

# 星敏感器星象模拟软件的研究

郝胜国, 郝志航

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

**摘要:**星敏感器是高精度姿态测量部件,广泛应用于各种航天器中,作用对象是空间恒星,成像过程涉及光学系统、CCD探测器及前端信号处理系统,最后输出惯性坐标系或地心坐标系下的姿态角。本文完成了对星敏感器成像过程的模拟,研制了星敏感器星像模拟软件,为星敏感器及其他类似航天器的性能评价提供了有效手段。

**关键词:**星敏感器;星像模拟;面阵CCD器件

**中图分类号:**V447.1 **文献标识码:**A

## 1 引言

星敏感器是一种优良的空间姿态测量部件,具有精度高、重量轻、功耗低和工作方式多种多样(星跟踪、星扫描、星图仪)等综合优势。星敏感器对星空成像,产生数字图像帧传输给核心的数字信号处理器进行处理,最后输出惯性坐标系或地心坐标系下的姿态角。

数字信号处理器的功能必须在地面进行全面、严密的测试,以保证航天任务的有效完成。但作为其工作对象的数字图像帧只有在星敏感器在轨时才能获得,所以仿照星敏感器在轨时的工作过程,模拟出星敏感器在轨时对星空成像输出的数字图像帧用于评价星敏感器性能和评价处理软件成为星敏感器研制中的重要组成部分。在其他航天器的研究和天文研究中也发挥一定的作用。

## 2 星敏感器

### 2.1 星敏感器的发展

姿态控制是航天器的重要组成部分,其作用是在航天器的运行期间,控制航天器使其稳定或平稳运动,满足航天器上的有效载荷的使用要求。

姿态失控意味着航天器已经失效。姿态控制的前提是姿态敏感,即探测出航天器的当时姿态。确定航天器姿态的一般方法是选择一个可靠的参照系,如惯性空间、地球、太阳或恒星等,根据不同参考系,制作相应的传感器。根据传感器所测量出的相对参考系的信息变化推测出航天器的姿态变化。依据上述原理,科学工作者研制成功了多种姿态敏感器。其中以恒星为参照系,以星空为工作对象的星敏感器拥有多方面的优势,成为其中的佼佼者。本世纪七十年代末期开始发展的基于面阵CCD器件的星敏感器,现在已经发展到第二代。已经开始具有自主导航功能,拥有越来越广阔的应用前景。

### 2.2 星敏感器的组成及工作过程

星敏感器主要包括光学系统、面阵CCD器件、前端处理器、数字信号处理器。光学系统完成星空的光学成像;CCD探测器完成光电转换;前端处理器完成视频处理及A/D转换,输出数字图像帧;数字信号处理器完成判星、单星定位、星识别、星敏感器姿态角和航天器姿态角的计算等工作。

星敏感器作为望远光学成像系统,对天空背景和恒星目标成像。其工作过程涉及恒星目标、背景辐射、光学系统、CCD及信号处理和提取等环节,每个环节均会影响到输出的星空数字图像帧。

### 3 数字星像的生成

#### 3.1 任意指向下光学系统焦面上星像几何位置的确定

模拟中首先任意指定一指向,根据星敏感器的视场和星表中提供的各星的位置,找出此指向下可在焦面上成像的星的空间位置。我们使用的是 J2000.0 基本星表, J2000.0 星表提供的是恒星在标准历元(J2000)的平赤道坐标(平位置),而星敏传感器上所得的是恒星在观测瞬时的真赤道坐标(观测位置)在 CCD 框标坐标系上的投影。我们需要的姿态是观测时刻的瞬时姿态,需进行平位置到视位置的转换。

由标准历元平位置化算到视位置的过程是:标准历元平位置加上由标准历元到当年年中的岁差和自行就得到当年年中的平位置,年中平位置加上由年首到当天的岁差和自行则得当天平位置,当天平位置加上章动则得真位置。由太阳质心化算到地球质心,即加入光行差,则得视位置(赤经坐标系)。具体过程参照参考文献[1]。

我们以赤经坐标系为基准坐标系。首先以圆视场搜索成像星。星敏感器的指向以其光轴无限延长与天球交点的位置表示。设星敏传感器指向

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(C_{J_0} - \frac{\pi}{2}) & -\sin(C_{J_0} - \frac{\pi}{2}) & 0 \\ \cos(C_{J_0} - \frac{\pi}{2}) & \cos(C_{J_0} - \frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(C_{W_0} + \frac{\pi}{2}) & -\sin(C_{W_0} + \frac{\pi}{2}) \\ 0 & \sin(C_{W_0} + \frac{\pi}{2}) & \cos(C_{W_0} + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos k_0 & -\sin k_0 & 0 \\ \sin k_0 & \cos k_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_i \\ \bar{Y}_i \\ \bar{Z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos C_{J_i} \cos C_{W_i} \\ \sin C_{J_i} \cos C_{W_i} \\ \sin C_{W_i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

#### 3.2 CCD 输出图像

对星敏传感器而言,星目标为点光源,焦面上星像为光学系统的点扩散函数。光学系统并非理想,星像能量分布近似为二维高斯分布:

$$\mu_i(x, y) =$$

$(C_{J_0}, C_{W_0})$ , 圆视场半径  $R$ , 则空间位置  $(C_J, C_W)$  满足下式的星可成像:

$$\begin{aligned} C_J &\in (C_{J_0} - R/\cos C_{W_0}, C_{J_0} + R/\cos C_{W_0}) \\ C_W &\in (C_{W_0} - R, C_{W_0} + R) \end{aligned} \quad (1)$$

以星敏传感器指向、成像星的空间位置和光学系统焦距为参数,可计算出星像中心在焦面上的几何位置。下面给出变换公式,推导过程参考文献 3。设星敏传感器光学系统焦距  $f$ , CCD 像面  $y$  轴和极轴与星敏传感器主轴所成平面之夹角为  $k_0$ , 第  $i$  颗成像星的方位  $(C_{J_i}, C_{W_i})$ , 星等  $M_i$ , 在焦面上的几何坐标为  $(X_i, Y_i)$  (以 CCD 左上角为坐标原点), 主点坐标为  $(X_0, Y_0)$ , 则

$$\begin{aligned} X_i &= X_0 + f \frac{a_1 \bar{X}_i + b_1 \bar{Y}_i + c_1 \bar{Z}_i}{a_3 \bar{X}_i + b_3 \bar{Y}_i + c_3 \bar{Z}_i} \\ Y_i &= Y_0 + f \frac{a_2 \bar{X}_i + b_2 \bar{Y}_i + c_2 \bar{Z}_i}{a_3 \bar{X}_i + b_3 \bar{Y}_i + c_3 \bar{Z}_i} \end{aligned} \quad (2)$$

将此几何位置与 CCD 尺寸大小相比较,判断是否能在 CCD 上成像。设 CCD 大小为  $M \times N$ , 像元尺寸为  $a \times a$ , 则焦面几何位置满足下式的星可在 CCD 上成像。

$$\begin{aligned} X_i &\in (X_0 - Ma/2, X_0 + Ma/2) \\ Y_i &\in (Y_0 - Na/2, Y_0 + Na/2) \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$-\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

设有  $N$  颗星成像, 则星目标成像形成的光电子密度为:

$$\begin{aligned} s(x, y) &= \sum_{i=1}^N k \int s_i A \tau(\lambda) Q \mu_i(x, y) P(\lambda) t_s d\lambda \\ s_i &= 5 \times 10^{10} / 2.512^{M_i} \end{aligned} \quad (7)$$

星敏感器中星像中心位置的计算采用细分算法以提高星像中心定位精度,其中 $3 \times 3$ 细分算法最为常用。对二维高斯分布进行模拟计算,可知方差 $\sigma = 0.45$  (像元)时,90%以上的能量集中在 $3 \times 3$ 矩阵内。故二维高斯分布近似中, $\sigma$ 取为0.45(像元)。

天空为一平滑背景,亮度相当于10等星,在CCD上成像形成的光电子密度为:

$$b(x, y) = \int b_0(x, y) A \tau(\lambda) Q \mu_i(x, y) P(\lambda) A_p t, d\lambda$$

$$b_0(x, y) = 5 \times 10^{10} / 2.512^{10} \times (1 + \frac{1}{2} \cos(2\pi(k_1 x + k_2 y) / L_b))$$

其中  $k_1^2 + k_2^2 = 1$

(8)

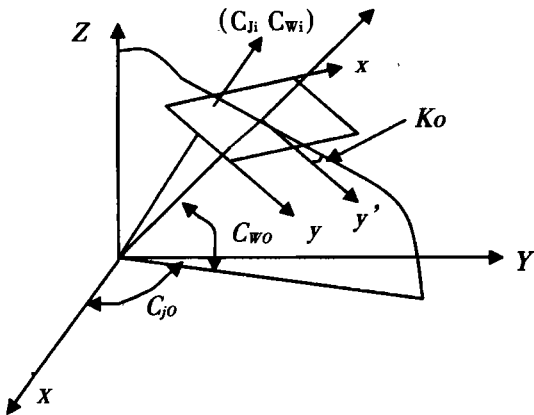


Fig. 1 Attitude angles of star-tracker

天空中大量的太空碎片,以及光学系统中灰尘的散射现象,我们称为大目标。大目标亮度变化也比较平滑,它们形成的光电子密度如下式:

$$t(x, y) = t_0(x, y) A Q t, A_p$$

$$t_0(x, y) = (t_0 + 1/2 t_0 \cos(2\pi(l_1 x + l_2 y) / L_t)) \times A(x, y)$$

(其中  $l_1^2 + l_2^2 = 1$ )

$$(x, y) \in R, A(x, y) = 1; (x, y) \notin R, A(x, y) = 0$$

(9)

$R$  为任意形状的连通的区域,  $t_0$  为大目标平均光子流量,可认为相当于三等星的亮度。上两式中  $L_b, L_t$  分别表示天空背景和大目标亮度变化的特征长度。

综合以上各方面因素,CCD第 $(m, n)$  ( $0 \leq m \leq M-1, 0 \leq n \leq N-1$ ) 个像元获得

的总光电子数:

$$I(m, n) = \int_{m-1}^{(m+1)\Delta} \int_{n-1}^{(n+1)\Delta} s(x, y) + b(x, y) + t(x, y) dx dy = s(m, n) + b(m, n) + t(m, n)$$

(10)

CCD响应不均匀性影响较小,上述计算中不予考虑。

CCD器件本身有转移噪声、输出噪声、暗电流噪声和散粒噪声。随着制造工艺水平的提高以及相关双采样等技术的应用,前两种噪声已经降到很低水平,模拟中不予考虑。暗电流是载流子的热产生而发生的随机过程,是一种白噪声。均方差等值电子数等于暗电流产生的电子数的平方根:

$$n_D = \sqrt{N_{CCD}}$$

(11)

$N_{CCD}$  为暗电流产生的电子数,与CCD器件有关。

散粒噪声是光子流的随机特性引起的,服从泊松分布,也属于白噪声。方差为信号电子数的平方根。对应与  $I(m, n)$  的三个分量,均方差分别为  $n_s = \sqrt{s(m, n)}$   $n_b = \sqrt{b(m, n)}$   $n_t = \sqrt{t(m, n)}$

(12)

则总的噪声均方根值为:

$$J(m, n) = (n_s^2 + n_b^2 + n_t^2 + n_D^2)^{1/2} = (s(m, n) + b(m, n) + t(m, n) + N_{CCD})^{1/2}$$

(13)

我们用高斯分布随机数发生器加入总噪声:

$$Z(m, n) = \text{RandomG}(0, J(m, n))$$

(14)

RandomG产生服从高斯分布的随机数,均值为0,方差为  $J(m, n)$ 。

这样CCD输出的电信号为:

$$P(m, n) = I(m, n) + Z(m, n)$$

$$(0 \leq m \leq M-1, 0 \leq n \leq N-1)$$

(15)

### 3.3 数字图像帧的生成

CCD输出的信号经过前端处理器处理,输出数字图像。视频处理电路由于各自设计方法及布线方式的差别,各不相同。在器件选用、布线和布局合理的情况下影响较小,不予考虑。设A/D转换器饱和电压  $V_M$ , 输出  $B$  位定点二进制数,则数字图像帧为

$$D(m,n) = \text{Int}\left(P(m,n) \frac{2^b}{V_M}\right) (P(m,n) < V_M)$$

$$D(m,n) = 2^b - 1 (P(m,n) \geq V_M)$$

(16)

其中  $\text{Int}(a)$  表示对  $a$  取整。

本节中用到的符号列表如下:

Table 1 Measuring of symbol

$S_i(x,y)$	Optical flow density of $i$ th star imaging
$B_0(x,y)$	Optical flow density of sky background
$A$	Optical aperture
$\tau(\lambda)$	Optical transmission efficiency
$Q$	Quanta efficiency
$k$	Band coefficient
$A_p$	Angle area of pixel
$t_i$	Integration time

面的地面实验中。

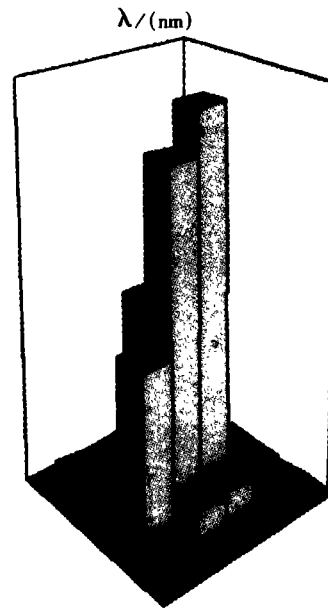


Fig. 2 Three dimension star image

#### 4 模拟结果及应用

参照 SMMS 星敏器初步方案设计报告和 FTT1010CCD 数据手册,我们给出了模拟中所需参数。5 和 6 式中的  $L_0, L_i$  根据参考文献[2]分别取为 100 和 20(像元)。图 2 是典型星目标成像的立体表示,柱体的高度表示星像中该像元的灰度值。图 3 是模拟敏器指向赤经  $84^{\circ}6'0''$ 、赤纬  $-1^{\circ}0'18''$  时星敏器获得的数字图像。另外利用本软件生成了一系列星像数据帧,利用作者的判星、单星定位程序计算出各星的中心位置,提供给陈元枝博士的星图识别程序,取得了良好的效果。若加上大气的影响,本软件则可应用于天文研究方



Fig. 3 Simulated star image(Orion's tri-star)

#### 参考文献:

- [1] 曹蔚,范瑜,胡晓淳,郭新建,杜明辉. 基本星表和天球坐标系[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [2] Uwe Schmit, Dietmar Wunder. Hard-wired digital data preprocessing: applied within a modular star and target tracker[C]. Proc. SPIE, 1997, 3163: 214--223.
- [3] 诺顿 A P. 星图手册[M]. 北京:科学出版社,1984.

## Star image simulation software of star-tracker

HAO Sheng-guo, HAO Zhi-hang

*(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)*

**Abstract;** Star tracker is a high accurate attitude measuring instrument used in various spacecrafts. The operation process of the star tracker consists of stars imaging on focal plane through optical lens, star light-to-charge conversion with a CCD sensor, preprocessing of star signal for eliminating noise, centroid calculation with sub-pixel algorithms, and at last the attitude computing and coordination conversion. In this paper, the operation process simulation is implemented except the attitude computing. Some simulation results are given in the paper. The method used in the paper is useful for evaluation of star tracker performance. This software can be used in both various space sensors development and astronomical research. But, if it is used in astronomical research, atmospheric effect must be taken into account.

**Key words;** star-tracker; star image; simulation

**作者简介:**郝胜国(1975—),男,黑龙江方正县人。1997年毕业于清华大学现代应用物理系,现为中科院长春光所硕士研究生。主要从事数字图像处理、大规模可编程逻辑器件的应用方面的研究。

**E-mail:** hsg@sohu.com