А. О. Коноплев (Москва, ФГУП «НИИ ПП»). **Оценка точности определения угловых координат движущегося космического объекта оптической системой с матричным приемником.**

При определении точности координат движущегося на, в том числе звездном фоне, космического объекта (КО) рассмотрим два алгоритма: астрометрический [1] и оптимальный [2], который практически реализует потенциальную точность измерения координат.

Оценка точности астрометрического алгоритма. Регистрируется на матрице поток фотоэлектронов и считывается. По превышению порога выделяются кандидаты в звезды, определяются их координаты в системе координат матрицы. Строится система уравнений, связывающая эти координаты (определенные координаты кандидатов в звезды) с тангенциальными координатами

$$\xi_i = ax_i + by_i + c, \quad \eta_i = dx_i + ey_i + f, \tag{1}$$

$i = 1, 2, \ldots, n$ — количество звезд, x_i, y_i — измеренные координаты, a, b, c, d, e, f — постоянные кадра, вычисляются способом наименьших квадратов из решения уравнений вида (1). В свою очередь, тангенциальные (стандартные) координаты, которые подставляются в уравнения вида (1), связаны с эллиптическими координатами звезд из каталога и находятся на этом этапе следующим образом. Для каждой из выбранных звезд образуется ее вектор положения $r(x, y, z)$. Компоненты x, y, z вычисляются по формулам: $x = \cos\alpha\cos\delta$, $y = \sin\alpha\cos\delta$, $z = \sin\delta$. Здесь α, δ — экваториальные координаты звезды, взятые из каталога. Далее образуется вектор $r(x, y, z)$ по формуле: $r(u, v, w)^T = S\, r(x, y, z)^T$, T — знак транспонирования, матрица

$$S = \begin{pmatrix} -\sin\alpha_c & \cos\alpha_c & 0 \\ -\cos\alpha_c \sin\delta_c & -\sin\alpha_c\sin\delta_c & \cos\delta_c \\ \cos\alpha_c\cos\delta_c & \sin\alpha_c\cos\delta_c & \sin\delta_c \end{pmatrix},$$

где α_c, δ_c — сферические координаты точки небесной сферы, соответствующей оптическому центру снимка. Тангенциальные координаты вычисляются по формулам: $\xi = Fu/w$, $\eta = Fv/w$. Это координаты на плоскости изображения, выраженные в долях фокусного расстояния оптической системы. После вычисления, постоянные кадра подставляются в ту же систему, где неизвестными будут уже так называемые *вычисляемые эллиптические координаты звезд* α', δ', и которая (система) уже не будет избыточной. Ошибка в определении координат будет определяться как $\alpha - \alpha' = \Delta\alpha$ и $\delta - \delta' = \Delta\delta$, причем в $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ входит ошибка каталога $\Delta\alpha_k$, $\Delta\delta_k$. Далее пишутся уравнения пересчета в экваториальные координаты для космического объекта, подставляются коэффициенты, вычисленные по звездам, координаты КО на матрице и вычисляются *экваториальные координаты* КО: $x'_{\text{КО}} \to \alpha'_{\text{КО}}$ и $y'_{\text{КО}} \to \delta'_{\text{КО}}$. Здесь ошибка определения координат КО будет определяться ошибками определения координат звезд: $\sigma_\alpha^2 = \overline{(\alpha' - \alpha)^2}$ и $\sigma_\delta^2 = \overline{(\delta - \delta')^2}$ или в тангенциальных координатах

$$\sigma_\xi^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Delta\xi_i)^2, \quad \sigma_\eta^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Delta\eta_i)^2. \tag{2}$$

Эти величины составляют порядка $\sigma_\xi \approx 0{,}2'' \div 1''$ [1]. Для оценки точности оптимального алгоритм [2] вычисляется потенциальная точность измерения координат КО непосредственно по измеренным фотоотсчетам, если координаты матрицы точно известны. В нашем случае потенциальная точность определяется матрицей Фишера, и для координат при $x = y = 0$ можно записать

$$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \biggl(-\frac{n_c}{\sigma} \iint\limits_{\Sigma} \left(\frac{x^2 - \sigma^2}{\sigma^4}\right) \exp\left\{ -\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right\}

$$\times \ln\left(1+\frac{n_c}{n_\Phi+n_T}\exp\left\{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right\}\right)dx\,dy\Bigg)^{-1}. \qquad (3)$$

Считаем, что с дальности $R = 1000$ км пришло за время $T = 5$ сек $n_c = 30$, $n_\Phi = 120$, при этом $n_T = 5$, $n_{\text{сч}} = 20$. Тогда, вычисляя по формуле (3), получим $\sigma_x^2 = 2,24\,10^{-6}$ м^2, $\sigma_x \approx 1,5\,10^{-3}$ м, $\sigma_x = 15\,10^{-8}$ рад $\approx 0,03''$. Данные по размерам пятна ~ 20 мкм и пикселей (~ 10 мкм) приводились из практического опыта. Сравнительные расчеты по (2) и (3) показывают, что точности определения координат при применении оптимального алгоритма могут особенно в реальном времени быть выше точности определения координат КО по астрометрическому алгоритму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коноплев А. О.*, *Новиков С. Б.* Астрометрическое программное обеспечение угловых измерений космических объектов для широкопольных систем обзора космического пространства. — Электромагнитные волны и электронные системы, 2007, т. 12, № 7, с. 20–24.
2. *Бакут П. А.*, *Выгон В. Г.*, *Шаргородский В. Д.*, *Шумилов Ю. П.* Статистический синтез оптимального алгоритма обнаружения космических объектов при наблюдении в оптическом диапазоне. — Радиотехника и электроника, 2009, т. 54 (в печати).