Вісник Астрономічної школи
Astronomical School's Report

ISSN 2411–6602 (Online)
ISSN 1607–2855 (Print)
Том 13 • № 1 • 2017 С. 22 – 27
Методична стаття

УДК 523.68; 520.373; 521.95; 521.96

Застосування статистичних методів при обробці телевізійних спостережень метеорів

П.М. Козак

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 04053, м. Київ, вул. Обсерваторна, 3

Приведено ідею та приклади реалізації застосування статистичного підходу для обчислення кінематичних параметрів метеора при базисних телевізійних спостереженнях. Даний підхід включає генерацію випадкових чисел у відповідності до статистичних розподілів виміряних екваторіальних координат метеора та дозволяє побудувати відповідні розподіли для всіх шуканих кінематичних параметрів космічної частинки. Отримані статистичні розподіли кінематичних характеристик метеора можуть бути використані не лише для встановлення похибок обчислюваних параметрів, але і уточнення їх середніх значень.

Ключові слова: метеори; кінематика метеорів; телевізійні спостереження метеорів; статистична обробка даних.

1. ВСТУП

Опрацювання двох зображень одного і того ж метеора, отриманого одночасно двома камерами, дає змогу отримати його повні кінематичні характеристики. Процедура кінематичної обробки метеорних зображень, яку ми розглядаємо в даній роботі, складається з двох основних етапів. Перший етап — це астрометрична обробка кадрів, результатами якої є отримання ряду екваторіальних координат (прямого сходження та схилення) голови метеора для кожного кадру з відомим моментом часу [3]. Другий етап — обчислення параметрів траєкторії метеора в атмосфері Землі, включаючи його швидкість і координати радіанту, та насамкінець елементів геліоцентричної орбіти метеороїда [4]. Початковими параметрами для другого етапу є отримані в результаті астрометричної обробки екваторіальні координати голови метеора та відповідні їм моменти часу, включаючи додаткові параметри, такі як дата спостереження, геодезичні координати спостережних станцій та ряд відомих констант.

Проблемою такого класичного підходу є невизначеність довірчих інтервалів, що характеризували б точність параметрів, обчислених таким чином. Найбільш поширеним підходом були теоретичні оцінки похибок деяких кінематичних параметрів, наприклад висот, швидкостей та екваторіальних координат радіанту, що брали за основу оптичні та геометричні характеристики спостережної апаратури [6]. Однак такі оцінки давали деякі середні значення похибок для вибраних параметрів, в той час як похибки обчислення параметрів кожного індивідуального метеора залишалися невідомими. Серед причин, які впливають на похибки кінематичних параметрів метеора, можна умовно виділити три основних. Перша причина — характеристики спостережної апаратури, такі як роздільна здатність (розмір пікселя); рівень геометричних дисторсій, що є найбільшим для телевізійних трубок з переносом електронного зображення; рівень шумів (флуктуацій) зображення, що заважають визначати положення голови метеора та ін. Друга причина — коректність та точність вибраного методу для обчислення кінематичних параметрів метеора (в нашому випадку ми використовуємо оригінальний метод, описаний в [4]). І насамкінець, найважливіша причина виникнення похибок в самому метеорі, в основному, в його траєкторії. Очевидно, похибка визначення координат радіанта буде необмежено збільшуватись, коли метеор рухається в напрямку на одну з камер. Великі похибки в радіанті автоматично призводять до похибок у визначенні модуля швидкості метеора. Крім того, похибка визначення модуля швидкості пропорційна самому значенню швидкості метеора.

Існує і ряд інших причин, які вказують на те, що неможливо обрахувати похибки визначення кінематичних параметрів індивідуального метеора класичними методами. Однак використання регресійного аналізу, що базується не методі найменших квадратів, підказує ідею для реалізації задачі строгого обчислення похибок кінематичних параметрів кожного метеора. Для пояснення розглянемо початкову фазу обчислень кінематичних параметрів метеора, а саме астрометричні редукції.

2. АСТРОМЕТРІЯ: ТОЧНІСТЬ ОБЧИСЛЕННЯ ЕКВАТОРІАЛЬНИХ КООРДИНАТ МЕТЕОРА

При обчисленні екваторіальних координат метеора ($\alpha_{Mi};\delta_{Mi}$) в деякому i-му кадрі використовуються, як правило, опорні зірки. Класична астрометрична редукція починається з переведення екваторіальних

Козак Павло Миколайович; ✉ kpm_ao@ukr.net

координат N_* опорних зір $(\alpha_{*l};\delta_{*l})$, $l=\overline{1,N_*}$ в ідеальну систему координат $(\xi_{*l};\eta_{*l})$ з використанням наближених значень екваторіальних координат оптичного центру кадру $(\alpha_{OC};\delta_{OC})$ за класичними формулами [5]. В загальному випадку маємо $\xi=\xi(\alpha,\delta,\alpha_{OC},\delta_{OC})$, $\eta=\eta(\alpha,\delta,\alpha_{OC},\delta_{OC})$, де функції ξ і η мають вигляд

$$\xi=\frac{1}{Z_D}\cos\delta\sin(\alpha-\alpha_{OC}),\tag{1}$$

$$\eta=\frac{1}{Z_D}\left(\sin\delta\cos\delta_{OC}-\cos\delta\sin\delta_{OC}\cos(\alpha-\alpha_{OC})\right),\tag{2}$$

де $Z_D=\sin\delta\sin\delta_{OC}+\cos\delta\cos\delta_{OC}\cos(\alpha-\alpha_{OC})$. На практиці через короткий час існування метеора координати опорних зірок визначаються для одного кадру, усередненого по кількох десятках кадрів, де присутнє зображення метеора [7–8], тому індекс l не входить в позначення ідеальних та екваторіальних координат зір в формулах (1)–(2).

Для зв'язку отриманих з формул (1)–(2) ідеальних координат зір $(\xi_{*l};\eta_{*l})$ та їх координат, виміряних в кадрі $(x_{*l};y_{*l})$, вибирається деяка редукційна модель [1]. Це, як правило, поліноміальна модель 1-го, 2-го або 3-го порядку, або редукційна модель Дейча при довільно обраному оптичному центрі [2]. Внаслідок розв'язку системи рівнянь отримуємо значення коефіцієнтів редукційної моделі, і далі, підставляючи в рівняння значення виміряних координат голови метеора, отримуємо середні значення його ідеальних координат та їх стандартні відхилення σ (або дисперсії σ^2) в i-му кадрі: $(\overline{\xi}_{Mi};\sigma_{\xi Mi})$, $(\overline{\eta}_{Mi};\sigma_{\eta Mi})$.

Для отримання відповідних значень екваторіальних координат голови метеора скористаємося розкладом відповідних функцій в ряд Тейлора, де обмежимося першим наближенням. Для цього використаємо формули для зворотного зв'язку між ідеальними і екваторіальними координатами з (1)–(2) $\alpha=\alpha(\xi,\eta,\alpha_{OC},\delta_{OC})$, $\delta=\delta(\xi,\eta,\alpha_{OC},\delta_{OC})$, які в явному вигляді записуються наступним чином:

$$\alpha=\alpha_{OC}+\arctan(Z_0),\tag{3}$$

$$\delta=\arctan\left(\frac{Z_1}{\sqrt{1+Z_0^2}}\right),\tag{4}$$

де

$$Z_0=\frac{\xi}{\cos\delta_{OC}-\eta\sin\delta_{OC}},\qquad Z_1=\frac{\sin\delta_{OC}+\eta\cos\delta_{OC}}{\cos\delta_{OC}-\eta\sin\delta_{OC}}.$$

Відтак з (3)–(4) отримаємо для середніх значень екваторіальних координат метеора $\overline{\alpha}_{Mi}=\alpha(\overline{\xi}_{Mi},\overline{\eta}_{Mi},\alpha_{OC},\delta_{OC})$, $\overline{\delta}_{Mi}=\delta(\overline{\xi}_{Mi},\overline{\eta}_{Mi},\alpha_{OC},\delta_{OC})$, та для їх дисперсій:

$$\sigma^2_{\alpha Mi}=\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\xi}\right)^2_{\xi=\overline{\xi}_{Mi}}\sigma^2_{\xi Mi}+\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\eta}\right)^2_{\eta=\overline{\eta}_{Mi}}\sigma^2_{\eta Mi},\tag{5}$$

$$\sigma^2_{\delta Mi}=\left(\frac{\partial\delta}{\partial\xi}\right)^2_{\xi=\overline{\xi}_{Mi}}\sigma^2_{\xi Mi}+\left(\frac{\partial\delta}{\partial\eta}\right)^2_{\eta=\overline{\eta}_{Mi}}\sigma^2_{\eta Mi}.\tag{6}$$

При необхідності, для підвищення точності кількість членів в ряді Тейлора на даному етапі можна збільшити, хоча це суттєво ускладнить формули (5)–(6).

3. ОБЧИСЛЕННЯ ПОХИБОК КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО МЕТЕОРА

Тепер, коли нам відомі середні значення та похибки вхідних параметрів, є можливість спробувати обчислити похибки усіх інших параметрів траєкторії та орбіти метеора, що є функціями від вхідних.

Найбільш очевидним підходом, яким можна тепер скористатися, є метод подальшого переносу похибок через ряд Тейлора, аналогічно до попереднього переходу між ідеальними та екваторіальними координатами. Однак багаторазовий перенос похибок у відповідності до формул першого наближення, аналогічних до (5)–(6), призведе до накопичення похибок, а відтак до втрати точності та невизначеності у відповідних довірчих інтервалах. Збільшення кількості членів у ряді Тейлора призведе до практичної непридатності функціональних залежностей для обчислення дисперсій через їх громіздкість.

3.1. Ідея застосування методу Монте-Карло

Ідея, яка дозволить обійти згадані проблеми, полягає в тому, що якби нам були відомі типи статистичних розподілів випадкових величин α_M і δ_M, і вони були б такими, що для їх адекватного опису достатньо лише двох статистичних моментів, які ми отримуємо з астрометричних редукцій, а саме: середнього значення і дисперсії $p(\overline{\alpha}_M,\sigma_\alpha)$ і $p(\overline{\delta}_M,\sigma_\delta)$, то ми могли б скористатися методом Монте-Карло для генерації випадкових значень $(\alpha_{Mik};\delta_{Mik})$ з цих розподілів і подальшою підстановкою їх на кожному k-му кроці генерації у функціональні залежності для визначення шуканих кінематичних параметрів метеора.

На практиці це має виглядати наступним чином. Після астрометричної обробки всіх N_A кадрів з метеором, отриманим за допомогою камери A, ми маємо ряд даних $(\overline{\alpha}_{Ai};\sigma_{\alpha Ai})$, $(\overline{\delta}_{Ai};\sigma_{\delta Ai})$, t_{Ai}, де t — час реєстрації метеора в i-му кадрі камери A, $i=\overline{1,N_A}$ (усі дані тепер відносяться до метеора, тому індекс M

в подальших формулах опускаємо). Аналогічні ряди отримуємо для камери B: $(\overline{\alpha}_{Bj};\sigma_{\alpha Bj})$, $(\overline{\delta}_{Bj};\sigma_{\delta Bj})$, t_{Bi}, $j=\overline{1,N_B}$. Теоретично моменти часу t_{Ai}, t_{Bj}, геодезичні координати пунктів спостереження та інші константи теж є випадковими величинами і мають свої статистичні розподіли. Однак практика показує, що саме похибка визначення екваторіальних координат є визначальною, усі інші величини можна вважати детермінованими. Будемо вважати, що нам відомий тип статистичних нормалізованих до інтервалу $(0;1)$ розподілів p_N екваторіальних координат голови метеора для кожної камери: $p_{\alpha NA}$, $p_{\delta NA}$ та $p_{\alpha NB}$, $p_{\delta NB}$. В загальному випадку тип розподілу залежить від ряду характеристик, в першу чергу характеристик камери, тому ми вважаємо, що розподіли різні для камер A і B. Будемо генерувати на кожному k-му кроці випадкові величини $(\alpha_{Ak};\delta_{Ak})$ і $(\alpha_{Bk};\delta_{Bk})$ у відповідності до їх статистичних розподілів густини імовірності для кожного положення голови метеора $i=\overline{1,N_A}$ в послідовності кадрів камери A та $j=\overline{1,N_B}$ для камери B. Трансформуючи випадкові значення з нормалізованих розподілів до індивідуальних розподілів $(\overline{\alpha};\sigma_\alpha)$, $(\overline{\delta};\sigma_\delta)$ кожної точки голови метеора через $\alpha_k=\alpha_{Nk}\sigma_{\alpha k}+\overline{\alpha}_k$, $\delta_k=\delta_{Nk}\sigma_{\delta k}+\overline{\delta}_k$ у формули для подальшого обчислення кінематичних параметрів метеора, отримаємо відповідні випадкові значення для всіх шуканих величин, таких як висота метеора H_k, швидкість $\overline{v}_k$, зенітний кут радіанта Z_{Rk}, елементи геліоцентричної орбіти та ін. Після достатньо великої кількості кроків генерації N_G для кожної шуканої кінематичної величини V буде побудований свій статистичний розподіл густини ймовірності p_V, з якого можна знайти σ_V. Більше того, коли ми маємо повні розподіли випадкових величин, то саме з них і варто брати значення, які можна далі вважати фізичними характеристиками метеора та подавати в табличному вигляді в каталозі. За таку величину, як правило, можна вибрати середнє значення розподілу $\overline{V}=\int_{-\infty}^{+\infty}p_V(V)V\,dV$, модальне $V_{\mathrm{Mod}}=V(p_{\max})$ або медіанне V_{med} значення, яке можна знайти з умови $\int_{-\infty}^{V_{\mathrm{Med}}}p_V(V)\,dV=\frac{1}{2}$. На практиці середнє значення та дисперсія шуканого параметра знаходяться за формулами $\overline{V}=\frac{1}{N_G}\sum_{k=1}^{N_G}V_k$, $\sigma_V^2=\frac{1}{N_G}\sum_{k=1}^{N_G}(V_k-\overline{V})^2$, а V_{Mod} та V_{Med} можна знайти з гістограми розподілу $p_V(V)$ з точністю до кроку гістограми. Очевидно, що для симетричних розподілів всі ці три значення однакові. Проведемо дослідження типів розподілів $p_{\alpha N}$ та $p_{\delta N}$.

3.2. Встановлення типів розподілів початкових координат

Для того, щоб визначити типи розподілів вхідних координат скористаємося тестом по зорях, вважаючи тестову зорю невідомим об'єктом та проводячи для неї усі ті ж астрометричні виміри, що і для метеора. Провівши такі виміри для близько тисячі тестових об'єктів та порівнюючи їх обчислені координати з каталожними (точність каталожних координат зір на порядки вища нашої точності для ширококутних об'єктивів, тому каталожні координати можна вважати істинними) можна побудувати для кожної координати відповідний нормалізований розподіл. Єдиним питанням залишається вибір вхідних (для початку обчислення кінематичних параметрів) координат. Це можуть бути ідеальні прямокутні координати та їх похибки, отримані безпосередньо з редукційної моделі за формулами (1)–(2), але тоді координати оптичного центру також мають фігурувати в ланцюжкові обчислень для переводу випадкових ідеальних координат в екваторіальні. Інший варіант — використовувати як початкові екваторіальні координати, отримані за формулами (3)–(4), та наближені значення їх похибок, розрахованих за формулами (5)–(6), які безпосередньо після астрометричних обчислень записуються в зовнішній файл, координати оптичного центру після цього «забуваються» і більше не використовуються.

Після проведення тесту за зорями було початково обчислено імовірності знаходження істинних (каталожних) значень в межах 1σ, 2σ та 3σ для відповідних отриманих рядів даних без побудови самих розподілів та порівняно їх з відповідними значеннями для гаусового розподілу. Отримані дані розподілів для прямокутних ідеальних координат та прямого сходження і схилення приведені в табл. 1.

Таблиця 1. Імовірність знаходження шуканого параметра в певних межах їх статистичних розподілів

Змінна	$P(-1\sigma\leqslant X\leqslant 1\sigma)$	$P(-2\sigma\leqslant X\leqslant 2\sigma)$	$P(-3\sigma\leqslant X\leqslant 3\sigma)$
гаусіана	0,683	0,955	0,997
$X\equiv\xi$	0,743	0,906	0,950
$X\equiv\eta$	0,726	0,897	0,948
$X\equiv\alpha$	0,743	0,904	0,950
$X\equiv\delta$	0,726	0,898	0,948

Як видно з табл. 1, отримані типи розподілів практично ідентичні для ідеальних та екваторіальних координат, однак дещо відрізняються від гаусових. Внутрішня частина розподілу в межах одного стандартного відхилення має дещо гостріший вигляд — $72-74\%$ проти 68% гаусіани. Зовнішня частина за межами 3 стандартних відхилень також відрізняється суттєво: якщо для нормального розподілу вона майже нульова, то тут вона складає порядку 5%. Очевидно, для строгих розрахунків слід будувати повний розподіл та з нього генерувати випадкові значення координат. Однак для оціночних розрахунків можна наближено прийняти вхідні розподіли нормальними (скористаємось ними надалі).

4. ПРИКЛАД ОБЧИСЛЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕТЕОРА ТА ЇХ ПОХИБОК ЯК ПАРАМЕТРІВ ВІДПОВІДНИХ СТАТИСТИЧНИХ РОЗПОДІЛІВ

Застосування методу Монте-Карло для отримання кінематичних параметрів метеора відкриває нові можливості для покращення точності розрахунків. Отримані статистичні розподіли густини імовірності обчислюваних фізичних величин можна використовувати не лише для визначення середньоквадратичних відхилень, тобто похибок, а і для уточнення фізичних параметрів. Як показує практика, такі характеристики розподілів, як середнє, модальне чи медіанне значення, які, як правило, і слід використовувати у якості шуканих параметрів, не завжди збігаються із значеннями, отриманими без застосування методу статистичних випробовувань, тобто при вхідних параметрах $(\overline{\alpha}_k; \overline{\delta}_k)$. На рис. 1 приведені розраховані розподіли деяких параметрів метеора з потоку Леонід 2002 року.

На рис. 1 приведені розподіли густини ймовірності відповідно для висоти появи метеороїда та його геоцентричної швидкості.

Висота появи метеороїда (рис. 1,a) розрахована без застосування статистичного підходу $H_{b0} = 117{,}55$, а параметри розподілу (середнє значення і стандартне відхилення) $H_b \propto (117{,}54; 0{,}18)$. Для геоцентричної швидкості (рис. 1,b) відповідно швидкості: $v_{g0} = 71{,}05$, $v_g \propto (71{,}04; 0{,}65)$. Розподіли для деяких параметрів орбіти приведені на рис. 2.

Оскільки Леоніди — швидкісний потік зі значенням швидкості, близьким до параболічної, то для того, щоб уникнути розриву у розподілі по великій півосі, обумовленого можливими похибками з від'ємними значеннями (гіпербола), генерується розподіл значень для оберненої величини $1/a$ — рис. 2,a.

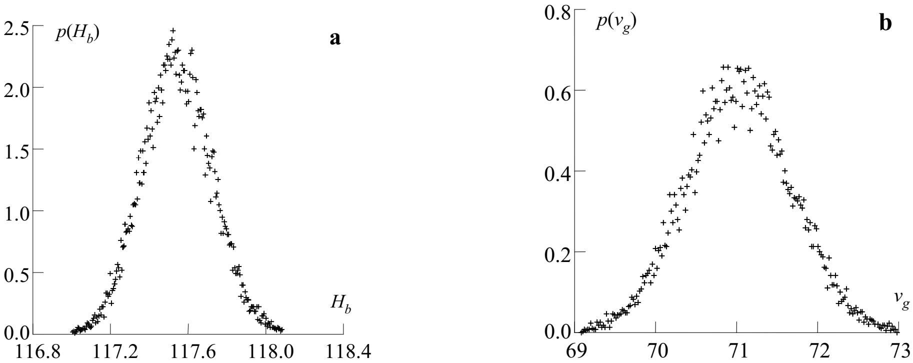

Рис. 1. Статистичні розподіли густини ймовірності для обчислених висоти появи метеороїда по одному з пунктів спостереження (a) та його геоцентричної швидкості (b). Висота в км, швидкість в км/с.

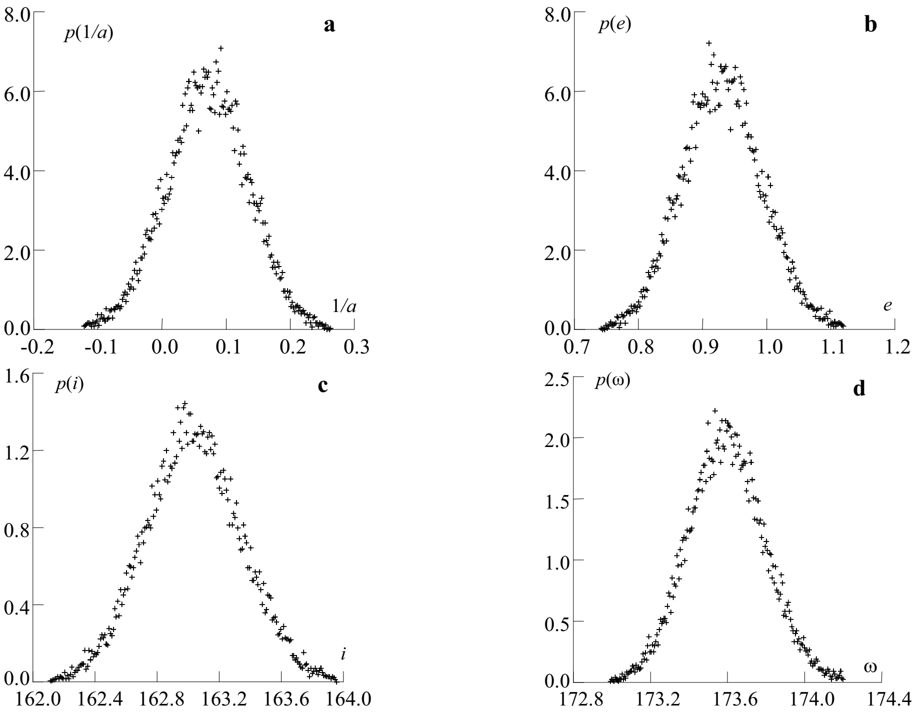

Рис. 2. Статистичні розподіли густини ймовірності деяких елементів орбіти: a — оберненого значення великої півосі a; b — ексцентриситету e; c — нахилу орбіти i; d — аргументу перигелію ω. Велика піввісь виражена в а.о., нахил та аргумент перигелію — в градусах.

На рис. 2,b–d приведені розподіли для ексцентриситету, нахилу орбіти та аргументу перигелію. Параметри розподілів: $1/a \propto (0{,}07; 0{,}06)$, що відповідає $a = 12{,}88$ порівняно з $a_0 = 14{,}32$; $e \propto (0{,}93; 0{,}06)$; $i \propto (163{,}04; 0{,}31)$; $\omega \propto (173{,}60; 0{,}20)$. Довгота висхідного вузла Ω практично збігається з екліптичною довготою Землі і визначається з точністю до 6-го знаку (коли Ω — в градусах).

Як видно з наведених даних, для вказаного метеора більшість параметрів, обчислених без статистичного підходу, не сильно відрізняються від середніх значень розподілів, крім значення великої півосі. Однак така картина спостерігається не завжди. Якщо кут між вектором швидкості метеора і оптичною віссю спостережної камери малий, ряд розподілів демонструють значну асиметрію, зміщуючи при цьому і своє середнє значення. Для усіх розподілів для даного метеора імовірність знаходження параметра в межах $\pm 3\sigma$ складає 0,998, тобто отримані розподіли нормальні.

5. ВИСНОВКИ

Запропонований статистичний підхід з використанням методу Монте-Карло дозволяє не лише надійно обчислити похибки вимірів кінематичних параметрів метеора, але і уточнити їх середні значення. Описаний метод є особливо важливим при обчисленні характеристик метеорів з критичними величинами, як то для надійного визначення модуля швидкості для біля-гіперболічних метеорів з метою їх ідентифікації та належності до Сонячної системи; для точного визначення висоти появи метеора, що особливо актуально у світлі недавно отриманої інформації про надвеликі висоти появи метеорів та розробки відповідних фізичних моделей; віднесення метеорів до того чи іншого метеорного потоку та ін. Даний метод є ефективним та може бути використаний для будь-якого типу спостережної апаратури.

1. *Валеев С.Г.* Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. — М.: Наука, 1991. — 272 с.
2. *Дейч А.Н.* К вопросу о редукции фотографических положений при произвольном оптическом центре // Астрономический журнал. — 1965. — Т. XLII, 5. — С.1114–1116.
3. *Козак П.Н.* Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров // Кинематика и физика небесных тел. — 2002. — Т. 18, № 5. — С.471–480.
4. *Козак П.Н.* Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных наблюдений // Кинематика и физика небесных тел. — 2003. — Т. 19, № 1. — С.62–76.
5. Курс астрофизики и звездной астрономии. Т.1 / Под ред. А.А. Михайлова. — М.: Наука, 1973. — 608 с.
6. *Ceplеha Z.* Geometric, dynamic, orbital, and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks // Bull. Astron. Inst. Czech. — 1987. — № 38. — P.222–234.
7. *Kozak P.* "Falling Star": Software for Processing of Double-Station TV Meteor Observations // Earth, Moon, and Planets. — 2008. — Vol. 102, № 1–4. — P.277–283.
8. *Kozak P.M., Rozhilo A.A., Taranukha Y.G.* Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors // Proc. Meteoroids 2001 Conf., Swedish institute of space physics, Kiruna, Sweden, 6–10 August 2001 (ESA SP-495, November 2001). — P.337–342.

Применение статистических методов при обработке телевизионных наблюдений метеоров

Козак П.Н.

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,
04053, г. Киев, ул. Обсерваторная, 3

Приведена идея и примеры реализации статистического подхода для вычисления кинематических параметров метеора при базисных телевизионных наблюдениях. Данный подход включает генерацию случайных чисел в соответствии со статистическими распределениями измеренных экваториальных координат метеора и позволяет построить соответствующие распределения для всех искомых кинематических параметров космической частицы. Полученные статистические распределения кинематических характеристик метеора могут быть использованы не только для определения погрешностей вычисляемых параметров, но и для уточнения их средних значений.

Ключевые слова: метеоры; кинематика метеоров; телевизионные наблюдения метеоров; статистическая обработка данных.

Application of statistical methods for processing of meteor TV observations

Kozak P.M.

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Observatorna str. 3, 04053 Kyiv, Ukraine

Processing of two images of the same meteor registered simultaneously with the help of two cameras allows to calculate its complete kinematical characteristics, including trajectory parameters and orbital elements. This procedure generally consists of two stages: astrometric processing, where the calculated parameters are right ascensions and declinations of a range of meteor head points, and the trajectory and orbital elements themselves computation, which use the right ascensions and declinations as input parameters. The problem of this classic approach is unknown errors of calculated parameters. If we use the regression analysis for astrometric processing we calculate both the equatorial coordinates themselves of a meteor, and their standard deviations. As reduction models we usually use polynomial ones (linear, square, limited or entire cubic), or a method of arbitrary chosen optical center. Independently of the reduction model to be used we finally get a range of pairs (the value and standard deviation) for right ascensions and declinations of a meteor. If we suppose that the statistical distributions of calculation errors for right ascensions and declinations are completely described by two parameters — mean value and standard deviation — and determine the view of this distribution we will be able to use the Monte-Carlo method to generate random values of equatorial coordinated of the meteor head points on each step, and put them consecutively into all formulas for trajectory parameters and orbital elements calculation. Finally, we will get statistical distribution for each calculated parameter completely describing it as a random value. For publishing results one can present the standard deviations of each distribution as an error of calculated parameters, and average value of the distribution (or modal, median) as the mean value of them. The idea and examples of realization of the statistical approach for calculating kinematic parameters of a meteor from double station TV observations are proposed. The given approach includes the generation of random numbers in accordance with the statistical distributions of measured equatorial coordinates of the meteor, and allows to plot according distributions for all calculated kinematic parameters of the space particle. Obtained statistical distributions of kinematic characteristics of a meteor may be used not only for determination of errors of calculated parameters, but also for precising their average values.

Keywords: meteors; meteor kinematics; meteor TV observations; statistical data processing.

Надійшла до редакції / Received 7.08.2017
Виправлена авторами / Revised 18.09.2017
Прийнята до друку / Accepted 27.09.2017