

МГУ им. М.В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра астрофизики и звёздной астрономии

Методическое пособие к задаче специального астрономического практикума  
для студентов 4 курса физического факультета, обучающихся по программе  
«МС\_АСТРОНОМИЯ»  
(специальность 03.05.01 «Астрономия»)

## **Задача N3**

### **Определение предельной звездной величины на ПЗС кадре**

Составители:

*К.В. Куимов, С.А. Потанин*

Москва, 2019

## **Определение предельной звездной величины на ПЗС кадре**

### **Введение.**

Со второй половины XX столетия в астрономическую практику постепенно внедрились Приборы с Зарядовой Связью (ПЗС). Как линейные панорамные приемники, они давали хорошую альтернативу, применявшимся тогда, фотопластинкам. В настоящее время последние совсем утратили актуальность в наблюдательной астрономии. Современные ПЗС обладают высокой чувствительностью (выше 90%) и стабильностью, однако, имеют и ряд специфических источников шума, которые необходимо учитывать.

Круг задач, в которых необходимо получать прямые снимки больших участков звездного неба довольно велик. Это, например, задачи поиска комет и астероидов, мониторинга космического мусора, поиска вспыхивающих объектов (сверхновых и послесвечений гамма-всплесков). В таких экспериментах обычно нужно либо определить звездную величину найденного объекта в рабочей спектральной полосе, либо указать предельную величину, если объект не обнаружен.

### **Основные шумы ПЗС-приемника**

Мы кратко рассмотрим несколько основных источников шума, влияющих на оценку звездной величины объекта.

Отличительной особенностью ПЗС является наличие отдельных

элементов изображения (пикселей) обычно квадратной (реже - прямоугольной) формы. Изображение звездного источника интегрируется в эти элементарные ячейки, таким образом в данные уже вносится так называемый шум оцифровки. При этом, информация о геометрической форме изображения теряется высокие частоты (в смысле преобразования Фурье). Тем не менее, информация об общем количестве зарегистрированных фотонов при этом почти не страдает.

Электроника ПЗС устроена таким образом, что отсчет каждого пикселя содержит некоторый шум, называемый шумом считывания. Он имеет статистическое распределение близкое к нормальному и характеризуется квадратным корнем из дисперсии отсчетов подложки. Обычно величины шума считывания колеблются от 2-3 электронов на пиксель хороших матриц до 15-20 у камер низкого качества. Существуют также ПЗС с внутренним усилением, в которых эта величина составляет существенно меньше 1 электрона (0.1-0.3) на пиксель.

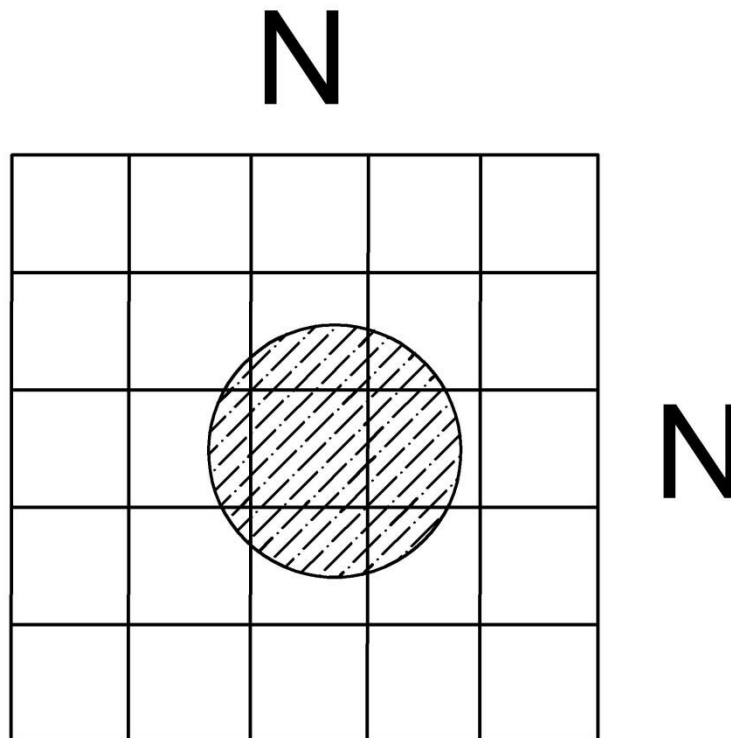
Другим источником помех при фотометрических наблюдениях является неравномерность чувствительности различных областей матрицы. Причиной этой неравномерности могут быть пылинки на кристалле или его покровном стекле или фильтре, а также внутренние неоднородности самого светочувствительного кристалла. Для учета этих ошибок используют метод «плоского поля», когда матрица засвечивается максимально равномерным рассеянным фоном. Получившаяся карта отклика (плоское поле) затем применяют при коррекции отсчетов в соответствующих пикселях (отсчеты делятся на соответствующие значения плоского поля).

В кристалле ПЗС происходит термогенерация электронов, интенсивность которой зависит от температуры — появляется темновой сигнал. Из-за того, что кристалл подложки имеет дислокации и прочие дефекты, каждый пиксель, вообще говоря, имеет разную скорость термогенерации при одной и той же температуре. Поэтому для учета темнового сигнала нужно, как и в случае с плоским полем, иметь карту термогенерации для всего кристалла при рабочей температуре. Для этого делают ряд экспозиций и усредняют их. Стоит иметь в

виду, что шум темнового сигнала имеет пуассоновское распределение, т. е. дисперсия отсчета  $\sigma^2$  равна самому отсчету. Поэтому, при вычитании известного темнового сигнала шумы в различных пикселях будут различны. Для точного учета темновых шумов нужно вводить весовую функцию, обратно пропорциональную величине темнового сигнала в пикселях. В данной задаче мы будем считать, что темновой сигнал примерно одинаков по всем элементам изображения.

### Оценки шума при регистрации изображения на ПЗС

Рассмотрим квадратный участок матрицы, содержащий изображение единичной



звезды.

Рис. 1 Схематическое расположение звезды относительно пикселей ПЗС.

Оценим шум суммарного отсчета:

$$N = \sqrt{N_* + n_{px}(N_S + N_D + r^2)} \quad (1)$$

здесь  $N_*$  — суммарное количество отсчетов от звезды,  $N_D$  — количество темновых электронов в пикселе,  $r^2$ -дисперсия шума считывания,  $N_S$  — количество отсчетов фона неба на один пиксель,  $n_{px}$  - Общее количество пикселей, участвующих в оценке. Значение фона неба можно оценить по участкам кадра близкого к исследуемому и свободному от звезд. Обычно это делают в кольцевых зонах непосредственно вокруг фотометрируемого изображения. Естественно, это имеет смысл только после коррекции за счет темнового сигнала и плоского поля.

Отношение сигнала к шуму, тогда запишется следующим образом:

$$\frac{S}{N} = \frac{N_*}{\sqrt{N_* + n_{px}(N_S + N_D + r^2)}} \quad (2)$$

Очевидно, что при больших сигналах (яркие звезды)  $S/N$  в основном определяется суммарным отсчетом от звезды  $N_*$  и примерно равен  $\sqrt{N_*}$ . В случае же предельно слабых звезд — основной вклад вносят шумы считывания и темнового сигнала:

$$\frac{S}{N} = \frac{N_*}{\sqrt{n_{px}(N_S + N_D + r^2)}} \quad (3)$$

Заметим,  $S/N$  становится обратно пропорционален квадратному корню из количества суммируемых пикселей.

Поскольку, в первом приближении можно считать, что ширина профилей звезд на половине максимальной интенсивности (FWHM) не зависит от яркости звезды, размер апертуры для фотометрирования следует выбирать сравнимым (обычно в 2-3 раза больше) с FWHM. Имеет смысл искать оптимум размера окна, чтобы с одной стороны минимизировать шум, и не потерять полезный

сигнал с другой.

Для приблизительного определения FWHM можно пользоваться следующей оценкой:

$$FWHM = 2.355 \sqrt{\frac{\sum_i [(X_i - X_0)^2 \sum_j F_{ij}]}{\sum_{ij} F_{ij}}}, \quad (4)$$

где  $X_0$  координата центра изображения по оси X. Строго говоря, выражение 4 дает оценку FWHM вдоль оси X. Если изображение не симметрично, нужно воспользоваться аналогичным выражением для координат Y.

Сами координаты центра масс изображения вычисляются по формулам:

$$X_0 = \frac{\sum_i [X_i \sum_j F_{ij}]}{\sum_{ij} F_{ij}}$$
$$Y_0 = \frac{\sum_j [Y_j \sum_i F_{ij}]}{\sum_{ij} F_{ij}} \quad (5)$$

### **Предельная звездная величина на ПЗС**

Как оценить предельную звездную величину для конкретного ПЗС приемника и телескопа? Начнем с того, что количество фотонов, которое приходит на приемник в определенной фотометрической полосе (для определенности будем говорить о потоках в полосе V) зависит от диаметра апертуры телескопа и от времени экспозиции. Реально, на количество зарегистрированных фотонов оказывают влияния многие факторы, такие как коэффициенты отражения зеркал и просветляющих покрытий затенение вторичным зеркалом (если оно есть), а также квантовая эффективность самого приемника. Для простоты будем считать, что общее количество зарегистрированных фотонов ( $N_*$ ) пропорционально количеству фотонов попавших на поверхность апертуры  $N_0$ :

$$N_* = N_0 QE \quad (6)$$

Коэффициент пропорциональности QE называют обобщенной квантовой эффективностью, он включает в себя произведение всех факторов уменьшающих количество регистрируемых фотонов (или уменьшение отношения сигнала к шуму на выходе системы [2]).

Обобщенную квантовую эффективность можно рассматривать так эквивалентное уменьшение апертуры телескопа.

$$QE = \frac{D_{eff}^2}{D^2} \quad (7)$$

где  $D_{eff}$  - эффективный диаметр апертуры. Проще говоря, если квантовая эффективность всей системы равна 0.5, то, например, телескоп с диаметром  $D=1$  м на самом деле работает как телескоп с апертурой 70 сантиметров и  $QE=1$ .

Как известно звездная величина в определенной фотометрической полосе связана с потоком выражением:

$$m - m_0 = -2.5 \log_{10} \frac{F}{F_0}, \quad (8)$$

где  $m$  и  $m_0$  – звездные величины двух звезд, а  $F$  и  $F_0$  –соответствующие потоки от этих звезд.

Для перехода к звездной величине одной определенной звезды (например в фильтре V) можно воспользоваться известными потоками от фотометрических стандартов. Так например, поток в фильтре V от звезды класса A0 (Вега) нулевой звездной величины считается равным  $10^6$  фотонов на один квадратный сантиметр за одну секунду. Таким образом:

$$m_v = -2.5 \log_{10} \left( \frac{4N_*}{\pi t D_{eff}^2 10^6} \right) \quad (9)$$

Где  $m_v$  – звездная величина в полосе V,  $N_*$  - зарегистрированное число фотонов от звезды в фильтре V, а  $t$  – время экспозиции.

Таким образом, зная реальные величины некоторых (можно и одной) звезд на кадре можно перейти от потока к реальной звездной величине для

любой звезды. Однако, точность такого перехода снижается при снижении потока и уменьшении отношения сигнала к шуму. Поэтому предельная звездная величина — понятие в некотором смысле, относительное. Визуально сделать вывод о наличии объекта на ПЗС можно при  $S/N$  порядка единицы. Для сколько-нибудь надежных фотометрических оценок  $S/N$  должно быть не меньше 3.

Ошибка определения звездной величины может быть вычислена следующим образом:

$$\delta m = \frac{\partial m}{\partial F} \delta F = \frac{-2.5}{F \ln(10)} \delta F \quad (10)$$

Поскольку поток пропорционален числу фотонов  $N_*$ , а ошибка числа фотонов для ярких объектов порядка  $\sqrt{N_*}$ , то для ярких звезд ошибка определения звездной величины пропорциональна  $1/\sqrt{N_*}$ , т.е.

$$\delta m \approx \frac{1}{S/N} \quad (11)$$

Таким образом, ошибка, выраженная в звездных величинах, есть просто обратное отношение сигнала к шуму (если  $S/N = 100$ , то  $\delta m \approx 0.01^m$ ).

### **Порядок выполнения задачи**

В задаче предлагается оценить предельную звездную величину, а так же параметры телескопа на котором выполнен снимок.

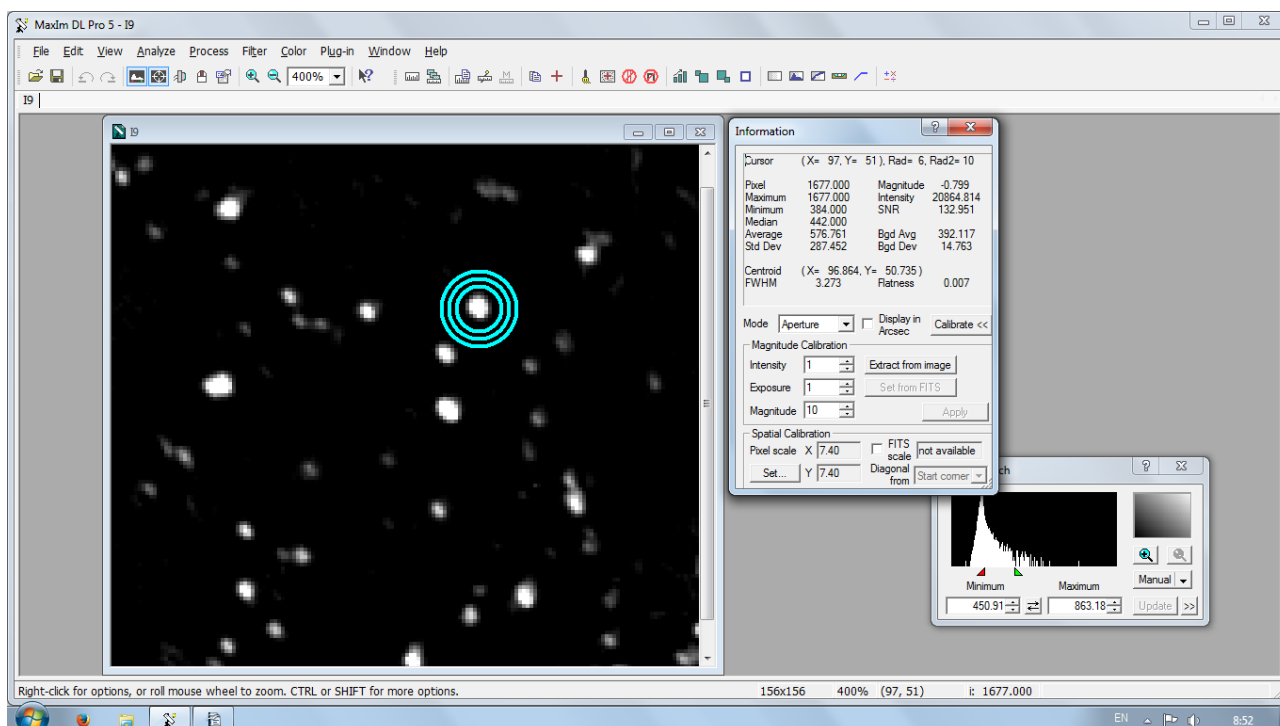
Кадр записан в формате FITS и содержит в своей заголовке информацию о времени экспозиции, небесных координатах центра кадра и пр. Часть этой информации потребуется для выполнения задачи. Фотометрию объектов предлагается сделать в программе MaxImDL, однако приветствуется использование и других программ по усмотрению студента.



## Краткое описание программы MaxImDL

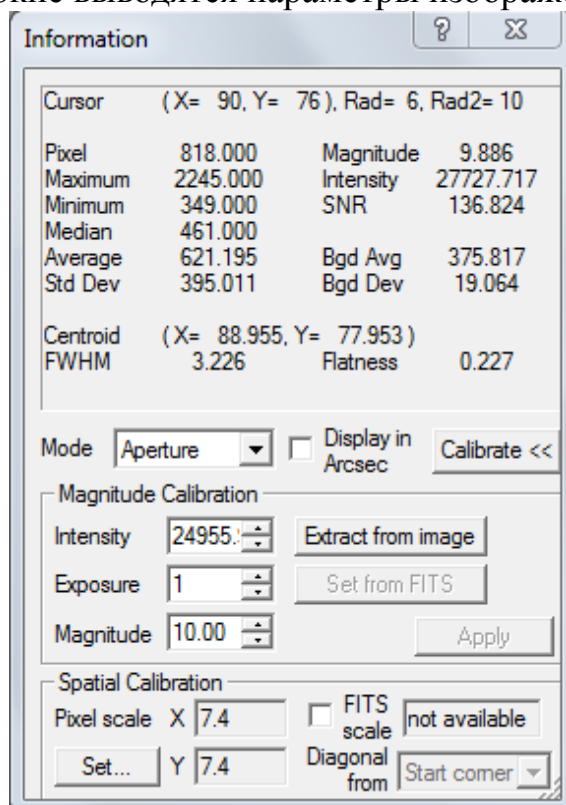
Программа проста и удобна в использовании. Файл можно загрузить используя меню загрузки. Далее нажав комбинацию клавиш Ctrl-i вызывается меню информации.

Окно программы выглядит следующим образом:



Нажав правую кнопку мыши можно выбрать диаметры апертуры и вспомогательных колец для определения фона. Попробуйте установить различные диаметры апертуры и оцените их влияние на поток и отношение сигнала к шуму.

Во вспомогательном окне выводятся параметры изображения:



В этом же окне можно указать звездную величину для одной известной звезды далее при наведении апертуры на другие звезды будут показаны их звездные величины.

В окне так же отображается FWHM, отношение сигнала к шуму и другие полезные параметры. Так же необходимо ввести размер пикселя и фокусное расстояние телескопа. Эти параметры могут быть взяты из заголовка FITS-файла автоматически (установкой соответствующего значка в окне) или введены вручную.

Заголовок файла можно посмотреть непосредственно выбрав в меню View-->FITS Header Window.

*Определить предельную звездную величину.*

Помимо самого кадра, предоставляется текстовый файл с координатами в пикселях нескольких ярких звезд на кадре с соответствующими им величинами. Нужно найти эти звезды и измерить поток от них.

Для оценки предельной звездной величины нужно сделать фотометрию 20-30 звезд различной интенсивности (от самых ярких до самых слабых). Звездные величины должны быть прокалиброваны на одну из известных ярких звезд (см. описание программы MaxImDL)

Запишите в отдельную таблицу измеренные величины и значения SNR.

Постройте график зависимости отношения сигнала к шуму от измеренной звездной величины. Если в таблице нет значений SNR близких к единице — сделайте экстраполяцию. Оцените звездную величину для SNR=1 и SNR=3.

Определите эффективный диаметр телескопа на котором сделан снимок. Сравните это значение с реальным диаметром телескопа из заголовка FITS-файла. Определите обобщенную квантовую эффективность телескопа.

Вычислите угловое расстояние между двумя известными звездами на кадре и измерьте реальное расстояние в пикселях между этими звездами на снимке. Оцените фокусное расстояние телескопа. Сравните это значение с цифрой указанной в заголовке FITS-файла.

### **Отчет**

В отчете необходимо предоставить распечатки

- 1) таблица со значениями SNR и звездных величин,
- 2) график построенный по таблице 1) с экстраполированными значениями.
- 3) оценки эффективного диаметра телескопа и обобщенной квантовой эффективности.
- 4) Оценка фокусного расстояния телескопа

### **Список литературы**

- 1) *Щеглов П.В. «Проблемы оптической астрономии». Наука 1980г.*
- 2) *Засов А.В. Постнов К.А. «Общая астрофизика». Век-2 2011 или 2015г.*
- 3) *<http://www.astronet.ru/db/msg/1169703>*