

УДК 621.383.7: 535.24

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КРИТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ДЛЯ ДУДИАПАЗОННОГО ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО

Запропонований метод визначення оптимального критичного значення амплітуди для одержання найкращих коефіцієнтів дводіапазонного фотометричного перерахунку. Метод використовується авторами в розробленій системі автоматизованого виявлення нових та відомих астероїдів CoLiTec. Наведені результати практичного застосування даної системи.

Ключові слова: астероїди – оцінка блиску, ПЗС-кадр.

Предложен метод определения оптимального критического значения амплитуды для получения наилучших коэффициентов двудиапазонного фотометрического пересчета. Метод использован авторами в разработанной системе автоматизированного обнаружения новых и известных астероидов CoLiTec. Приведены результаты практического применения данной системы.

Ключевые слова: астероиды – оценка блеска, ПЗС-кадр.

The method of determination of optimal critical amplitude's value for getting the best coefficients of double-band photometric scaling model is developed. The method has used by authors in developed system of automatic online new asteroids detection and known asteroids tracking CoLiTec. The results of method application is presented.

Key words: asteroid – estimation of apparent brightness, CCD-frame.

В. Е. Саваневич

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры*
Контактный тел.: (057) 702-55-92
E-mail: domsv1@rambler.ru

А. М. Кожухов

Инженер станции**
Контактный тел.: 067-235-11-78
E-mail: skinny2@rambler.ru

А. Б. Брюховецкий

Инженер станции**
Контактный тел.: 099-232-72-71
E-mail: izumsasha@rambler.ru

В. П. Власенко

Инженер группы**
Контактный тел.: 050-706-89-51
E-mail: vlasenko.vp@gmail.com

В. Н. Ткачев

Магистр*
Контактный тел.: 097-597-33-12
E-mail: vitalii@tkachov.com

*Кафедра телекоммуникационные системы

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166

**Национальный Центр управления и испытаний космических средств
г. Евпатория, АР Крым, 97419

1. Введение

При амплитудах отметок меньше критического значения амплитуды $A_{кр}$ однодиапазонный фотометрический пересчет отражает соотношение между амплитудами отметок и оценками видимого блеска данных отметок со значительными, резко возрастающими ошибками. Для проведения наилучшего двудиапазонного фотометрического пересчета [1] по критерию минимума суммы квадратов невязок между каталожной оценкой (каталожным значением) видимого блеска и оценкой (оценочным значением) видимого блеска, полученной в результате двудиапазонного фотометрического пересчета, необходимо определить оптимальное значение $A_{кр}$.

2. Анализ литературы

Задача поиска оптимального критического значения амплитуды представляет собой задачу поиска экстремума (в данном случае минимума) целевой функции на заданном интервале. Для решения таких задач обычно применяются методы поиска экстремума с вычислением значения производной функции [2, 3]. Также подобные задачи решаются прямыми методами оптимизации (метод перебора, метод деления пополам, метод золотого сечения и метод Фибоначчи) [3,4], которые производят поиск непосредственно минимума целевой функции. Данные методы различаются между собой алгоритмами разбиения заданного интервала на меньшие для более

точного нахождения значения минимума. Например, метод Фибоначчи обеспечивает наилучшую точность определения экстремума при фиксированном количестве вычислений целевой функции, а метод золотого сечения обеспечивает наилучшую точность определения экстремума за минимальное количество вычислений целевой функции.

3. Постановка задачи

Для ранее сформированного набора взаимосвязанных пар «отметка-звезда каталога» получены коэффициенты однодиапазонного фотометрического пересчета по формулам (5)-(7) работы [1]. Также известны и заданы примерные границы интервала амплитуд (A_{lim1t}, A_{lim2t}), которым соответствуют значения оценок видимого блеска (m'_{lim1t}, m'_{lim2t}), в пределах которого находится критическое значение оценки видимого блеска (оценка видимого блеска, соответствующая критическому значению амплитуды сигнала). Данный интервал оценок зависит в первую очередь от условий наблюдения, параметров инструмента (размер апертуры и фокусное расстояние) и ПЗС-камеры, а также времени экспозиции при формировании ПЗС-кадра. Пересчет значений границ диапазона оценок видимого блеска объектов в амплитуды отметок, сформированных сигналами, оценки видимого блеска которых соответствуют границам данного интервала, однозначно производится по формулам (9), (10) работы [1]. При этом вместо значения критической звездной величины m'_{lt} в формулу (9) подставляется значение границ интервала. Заданному интервалу оценок видимого блеска соответствует интервал амплитуд сигналов (A_{lim1t}, A_{lim2t}), границы которого определяются выражениями:

$$A_{lim1t} = 10^{\frac{(m'_{lim1t} - m_{0t}) / k_{фот1t}}{-2.5}},$$

$$A_{lim2t} = 10^{\frac{(m'_{lim2t} - m_{0t}) / k_{фот1t}}{-2.5}}, \quad (1)$$

где $m_{0t}, k_{фот1t}$ – параметры однодиапазонного фотометрического пересчета.

Не исключено, что для некоторых серий кадров реальное оптимальное критическое значение амплитуды может находиться за пределами заданного интервала, поэтому целесообразно предусмотреть возможность изменения данных границ при поиске оптимального критического значения амплитуды сигналов $A_{крит}$.

В качестве критерия оптимальности критического значения амплитуды сигналов $A_{крит}$ используется минимум целевой функции $f_{фот}(A_{крит}, Y_{cat}, Y_t)$. Данная функция является суммой квадратов невязок между каталожным и оценочным значениями видимого блеска, зависящей от критического значения амплитуды сигналов $A_{крит}$, совокупности параметров каталожных звезд Y_{cat} и совокупности отметок, сформированных сигналами от данных звезд Y_t :

$$f_{фот}(A_{крит}, Y_{cat}, Y_t) = \sum_{i=1}^{N_{зат}} (m'_{k(i)} - \hat{m}_{ii})^2, \quad (2)$$

где $N_{зат}$ – количество отметок, используемых в МНК-оценке параметров двудиапазонного фотометрического пересчета при данном значении $A_{крит}$;

$Y_{cat} = (Y_{1cat}, \dots, Y_{kcat}, \dots, Y_{N_{зат}cat})$ – совокупность параметров каталожных звезд, отождествленных с отметками на t -м кадре;

$Y_t = (Y_{1t}, \dots, Y_{it}, \dots, Y_{N_{зат}t})$ – совокупность отметок, отождествленных со звездами на t -м кадре;

$m'_{k(i)}$ – каталожное значение видимого блеска k -й звезды каталога, отождествленной с i -й отметкой на t -м кадре;

m_{it} – амплитуда i -й отметки, на t -м кадре, равная оценочному значению видимого блеска, полученному по формуле работы [1] при данном значении $A_{крит}$.

4. Цель статьи

Необходимо найти значение критической амплитуды, обеспечивающее минимум целевой функции, определяемой выражением (2).

5. Выбор метода оптимизации

Так как в процессе проведения фотометрического пересчета невозможно экспериментально получить значение производной функции (2), то к ней не применимы методы поиска экстремума с вычислением значения производной функции [2 – 5]. Данная функция в интервале значений амплитуд сигналов, соответствующих (A_{lim1t}, A_{lim2t}), является унимодальной. Поэтому для поиска ее минимума можно применить прямые методы оптимизации.

Так как в данном случае определение значения целевой функции связано со значительными вычислительными затратами, для поиска оптимального значения предлагается использовать метод Фибоначчи, который обеспечивает наилучшую точность определения экстремума при фиксированном количестве вычислений целевой функции [3,4].

6. Изменение границ интервала поиска критического значения амплитуды сигнала

В случае неверного задания границ интервала, в котором проводится поиск оптимального критического значения амплитуды сигнала необходимо определить направление смещения границ интервала. Сделать это можно следующим образом. Так как целевая функция фотометрического пересчета (2) является унимодальной, то, в случае неверного задания границ интервала, оптимальное критическое значение амплитуды сигнала в пределах заданного интервала будет соответствовать тому граничному значению амплитуды сигнала, которое находится ближе к оптимальному значению. Поэтому, в случае, если найденное оптимальное критическое значение амплитуды сигнала равно одному из граничных значений, то границы интервала поиска оптимального критического значения амплитуды сигнала смещаются в соответствующем направлении.

7. Применение метода Фибоначчи для поиска оптимального критического значения амплитуды отметок

Параметрами метода являются начальные границы интервала оценок амплитуды отметок (A_{lim1t}, A_{lim2t}) и количество итераций ℓ_i , зависящие от условий наблюдения, используемой аппаратуры и используемых алгоритмов определения амплитуды. Границы задаются на основании экспериментальных данных для заданного телескопа с заданной ПЗС-камерой. Границам интервала оценок амплитуды отметок соответствуют границы интервала значений видимого блеска m'_{lim1}, m'_{lim2} . Метод определения оптимального критического значения амплитуды отметок состоит в следующем.

1. Проведение однодиапазонного фотометрического пересчета по формулам (5)-(7) работы [1].

2. Расчет начальных границ значений амплитуд отметок по формуле (1). Производится для заданных начальных границ интервала оценок видимого блеска m'_{lim1}, m'_{lim2} .

3. Задание начального значения для счетчика количества итераций:

$$\ell = \ell_i.$$

4. Расчет координат первых точек разбиения интервала, на котором производится поиск оптимального значения критической амплитуды A_{kpt}, A_{2kpt} :

$$A_{1kpt} = A_{lim1t} + (A_{lim2t} - A_{lim1t}) \frac{F_{\ell-2}}{F_{\ell}};$$

$$A_{2kpt} = A_{lim1t} + (A_{lim2t} - A_{lim1t}) \frac{F_{\ell-1}}{F_{\ell}},$$

где $F_{\ell}, F_{\ell-1}, F_{\ell-2}$ – числа Фибоначчи, вводимые последовательностью $F_0=0, F_1=1, F_{\ell} = F_{\ell-1} + F_{\ell-2}$.

5. Определение значения целевой функции (2) для значений амплитуд отметок, соответствующих исходным точкам разбиения интервала:

$$y_1 = f(A_{kpt}, Y_{cat}, Y_t); \quad y_2 = f(A_{2kpt}, Y_{cat}, Y_t)$$

6. Уменьшение значения счетчика количества оставшихся итераций: $\ell = \ell - 1$.

7. Изменение границ исследуемого интервала.

7.1. Проверка условия $y_1 > y_2$. Если условие выполняется, то на п. 7.2., иначе – на п.7.4.

7.2. Изменение границ интервала слева.

$$A_{lim1t} = A_{kpt}, \quad A_{1kpt} = A_{2kpt}$$

$$A_{2kpt} = A_{lim2t} - (A_{kpt} - A_{lim1t}).$$

7.3. Расчет целевой функции (2) для определенного в п.7.2 значения амплитуды A_{2kpt} : $y_1 = y_2, \quad y_2 = f(A_{2kpt}, Y_{cat}, Y_t)$. Переход на п. 8.

7.4. Изменение границ интервала справа (блок 9):

$$A_{lim2t} = A_{2kpt}, \quad A_{2kpt} = A_{1kpt};$$

$$A_{1kpt} = A_{lim1t} + (A_{lim2t} - A_{2kpt}).$$

7.5. Расчет целевой функции (2) для нового значения амплитуды A_{kpt} : $y_2 = y_1; \quad y_1 = f(A_{kpt}, Y_{cat}, Y_t)$.

8. Проверка условия окончания вычислений ($\ell=1$). Если условие выполняется, то $A_{kpt} = A_{1kpt} = A_{2kpt}$ – искомое критическое значение, после чего переход на п.9. Иначе – на п. 6.

9. Проверка принадлежности минимума функции фотометрического пересчета заданному интервалу.

9.1. Если $A_{kpt} = A_{lim1t}$, то производится переход на п. 9.2. Иначе на п. 9.3

9.2. Границы интервала поиска оптимального значения критической амплитуды смещаются в сторону больших значений амплитуды:

$$m'_{lim1} = m'_{lim1} - 0,5, \\ A_{lim1t} = 10^{\frac{(m'_{lim1} - m_{0t}) / k_{fom1t}}{-2,5}}, \tag{4}$$

$$m'_{lim2} = m'_{lim2} - 0,5, \\ A_{lim2t} = 10^{\frac{(m'_{lim2} - m_{0t}) / k_{fom1t}}{-2,5}}. \tag{5}$$

после чего производится переход на п. 3.

9.3. Если $A_{kpt} = A_{lim2t}$, то производится переход на п. 9.4. Иначе на п. 10.

9.4. Границы интервала поиска оптимального значения критической амплитуды смещаются в сторону меньших значений амплитуды:

$$m'_{lim1} = m'_{lim1} + 0,5, \\ A_{lim1t} = 10^{\frac{(m'_{lim1} - m_{0t}) / k_{fom1t}}{-2,5}}, \tag{6}$$

$$m'_{lim2} = m'_{lim2} + 0,5, \\ A_{lim2t} = 10^{\frac{(m'_{lim2} - m_{0t}) / k_{fom1t}}{-2,5}}. \tag{7}$$

после чего производится переход на п. 3.

10. Окончание вычислительного метода. Полученное значение критической амплитуды считается оптимальным, полученные коэффициенты двудипазонного фотометрического пересчета используются для оценки видимого блеска астероидов.

8. Результаты применения предложенного метода

Экспериментальное сравнение однодиапазонного и двудипазонного фотометрического пересчета проводилось для кадров, сделанных с экспозицией 30 с в Андрушевской астрономической обсерватории (ААО) телескопом Zeiss-600 с диаметром зеркала 60 см., оснащенном ПЗС-камерой FLI PL09000 (размер кадра при съемке с одинарным бинированием 1528x1528 пикселей). Результаты эксперимента показаны на Рис. 1, 2. По оси абсцисс отложен десятичный логарифм амплитуды отметки, по оси ординат – оценка видимого блеска в звездных величинах. Точками показаны взаимосоответствующие пары «отметка (амплитуда) – звезда (каталожная оценка видимого блеска)», участвующие в фотометрическом пересчете, сплошной линией – оценка зависимости оценки видимого блеска от десятичного логарифма амплитуды отметки, полученная в результате проведения однодиапазонного фотометрического пересчета, пунктирной линией – аналогичная оценка, полученная в результате проведения двудипазонного фотометрического пересчета с оптимальным значением A_{kpt} . Очевидно, что в области слабых амплитуд (Рис. 2) оценка, полученная в результате двудипазонного фотометрического пересчета, лучше описывает характер зависимости «амплитуда –

оценка видимого блеска» соответствующих пар «отметка – звезда».

Для случая, изображенного на Рис. 1, 2, критическое значение амплитуды составило 432, что соответствовало оценке видимого блеска объекта 19,6 звездных величин.

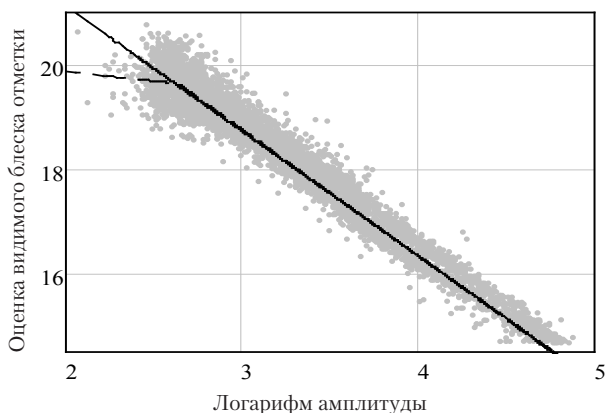


Рис. 1. Зависимость оценки видимого блеска от амплитуды

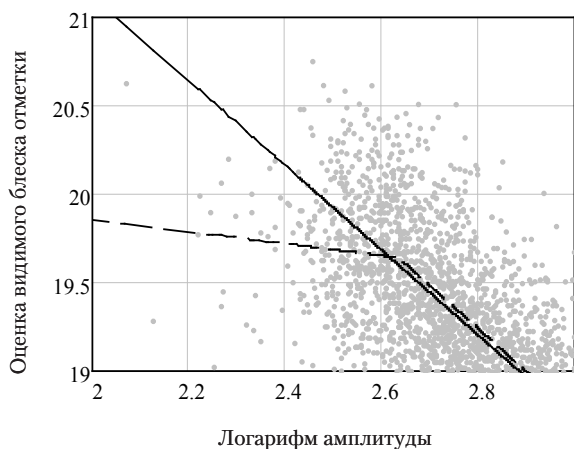


Рис. 2. Зависимость оценки видимого блеска от амплитуды. Область малых амплитуд

Значение целевой функции фотометрического пересчета (2) для однодиапазонного фотометрического пересчета составило 493, а для двухдиапазонного фотометрического пересчета при оптимальном значении $A_{крт}$ – 459. Для области амплитуд, меньших, чем $A_{крт}$ (Рис. 2), эти значения составили 110 и 80 соответственно. Таким образом, по критерию минимума суммы квадратов невязок каталожного и оценочного значений видимого блеска выигрыш во всем диапазоне амплитуд от использования двухдиапазонного фотометрического пересчета вместо однодиапазонного, составил 7%. При этом выигрыш в области малых амплитуд составил 27 %.

9. Оценка точности фотометрического пересчета по внешним данным

Интерес также представляет сравнение полученных оценок видимого блеска сигнала от астероида с их прогнозными значениями. Результаты такого сравнения для обсерваторий, наблюдающих астероиды, можно получить на сайте динамики астероидов кафедры математики Пизанского университета (Италия) [5]. По этим данным, в результате применения описанного метода СКО оценки видимого блеска уменьшилось с 0,49 звездной величины до 0,31 звездной величины, то есть выигрыш в точности оценки видимого блеска составил до 36 %.

10. Выводы

В статье предложен вычислительный метод определения наилучшего оптимального критического значения амплитуды для получения наилучших коэффициентов двухдиапазонного фотометрического пересчета. Метод основан на поиске минимума целевой функции на заданном интервале методом Фибоначчи, который обеспечивает наилучшую точность определения экстремума при фиксированном количестве вычислений целевой функции. В качестве целевой функции принята сумма квадратов невязок между каталожным и оценочным значением видимого блеска звезд, полученным в результате двухдиапазонного фотометрического пересчета. Экспериментально подтверждена работоспособность метода, который позволил значительно улучшить точность оценки видимого блеска астероидов, особенно в области слабых амплитуд. Метод использован авторами в разработанной ими системе автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTec.

Литература

1. Саваневич, В. Е. Оценка блеска астероида по амплитуде его сигнала на ПЗС-кадре [Текст] / В. Е. Саваневич, А. М. Кожухов, А. Б. Брюховецкий, В. П. Власенко // Системы управління навігації та зв'язку : Зб. наук. пр. – Київ: ЦНДі НіУ, 2010. – Вип. 3(15). – С. 46 – 50.
2. Бахвалов, Н. С. Численные методы [Текст] / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2003. – 632 с.
3. Васильев, Ф. П. Методы оптимизации [Текст] / Ф. П. Васильев. – М.: «Факториал-Пресс», 2002. – 824 с.
4. Каханер, Д. Численные методы и математическое обеспечение [Текст] / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш : пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 575 с.
5. Asteroids - Dynamic Site [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www/ URL: <http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/> - 04.04.2011 г. - Загл. с экрана.