

## К вопросу о калибровке ПЗС-камеры.

### I. Калибровка по известной поверхностной яркости (например по небу).

1.  $B(R) = B_{astr} \Delta\lambda_{eff} + B_{atm}$  - поверхностная яркость неба;  $B_{astr} = 1-2 R/A$  – астрономический континуум;  $B_{atm} \sim 100-150 R$  – яркость атмосферной линии 6300А;

$\Delta\lambda_{eff} = \frac{\int K(\lambda)d\lambda}{K_{max}}$  - в случае работы без с/фильтра, где  $K$  – квантовая эффективность

матрицы;

$\Delta\lambda_{eff} = 100\text{А}$  – в случае работы с с/фильтром.

2. Соответствующая  $B(R)$  интенсивность будет  $I\left(\frac{\text{фотон}}{\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{стер}}\right) = \frac{10^6 B(R)}{4\pi}$ .

3. Телесный угол, под которым видна апертура объектива с расстояния  $r$ :  $\Omega_A = A_{eff} / r^2$ , где  $A_{eff}$  – эффективная площадь апертуры.

4. Телесный угол, который стягивает 1 пиксель:  $\Omega_p = a_p / f^2$ , где  $a_p$  – площадь пикселя,  $f$  – фокусное расстояние объектива.

5. Площадь источника, с которой собирает излучение 1 пиксель:  $S_i = r^2 \Omega_p = r^2 \cdot a_p / f^2$ .

6. Число фотоэлектронов в 1 пикселе, возникающих за счет облучения:

$$\begin{aligned} \Delta N_{ph.e.} &= I \cdot \Omega_A \cdot S_i \cdot \eta \cdot \tau_{exp} = \frac{10^6 B(R)}{4\pi} \cdot \frac{A_{eff}}{r^2} \cdot \frac{a_p}{f^2} r^2 \cdot \eta \cdot \tau_{exp} = \\ &= \frac{10^6 B(R)}{4\pi} \cdot \frac{A_{eff}}{f^2} \cdot a_p \cdot \eta \cdot \tau_{exp} = k \cdot B(R) \end{aligned}$$

где  $\tau_{exp}$  – время экспонирования,  $\eta$  - «к.п.д.» тракта для фотонов, т.е. произведение коэфф-та пропускания атмосферы на квантовую эффективность матрицы, если без фильтра, то  $K_{max}$ , если с фильтром, то  $K(\lambda=630\text{нм})$ , и на коэфф. проп. с/фильтра, если он установлен (~80%).

Отношение  $(A_{eff}/f^2) = 1/D^2$  – это характеристика светосилы объектива,  $D$  – диафрагменное число ( для НС номинально  $1/D = 1:1$ ).

7. Калибровка – это определение коэффициента  $k$  в выражении  $\Delta N_{ph.e} = k \cdot B(R)$ , где  $B(R)$  известно, а  $\Delta N_{ph.e}$  измеряется.

### II. При калибровке по звезде необходимо установить эквивалент между плотностью потока фотонов и поверхностной яркостью.

1. Звезда дает плотность потока фотонов на границе атмосферы  $F_\lambda$ (фотон/с·см<sup>2</sup>·А).

2. Если расфокусировать изображение звезды на матрице в пятно площадью  $s_m$ , то число фотоэлектронов в 1 пикселе, возникающих за счет облучения расфокусированным светом звезды, будет:

$$\begin{aligned} \Delta N_{ph.e} &= \frac{F_\lambda \cdot \Delta\lambda_{eff} \cdot A_{eff} \cdot \eta \cdot \tau_{exp}}{s_m} \cdot a_p = \left( F_\lambda \Delta\lambda_{eff} \cdot \frac{f^2}{s_m} \right) \cdot \frac{A_{eff}}{f^2} \cdot a_p \cdot \eta \cdot \tau_{exp} = \\ &= \left( \frac{10^6 B^{эKB}(R)}{4\pi} \right) \cdot \frac{A_{eff}}{f^2} \cdot a_p \cdot \eta \cdot \tau_{exp} = k \cdot B^{эKB}(R), \end{aligned}$$

где  $B^{эKB}(R) = \frac{4\pi}{10^6} \cdot F_\lambda \Delta\lambda_{eff} \cdot \frac{f^2}{s_m}$ , а  $(s_m/f^2) = \Omega_m$  – телесный угол, соответствующий расфокусированному изображению звезды.

3. В идеале расфокусированное пятно должно быть однородно. При неоднородном распределении освещенности нужно эту неоднородность как-то учитывать, например усреднением.

4. При калибровке по звезде проще всего действовать без с/фильтра. Тогда звездная величина  $m_v$  дает сразу интегральную по  $\lambda$  плотность потока фотонов, т.к. квантовая эффективность матрицы похожа на кривую чувствительности для глаза:  $\Delta\lambda_{\text{эф.матр.}} \sim \Delta\lambda_{\text{эф.глаз}}$ . Если со с/фильтром, то нужно учесть спектральный класс звезды и оценить поток фотонов в красной области спектра ( $\lambda \sim 6300\text{Å}$ ).

Далее, измеряется число ф/электронов в пикселе и вычисляется соответствующая эквивалентная яркость в рэлях и определяется коэффициент пропорциональности  $k$ .

### 5. Пример.

Согласно К.У.Аллен «Астрофизические величины», М.: Мир. 1977. 446с. (стр. 293) для звезд с  $m_v = 0$  различных спектральных классов в окрестности  $\lambda = 6300\text{Å}$  имеем значение  $\lg F_{\lambda}^{(1)}$ , где  $F_{\lambda}^{(1)}$  в единицах (эрг/с·см<sup>2</sup>·Å):

Спектральный класс	B0	A0	F0	G0	K0	M0
$\lambda = 6000$ ангстрем	-8.58	-8.56	-8.53	-8.50	-8.42	-8.33

<sup>\*)</sup> B0 – голубые и УФ звезды, M0 – красные и ИК звезды.

Тогда для звезды класса G0 (тип близкий к нашему Солнцу) с визуальной звездной величиной  $m_v$

$$\lg F_{\lambda}^{(1)} = -0.4 \cdot m_v - 8.5.$$

Поток фотонов от такой звезды на границе атмосферы будет

$$F_{\lambda} \left( \frac{\text{фотон}}{\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Å}} \right) = \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot F_{\lambda}^{(1)} \left( \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Å}} \right) = \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot 10^{-0.4 m_v - 8.5},$$

где  $h = 6.625 \cdot 10^{-27}$  эрг·с – постоянная Планка,  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с – скорость света,  $\lambda = 6300\text{Å}$ .

$$B^{\text{экв}}(R) = \frac{4\pi}{10^6} \cdot F_{\lambda} \Delta\lambda_{\text{эф}} \cdot \frac{f^2}{s_m} = \frac{4\pi}{10^6} \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot 10^{-0.4 m_v - 8.5} \Delta\lambda_{\text{эф}} \cdot \frac{f^2}{n \cdot a_p},$$

где  $a_p$  – площадь 1 пикселя,  $n$  – число пикселей в расфокусированном изображении звезды.

Полагая  $m_v = 6$  (предельная величина для глаза),  $\Delta\lambda_{\text{эф}} = 100\text{Å}$  (полоса фильтра),  $f = 35$  мм (фокусное расстояние для NC),  $a_p = (22 \text{ мкм})^2 = 4.84 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$  – площадь пикселя,  $n = (4 \times 4) = 16$ , получаем эквивалентную поверхностную яркость  $B^{\text{экв}} = 793 \text{ R}$ .

При этом, если положить  $A_{\text{эф}}/f^2 \approx 1$ ,  $a_p = 4.84 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$ ,  $\eta = 0.5$ ,  $\tau_{\text{exp}} = 15 \text{ сек.}$ , получим

$\Delta N_{\text{ph.e}} = 2291 \text{ эл/пикс.}$ , или для коэффициента  $k = \Delta N_{\text{ph.e}}/B^{\text{экв}}(R) = 2.89$ .

Если  $1 \text{ ед. ADC} = 15 \text{ эл.}$ , то коэффициент пропорциональности между числом ед. ADC и  $B(R)$  будет равен 0.193: число ед. ADC = 0.193 ·  $B(R)$ . Т.е. примерно 1 ед.  $\approx 5R$ .