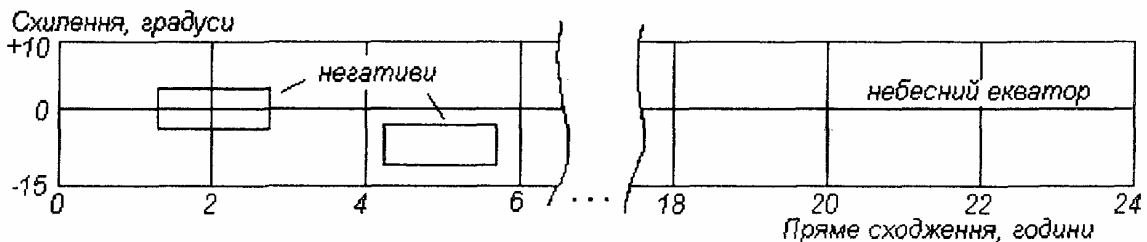


Рис. 1. Екваторіальна зона зоряного каталогу PPM.

Для завершення автоматизації математичної обробки спостережень залишалось запрограмувати цей процес виборки опорних зірок з зоряного каталогу. Для цього була придбана (в ГАО НАНУ) електронна версія зоряного каталогу PPM на епоху 2000.0 [4]. Він містить більше зірок, ніж каталог SAO. В пам'ять комп'ютера IBM було введено екваторіальну зону каталогу ($-15^\circ < \delta < 10^\circ$), що зайняло 10 мегабайт пам'яті. Несиметричність зони по δ пояснюється тим, що з широти Ужгорода ($\varphi \approx 48,5^\circ$) геостационарну орбіту видно під кутом $\sim 7^\circ$ до екваторіальної площини. Вся екваторіальна зона каталогу (за спеціально складеною програмою) була розбита на 24 області розміром $2^h \times 10^\circ$ або $2^h \times 15^\circ$ (рис.1) і розміщена відповідно в 24 файлах.

Підпрограма вибору опорних зірок з каталогу

Для ототожнення опорних зірок підпрограма використовує такі дані: (1) прямокутні координати x_0, y_0 оптичного центру негатива, (2) екваторіальні координати α_0, δ_0 оптичного центру, (3) номер однієї довільної опорної зірки негатива по каталогу SAO.

I. На негативі (рис.2) знаходяться зорі, що містяться в прямокутнику з вершинами A ($\alpha_0 - 3^\circ, \delta_0 - 4^\circ$), C ($\alpha_0 + 3^\circ, \delta_0 + 5^\circ$).

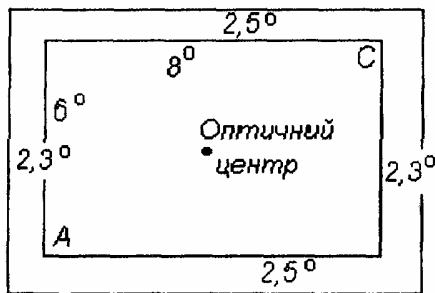


Рис.2. Область f_i зоряного неба, яка містить всі зорі негатива.

Так як точність $x_0, y_0, \alpha_0, \delta_0$ невелика, то розмір прямокутної області, в якій можуть бути зірки негатива, потрібно розширити

на $2,3^\circ - 2,5^\circ$, так що ця область (позначимо її через f_i) має розміри $13^\circ \times 10,6^\circ$. Зорі цієї області, як це видно на рис.1, можуть знаходитись в 1, 2 або 4 файлах (у відповідних областях каталогу). Пошук цих файлів здійснюється шляхом порівняння координат α, δ вершин розширеної області негатива f_i з координатами вершин 24 областей каталогу.

II. На другому етапі з цих файлів (або файла) вибираються лише ті зорі, які знаходяться в області f_i і заносяться у файл f_i , який буде робочим для пошуку опорних зірок.

III. Перехід від прямокутних координат x, y (в мм) до екваторіальних координат α, δ (в мінутах дуги) з деяким наближенням можна, очевидно, проводити за формулами:

$$\alpha = m \cdot (x - x_0) + \alpha_0, \delta = -m \cdot (y - y_0) + \delta_0,$$

де $x_0, y_0, \alpha_0, \delta_0$ – координати оптичного центру в різних системах (від'ємний знак в δ зв'язаний з відповідною методикою спостережень), m – масштаб негатива,

$$m = \frac{8 \cdot 60'}{120} \text{ мм}^{-1}$$

Таким способом визначаються наближені значення координат α_i'', δ_i'' опорних зірок.

IV. За даним номером по каталогу SAO однієї довільно вибраної опорної зірки програма веде пошук цієї зірки в каталозі PPM (в тій його частині, що увійшла в файл f_i). Виводяться координати цієї зірки α_z, δ_z . Обчислюються поправки $\Delta\alpha = \alpha_z - \alpha_z'', \Delta\delta = \delta_z - \delta_z''$ до координат, обчислених в п.III. Тут α_z'', δ_z'' – визначені в п.III координати вибраної зірки. Поправки $\Delta\alpha, \Delta\delta$ використаємо для уточнення координат:

$$\alpha_i' = \alpha_i'' + \Delta\alpha,$$

$$\delta_i' = \delta_i'' + \Delta\delta, i = 1, 2, \dots, n,$$

n – кількість опорних зірок на негативі.

V. Для кожної опорної наближено обчисленої в п.IV зірки будується круг радіусом $1^m (=15')$ з центром в опорній зірці (рис.3).

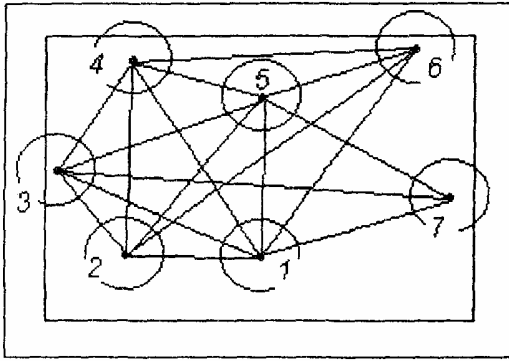


Рис.3. Схема пошуку каталожних опорних зірок

В кожному такому крузі з центром в (α_i', δ_i') знаходиться декілька зірок $(\alpha_{ij}, \delta_{ij})$ з каталога PPM (файла *ft*). Програма проводить виборку цих зірок. Серед каталожних зірок $(\alpha_{ij}, \delta_{ij})$ є опорна зірка (α_i, δ_i) , наближені координати якої α_i', δ_i' .

VI. Пошук зірок (α_i, δ_i) , $i = 1, \dots, n$, проводиться за двома критеріями. Перший, більш строгий, критерій застосовується до перших 5 опорних зірок. Порівнюються всі можливі конфігурації 5 каталожних зірок (з різних 5 перших кружків) з конфігурацією 5 наближено обчислених зірок (α_i', δ_i') , $i = 1, \dots, 5$. Для кожної конфігурації обчислюються відстані d_k між кожними двома зірками. Таких відстаней буде 10. З усіх конфігурацій каталожних зірок вибирається та, яка найближча до конфігурації наближених зірок (α_i', δ_i') . Мірою близькості є середнє квадратичне відхилення

$$\sigma^2 = 0,1 \cdot \sum_{k=1}^{10} (d_k - d_k')^2.$$

Каталожні зірки (α_i, δ_i) , $i = 1, \dots, 5$, для яких σ^2 мінімальне, вважаються опорними; їх наближені значення: (α_i', δ_i') .

Розрахунки за цим критерієм вимагають багато комп'ютерного часу, так як кількість конфігурацій досить велика, і їх кількість різко зростає при збільшенні кількості зірок в конфігурації. Тому пошук слідує каталожних опорних зірок ($i > 5$) проводиться за іншим, менш строгим критерієм. Для кожної зірки в околі (α_i', δ_i') , $i > 5$, порівнюються значення

$$\bar{\sigma}^2 = 0,2 \cdot \sum_{k=1}^5 (d_k - d_k')^2,$$

де d_k' – відстань між наближеною зіркою (α_i', δ_i') і знайденою каталожною опорною зіркою (α_j, δ_j) ; d_k – відстань між каталожною зіркою з околу (α_i', δ_i') і тією ж опорною зіркою (α_j, δ_j) .

Процес пошуку опорних каталожних зірок тривав на комп'ютері IBM біля 3 хвилин, на комп'ютері PENTIUM – декілька секунд.

Другий критерій (при визначенні координат останніх супутників негатива) міг не спрацювати (приблизно в 1 негативі з 10). Тоді перші, вже використані, зірки відкидалися, і останні ставали першими – до них застосовувався перший більш строгий критерій, який не дає збоїв.

Якщо по якійсь причині опорної зірки в файлі *ft* немає (можливо, взагалі її в каталозі немає), тоді подається сигнал: “*n*-на зірка не знайдена”. Слід продовжити програму, а цю зірку (на її місці стоять нулі) не використовувати.

Час математичної обробки негатива, точність обчислень, заключний етап

Обчислення координат супутника за програмою “Метод Тернера” з використанням підпрограми вибору опорних зірок з каталогу (включаючи час роздруковки результатів) триває ~3 хвилини для одного негатива і ~5 хвилин, якщо слід повторити перший критерій для останніх зірок. (Розрахунки проводяться лише на комп'ютері PENTIUM).

Точність результатів обчислень не перевищує 1" (що відповідає відстані <200м на геостационарній орбіті). Для контролю точності визначення координат супутника використовуються також контрольні зірки: одночасно з обчисленням координат супутника обчислюються координати опорної зірки, яка знаходиться на негативі не далеко від супутника, і порівнюються обчислені координати зірки з її каталожними координатами. Різниця цих розходжень і

обчислених за нев'язками похибок незначна.

Останнім етапом математичної обробки результатів спостережень (необхідним для каталогізації об'єктів) є обчислення елементів орбіт геостаціонарних об'єктів. Нами (Кириченко А.Г., Климик В.У.) був розроблений метод визначення елементів орбіт геостаціонарних супутників, складена відповідно програма [5,6]. Особливість його в тому, що вже по двох зображеннях на одному негативі досить добре визначаються елементи орбіти, по яких можна ототожнити об'єкт, присвоїти йому номер відповідно до міжнародних каталогів геостаціонарних об'єктів.

Введення автоматизації астрометричної обробки, перехід на епоху 2000.0 значно прискорив процес обробки результатів спостережень, вивчення зони геостаціонарних супутників, підвищив якість досліджень.

На закінчення хотів би подякувати ст.н.сп., канд.техн.н. Кириченко А.Г. за співробітництво і сприяння при складанні програм і підпрограм, за постановку задачі і цінні зауваження при написанні статті.

1. Kizyun L.M., Kirichenko A.G., Rudenko S.P., Demchyk M.I., Klimik V.U., Kudak K.A., Matso G.M., Starodubtseva O.E. Додаток до журналу Космічна наука і технологія. Київ, N 1, т.4, 1998, 52с.

2. Kirichenko A.G., Kizyun L.M., Demchyk M.I., Klimik V.U., Kudak K.A., Matso G.M. Web site:

http://www.mao.kiev.ua/ast/geo3_txt.htm, 2000г.

3. Smithsonian astrophysical observatory Star Catalog. Washington, D.C., 1966, v.I-IV.

4. Bastian U., Roeser S. Positions and Proper Motions of 197179 stars south of -2.5 degrees declination for equinox and epoch J2000.0. Heidelberg-Berlin-New York, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1993, v.3-4.

5. Кириченко А.Г., Климик В.У. Набл. иск. небес. тел, №88, М., 1994, с.36-38.

6. Кириченко А.Г., Климик В.У. Деп. в ГНТБ Укр. №1487-Укр93, 14.07.1993г., 13с.

AUTOMATISATION OF ASTROMETRIC PROCESSING, IDENTIFICATION OF STARS OF A NEGATIVE IN TURNER METHOD FOR GEOSTATIONARY OBJECTS.

V.U.Klimik

Uzhgorod State University, 88000, Uzhgorod, Voloshin, 54

The problem of automation of results processing of observations of geosynchronous objects in laboratory of space researches Uzhgorod University is considered. Also is considered the final step of automatization: creation of subprogram of choice of basic stars of a negative from electronic version of star catalogue PPM for epoch 2000,0.



Володимир Улянович Клімик – науковий співробітник відділу космічних досліджень ПНДЛ фізичної електроніки.

Народився в 1940 році. Закінчив фізико-математичний факультет УжНУ в 1963 році.