60 лет ЗЕНИТ 1948-2008
ЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

ОАО «КРАСНОГОРСКИЙ ЗАВОД им. С.А. ЗВЕРЕВА»

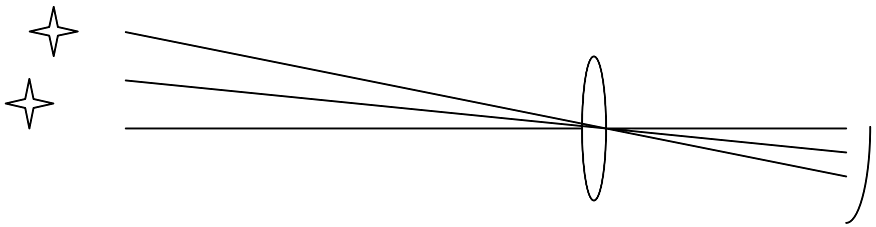
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР

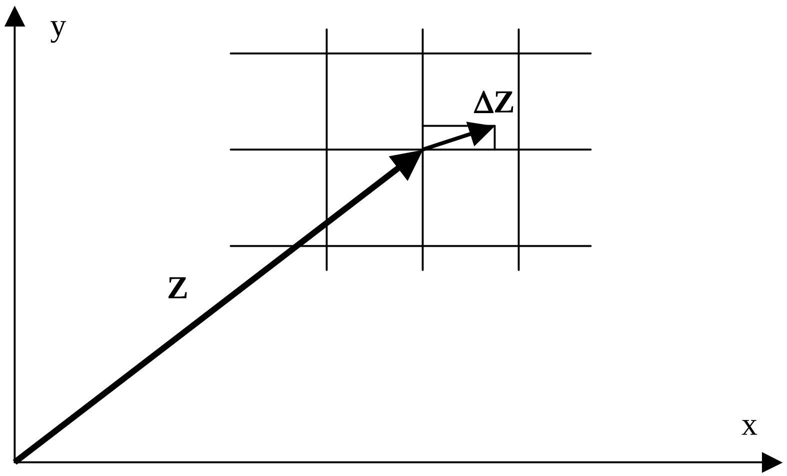
Способ фотограмметрической калибровки кадровой оптико-электронной камеры наблюдения по единичному эталону угла

Архипов С.А., ФНПЦ ОАО КМЗ

12 ноября 2008 г.
ИКИ Москва

Постановка задачи. Допущения.





1) Оптико-электронная система СЛ-200 (объектив+ПЗС-матрица+электронный тракт) имеет фотограмметрическую погрешность которая описывается функциями P(x,y) и Q(x,y)

Идеальная фотограмметрическая характеристика СЛ-200 возможна в случае:

а) идеальной центральной проекции переводящей сферу в сферу,

б) идеального матричного ПЗС приемника с регулярно расположенными на сфере энергетическими центрами (ЭЦ) чувствительности пикселей,

в) идеального совмещения сферической фокальной плоскости со сферической светочувствительной поверхностью ПСЗ матрицы.

г) отсутствия регулярных шумов в электронном тракте искажающих сигнал от ФПУ.

Реально по всем пунктам могут быть отступления. В результате регулярный «веер» входящих лучей, зарегистрированный ФПУ (в системе координат номеров пикселей), образует нерегулярную решетку энергетических центров (ЭЦ). Отличие этой решетки от идеальной характеризуется функциями P(x,y) и Q(x,y).

Допущения

2) За время экспонирования одного кадра фиксируется, как минимум, изображение двух звезд

3) На 1-й стадии космического эксперимента (КЭ) количество кадров достаточно велико, и изображения пар звезд достаточно равномерно покрывают светочувствительную поверхность ПЗС-матрицы

4) За время получения всего множества кадров 1-й стадии фотограмметрические погрешности СЛ-200 не изменяются. Для сохранности фотограмметрических погрешностей СЛ-200 требуется, прежде всего, сохранность распределения температур в СЛ-200 на протяжении всей 1-й стадии КЭ

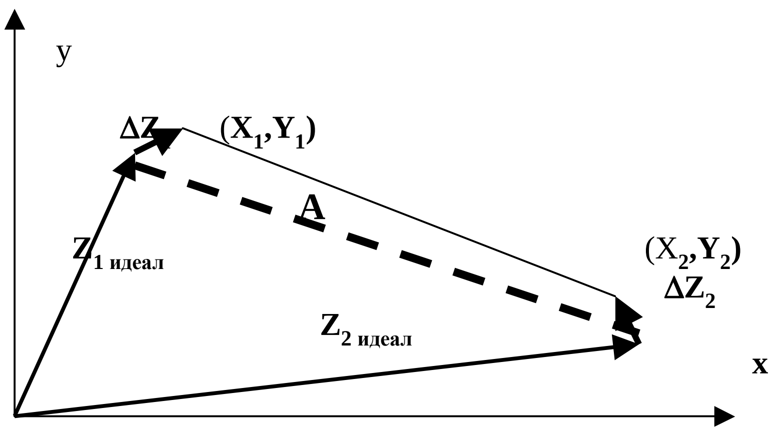
Находим P(x,y) и Q(x,y)

Решение задачи строится на предположении о малости вектора **ΔZ.**

На рисунке изображены векторы $\mathbf{Z_{1идеал}}$**+**$\mathbf{\Delta Z_1}$ и $\mathbf{Z_{2идеал}}$**+**$\mathbf{\Delta Z_2}$ определяющие ЭЦ изображений пары звезд.

$\mathbf{Z_{1идеал}}$ и $\mathbf{Z_{2идеал}}$ - векторы, определяющие положение изображений пары звезд, в случае идеального прибора СЛ-200.

$\mathbf{\Delta Z_1}$ и $\mathbf{\Delta Z_2}$ – векторы фотограмметрической ошибки СЛ-200.



Т.е. изображение пар звезд реально попадает в точки (X1,Y1) и (X2,Y2), определяемые векторами

Z1 = Z1 идеал+ΔZ1 и **Z2 = Z2 идеал+ΔZ2**

Угловое расстояние между парой звезд известно и равно A (штриховая линия).

Находим P(x,y) и Q(x,y)

Заметим, следующее:

1) Координаты (x,y) - образуют идеальную равномерную сетку.

2) Координаты (X,Y) - координаты изображений звезды в идеальной системе координат (x,y).

3) Координаты (x,y) имеют размерность номер пиксела.

4) Физический смысл координат (x,y) - положение энергетического центра пиксела в сигнале. Положения пикселов (номеров пикселов) в сигнале объявляются «лежащими» на равномерной сетке. Это модель! На самом деле положение пикселов в ПЗС матрице может быть не регулярным, т.е отклоняться от равномерной сетки.

Рассмотрим один кадр, в котором СЛ-200 экспонирует две звезды. Это наиболее неинформативный случай. Получаем пять параметров:

координаты (X1,Y1) и (X2,Y2), в размерности «номер пиксела», и расстояние **A,** в размерности «угловая секунда».

Из рисунка видно, что эти параметры связаны следующим уравнением:

$$A \cdot \xi = \left| \left(\overline{Z_2} - \overline{\Delta Z_2}\right) - \left(\overline{Z_1} - \overline{\Delta Z_1}\right) \right|$$

$$\overline{Z_2} = \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix} \quad \overline{\Delta Z_2} = \begin{pmatrix} P(X_2, Y_2) \\ Q(X_2, Y_2) \end{pmatrix} \quad \overline{Z_1} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} \quad \overline{\Delta Z_1} = \begin{pmatrix} P(X_1, Y_1) \\ Q(X_1, Y_1) \end{pmatrix}$$

ξ – коэффициент, преводящий угловые секунды в номера пикселей

60 лет ЗЕНИТ 1948-2008
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

Находим P(x,y) и Q(x,y)

$$P(x, y) = p_0 + p_1 x + p_2 y + p_3 xy + p_4 x^2 + p_5 y^2$$

$$Q(x, y) = q_0 + q_1 x + q_2 y + q_3 xy + q_4 x^2 + q_5 y^2$$

$$S \cdot O = u \qquad (*)$$

$$u = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

$$O = (\xi, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)^T$$

$$S = \frac{1}{u} \cdot \Big[A,\ (X_2 - X_1)^2, (X_2 - X_1)(Y_2 - Y_1), (X_2 - X_1)(X_2 Y_2 - X_1 Y_1), (X_2 - X_1)(X_2^2 - X_1^2), (X_2 - X_1)(Y_2^2 - Y_1^2) \cdots$$
$$(Y_2 - Y_1)(X_2 - X_1), (Y_2 - Y_1)^2, (Y_2 - Y_1)(X_2 Y_2 - X_1 Y_1), (Y_2 - Y_1)(X_2^2 - X_1^2), (Y_2 - Y_1)(Y_2^2 - Y_1^2) \Big]$$

Находим P(x,y) и Q(x,y)

Т.о., для одного кадра получено уравнение (4) , связывающее 5 параметров A, $X1$, $Y1$, $X2$, $Y2$ с 11-ю неизвестными вектора ***O***.

Чтобы найти неизвестные, число кадров должно быть существенно больше 11, т.е должно выполняться принятое при постановке задачи допущение №3.

Пусть число кадров J. Номер кадра j введем в уравнение (*), т.е. запишем его J раз. Получим линейную систему уравнений

$$G \cdot O = U$$

$$O = (\xi \,,\, p_1 \,,\, p_2 \,,\, p_3 \,,\, p_4 \,,\, p_5 \,,\; q_1 \,,q_2 \,,\, q_3 \,,\, q_4 \,,\, q_5)^T$$

$$G = \left(S_1 \,, S_2 \cdots S_j \cdots \; S_J\right)^T \qquad j = 1, 2 \cdots J \qquad J \geq 11$$

$$S_j = \frac{1}{u_j} \cdot \Big[A_j \,,\; (X_{2j} - X_{1j})^2 \,, (X_{2j} - X_{1j})(Y_{2j} - Y_{1j}) \,, (X_{2j} - X_{1j})(X_{2j}Y_{2j} - X_{1j}Y_{1j}) \,, (X_{2j} - X_{1j})(X_{2j}^2 - X_{1j}^2), (X_{2j} - X_{1j})(Y_{2j}^2 - Y_{1j}^2) \cdots$$
$$(Y_{2j} - Y_{1j})(X_{2j} - X_{1j}) \,, (Y_{2j} - Y_{1j})^2 \,, (Y_{2j} - Y_{1j})(X_{2j}Y_{2j} - X_{1j}Y_{1j}) \,, (Y_{2j} - Y_{1j})(X_{2j}^2 - X_{1j}^2), (Y_{2j} - Y_{1j})(Y_{2j}^2 - Y_{1j}^2)\Big]$$

$$U = \left(u_1 \,, u_2 \cdots u_j \cdots \; u_J\right)^T \qquad u_j = \sqrt{(X_{2j} - X_{1j})^2 + (Y_{2j} - Y_{1j})^2}$$

$$O = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot U$$

Ограничения способа и оценка погрешностей

1) Отношение периода фотограмметрической погрешности к размеру изображения звезды > 10, тогда погрешность определения энергетических центров пикселей не более 2%

2) Величина эталона A должна быть менее периода фотограмметрической погрешности

3) Для определения N коэффициентов полиномов P(x,y) и Q(x,y) требуется не менее 2N измерений

4) Для корректности задачи отрезки A должны достаточно равномерно покрывать ПЗС приемник

5) Для корректности задачи отрезки A не должны быть коллинеарными

6) Для выбранных параметров СЛ-200 (формат 1000x1000, пиксел 10x 10 мкм, заданную фотограмметрическую погрешность ~10 мкм находим с погрешностью 10%.

Определение погрешностей взаимного положения ПЗС матриц по единичному эталону угла

Примем следующие допущения:

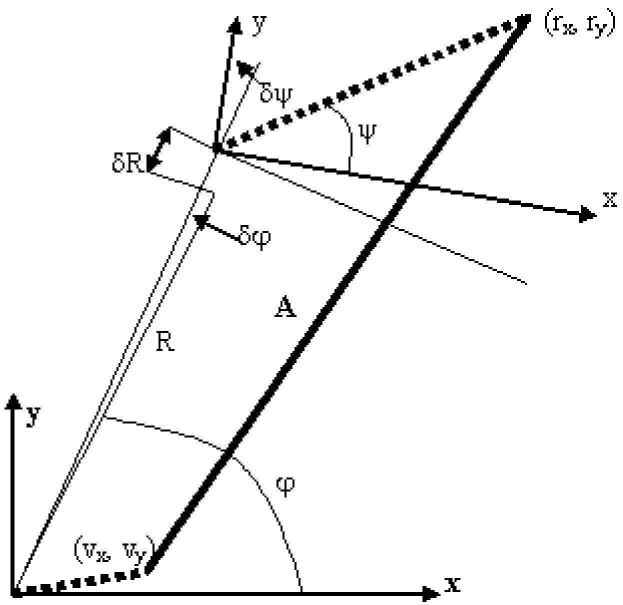
1) приемники изображения – ПЗС матрицы, расположенные в фокальной плоскости согласно проекта СЛ-200; одна матрица в центре , остальные по окружности в угловой размер 30 мин, что соответствует линейному размеру 50 мм радиус.

2) ПЗС матрицы имеют идеальную геометрию – прямоугольная решетка – центров энергетической чувствительности пикселей с шагом 10 мкм

3) известно положение узловой точки, оно объявляется началом координат центральной матрицы

4) оси центральной матрицы объявляются осями координат (**x,y**) СЛ-200

5) известно положение (R, φ) каждой матрицы относительно центральной матрицы , однако, с некоторой ошибкой (δR, δφ, δψ), которая неизвестна.



60 лет ЗЕНИТ 1948-2008 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

Определение погрешностей взаимного положения ПЗС матриц по единичному эталону угла

$$G \cdot O = U \qquad O = \begin{pmatrix} \delta R \\ \delta\varphi \\ \delta\psi \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} \dfrac{X_1 \cos\varphi + Y_1 \sin\varphi}{q_1} & \dfrac{X_1 \cdot (r_{x1} \cdot \cos\varphi - R \cdot \sin\varphi) + Y_1 \cdot (r_{y1} \cdot \cos\varphi + R \cdot \cos\varphi)}{q_1} & \dfrac{X_1 r_{y1} \sin\varphi + Y_1 r_{x1} \sin\varphi}{q_1} \\ \dfrac{X_2 \cos\varphi + Y_2 \sin\varphi}{q_2} & \dfrac{X_2 \cdot (r_{x2} \cdot \cos\varphi - R \cdot \sin\varphi) + Y_2 \cdot (r_{y2} \cdot \cos\varphi + R \cdot \cos\varphi)}{q_2} & \dfrac{X_2 r_{y2} \sin\varphi + Y_2 r_{x2} \sin\varphi}{q_2} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dfrac{X_J \cos\varphi + Y_J \sin\varphi}{q_J} & \dfrac{X_J \cdot (r_{xJ} \cdot \cos\varphi - R \cdot \sin\varphi) + Y_J \cdot (r_{yJ} \cdot \cos\varphi + R \cdot \cos\varphi)}{q_J} & \dfrac{X_J r_{yJ} \sin\varphi + Y_J r_{xJ} \sin\varphi}{q_j} \end{bmatrix}$$

$$X_j = -V_{xj} + R \cdot \cos\varphi + r_{xj} \cdot \sin\varphi \qquad Y_j = -V_{yj} + R \cdot \sin\varphi + r_{yj} \cdot \sin\varphi$$

$$q_j = \sqrt{X_j^2 + Y_j^2} \qquad j = 1, 2, \dots, J$$

$$U = \begin{pmatrix} A_1 - q_1 \\ A_2 - q_2 \\ \dots \\ \dots \\ A_J - q_J \end{pmatrix} \qquad O = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot U$$