

文章编号 1004-924X(2006)06-1052-05

电路噪声对星敏感器星点定位精度的影响

张 辉^{1,2}, 钟建勇¹, 袁家虎¹, 刘恩海¹

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种测量星敏感器电路模块带来的图像噪声的方法。在实验室条件下,用星敏感器拍摄多幅背景图像,分析表明:不同背景图像上相同像素的灰度差值代表了电路模块带来的图像噪声,该噪声服从正态分布。模拟产生该正态分布的随机矩阵作为图像噪声加到理想的星点上,采用亚像素细分质心算法计算出带噪声的星点质心坐标,从而得到噪声带来的星点位置偏差。计算结果表明:实验室条件下,星敏感器实测 6 等星的质心测量精度为 1/25 Pixel,而电路噪声将引起 1/200 Pixel 量级的标准偏差;电路噪声,尤其是 DC/DC 电源纹波噪声对星敏感器星点定位带来的误差是不容忽视的。

关键词:星敏感器;精度;电路噪声;DC/DC 转换器

中图分类号:V448.21 **文献标识码:**A

Circuit noise effects on star sensor position accuracy

ZHANG Hui^{1,2}, ZHONG Jian-yong¹, YUAN Jia-hu¹, LIU En-hai¹(1. *The Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;**2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: A method to measure image noise caused by circuit module was introduced. Firstly, many background star maps were taken at laboratory and calculated statistically, and max gray difference of the same pixel was taken for image noise caused by circuit module. The statistical data show that circuit module noise was accorded with normal probability density distribution. Secondly, based on the energy distribution model of ideal star point, a gray matrix of an ideal star of visual magnitude ~ 6 was calculated. Then star point with circuit image noise was produced with adding random noise matrix of normal distribution to ideal star point. Finally, based on subpixel centroid arithmetic and simulation data, star position error was calculated. The results show that circuit module can bring image noise of normal distribution; For 6 Mv stars at laboratory, this noise can achieve the accuracy level of 1/200 pixel. Compared with the accuracy level 1/25 pixel of actual star position measurement, circuit noise can not be neglected.

Key words: star sensor; accuracy; circuit noise; DC/DC converter

收稿日期:2006-06-14;修订日期:2006-10-24.

基金项目:中国科学院“十五”预研支撑技术项目(No. 42201020101)

1 引言

星敏感器因其具有精度高、功耗低、重量轻等优点而在众多姿态敏感器中脱颖而出,成为当今航天器最具竞争力的姿态敏感技术。而其能够得到迅速发展和广泛应用的一个主要原因是它具有很高的姿态测量精度。然而,同样的 CCD 星敏感器,国内能达到的三个轴上的姿态精度普遍比国外低,甚至在滚动角的估计精度上低一个数量级。因此,对星敏感器进行精度研究的工作是重要的。在表征星敏感器精度的指标中最重要的是星点测量精度,它是星敏感器姿态精度的基础。

CCD 星敏感器是以恒星光作为测量对象,以电荷耦合器件 CCD 作为核心敏感元件的光电转换电子测量系统。按工作性质主要分为探头信号检测单元、模拟信号处理单元、数据采集存储单元和数据处理单元几部分组成。星敏感器工作原理如下:在探头信号检测单元,被拍摄的恒星通过镜头成像在 CCD 光敏面上,由 CCD 将星光的光能量转换成模拟电信号,经过模拟信号处理单元对其进行放大、滤波、整形等处理后,数据采集存储单元对其进行模数转换和数据采集;当 CCD 摄像头拍摄到的天空星图以数字量的方式存在于内存中时,数据处理单元的工作是对数字化后的星图进行处理,通过星点提取、星点坐标计算及星图识别,经过坐标变换确定星敏感器光轴在惯性空间中的指向,最后由此指向及其与卫星本体的安装角就可以完成卫星三轴姿态的确定。从星敏感器的硬件组成结构和工作流程来看,光学系统、光电转换器件及其支持电路、信号处理电路、电源电路以及机械结构、软件算法等各个环节,都不可避免地会对星点测量带来误差^[1-2]。

模拟电路部分、电源模块以及模数(A/D)转换等环节都会对星点测量带来误差,但却很少有人对此进行探讨。基于此,本文将从实验着手,统计并分析实验数据得到电路模块对所拍星图带来的图像噪声及其分布规律;再从理论上分析该噪声对理想星点带来的位置偏差。

2 电路噪声及星点定位误差的测量

2.1 电路噪声及其测量方法和原理

电路噪声主要包括模拟电路噪声、A/D 转换

的量化噪声、电源波动的干扰等。另外,时钟的不均匀性使采样点不理想等因素也会带来星点质心的偏差。

研制的星敏感器采用了 TH7890M CCD 芯片作为图像传感器,其输出为微弱的模拟电信号。模拟信号处理单元需对该信号进行放大、滤波、整形等处理。对模拟信号进行处理的放大器都是低噪声放大器,和片内放大器噪声相比较,其噪声很小^[3]。模数转换电路将模拟信号转化为数字信号,一定范围内的模拟输入信号会产生同样的数字输出,由此带来的误差称为量化噪声,服从均匀分布^[3]。适当选取量化电平可使其均值为零,噪声方差为: $\Delta V_N^2/12$,其中: ΔV_N 是输入信号的量化间隔。若均匀量化,有: $\Delta V_N = V_{\max}/2^N$,则量化噪声电压为: $V_{\text{noise}} = V_{\max}/(2^N \sqrt{12})$,其中: V_{\max} 是最大电压, N 为模数转换的位数,研制星敏感器采用了 $N=12$ 位的 A/D 转换器,其满量程为 2 V,所以 V_{noise} 约为 0.1 mV 量级。电源电路为整个星敏感器系统提供了能源,一般采用低功耗、高精度、小型封装的 DC/DC 模块实现。DC/DC 噪声主要是指电源的波动对有用信号产生扰动,最终导致星点成像位置的偏差。研制的星敏感器采用的 DC/DC 转换器输出电压典型值为 5 V、±15 V 等,输出纹波电压典型值为 20 mV(P-P),理论最大值为 50 mV(P-P),该波动对于 5 V 的输出电压而言是不能被忽视的。以上各项电路噪声虽有不同的产生机理,但最终结果都使星点在 CCD 上成像的位置产生扰动。设计经验表明:在众多电路噪声中,DC/DC 电源噪声是导致星点位置偏差的最主要因素。

实验上,电路模块带来的图像噪声可以采用如下的方法进行测量和计算:在实验室连续拍摄 n 幅黑背景图像(512 Pixel×512 Pixel);所有图像上相同像素的灰度最大差值就代表了该项噪声。

该测量方法具体分析如下。用星敏感器对黑背景(将星敏感器的光学镜头完全遮光)进行连续重复拍摄,得到多幅黑背景图像。若整套系统是理想的(无误差、无噪声)系统,那么每幅图像上同一像素 i 的灰度测量值 G_i 都应相同,且等于理想的灰度值 G_0 。但由于星敏感器系统存在以下主要误差:光学镜头的像差、CCD 模块带来的误差、模拟信号处理单元带来的电路噪声、机械结构安装误差,使得不同背景图像上 G_i 值发生波动。设

上述四种误差源对像素 i 的灰度测量带来的灰度误差分别为： Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 和 Δ_4 ，则实际测量灰度 $G_i = G_{w_0} + \Delta_i$ ，其中 $\Delta_i = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4$ ，表示像素 i 的灰度测量误差。

对于连续拍摄(相同的实验条件)的背景图像而言,误差 Δ_1 和 Δ_2 均属于不变的系统误差;CCD 噪声^[4-5]和电路噪声的性质决定了这两项误差带来的灰度误差 Δ_3 和 Δ_4 属于随机误差。TH7890M CCD 的主要噪声包括读出噪声(RN)、光子散粒噪声(PSN)和光响应不均匀(PRNU)引起的随机噪声。实验中只对全黑背景进行拍摄,使得 CCD 器件与入射光相关的噪声 PSN 和 PRNU 可以不予考虑;在一定的读出频率下,RN 的噪声值是一常数。电路噪声的 Δ_4 中最主要的一项是 DC/DC 电源输出电压波动带来的灰度测量误差,主要表现为同一像素灰度值的波动。上述分析表明,对连续拍摄的多幅黑背景图像灰度矩阵进行统计计算,对相同像素的灰度做差值便抵消了 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 的影响,得到 Δ_4 的灰度波动。该值便代表了电路噪声带来的图像噪声。另外,通过对背景图像灰度的分析及适当处理可以排除面阵 CCD 上的异常点(瑕疵点)等。

2.2 电路噪声的测量及计算

在实验室条件下,用星敏感器连续拍摄了 10 幅黑背景图像。计算所有图像上相同像素灰度的最大差值,得到一个灰度差值矩阵 ΔE ,为 512×512 矩阵。本次实验数据统计结果表明:该 ΔE 矩阵元素中出现 42、37、17、12 的灰度值各一次,背景图像上相应像素点的灰度值远高于其它点,故认为这些点是瑕疵点,可以将这些异常值排除。该灰度矩阵包含一个瑕疵点的 9×9 子矩阵如表 1 所示。

表 1 灰度差值矩阵的子矩阵

Tab.1 Submatrix of the gray difference matrix

3	3	5	4	3	2	4	2	4
3	3	3	3	3	3	3	4	3
2	3	4	4	5	3	3	2	5
4	2	4	5	4	3	3	4	4
8	3	3	3	42	4	5	3	4
3	4	3	3	3	3	4	4	5
4	5	4	2	2	4	3	4	2
4	3	3	2	5	3	4	2	6
3	4	4	1	2	5	1	3	6

统计 ΔE 矩阵中各灰度值出现的频率,结果如图 1 中的“○”符号所示。从图中可以看出,该图像噪声分布近似服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 。由算术平均值公式计算得该分布的均值为： $\mu = 3.5$ ，由贝塞尔公式计算得标准差为： $\sigma = 1.0$ ，正态分布 $N(3.5, 1.0^2)$ 曲线如图 2 中的点线所示。虽然灰度是 0~255 之间的整数,但此处为计算准确性,均值和标准差按实际的小数值计算,并不影响最终的结果。

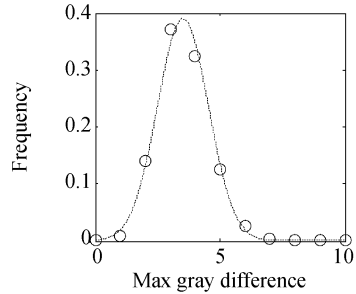


图 1 灰度最大差值出现的频率

Fig.1 Frequency of max gray difference

2.3 星点位置误差的测量

在实验室,采用多星模拟器模拟了 9 颗 6 等星,呈 3×3 点阵分布在星敏感器视场内,经星敏感器成像并提取星点后计算出质心坐标 (x, y) 。连续重复拍摄星图,并记录实验数据。本次实验共记录了 21 组数据。其中,位于星敏感器 CCD 靶面中心处的一颗星点质心坐标数据如表 2 所示,单位为像素。

表 2 视场中心处星点质心坐标

Tab.2 Centroid coordinate of star point at the field center

X	Y	次数
247.02	271.06	1
247.02	271.07	1
247.02	271.47	5
247.02	271.48	1
247.03	271.06	2
247.03	271.07	3
247.03	271.47	3
247.03	271.48	3
247.03	271.49	1
247.04	271.47	1

由标准差公式:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x})^2}{t-1}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^t (y_i - \bar{y})^2}{t-1}}, \quad (1)$$

可得该星的星点坐标标准差为: $\sigma_{x1} \approx 0.006$ Pixel, $\sigma_{y1} \approx 0.197$ Pixel。同理计算其它 8 颗星的星点坐标标准差, 并取平均得: $\sigma_x \approx 0.08$ Pixel, $\sigma_y \approx 0.08$ Pixel。因此, 该星敏感器对 6 等星的星点定位精度量级为 $1/25$ Pixel (0.08 Pixel)。该星点测量误差包括了光学系统、光电转换、电路模块及星点提取算法等各项误差。

3 电路噪声对星点定位精度的影响

3.1 星点质心算法

CCD 芯片上理想星点的光能量分布满足正态分布, 点扩散函数可以用二维高斯函数表示^[1]:

$$\phi(x, y) = \frac{\Phi}{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}{2\sigma_{\text{PSF}}^2}\right), \quad (2)$$

其中: (x_0, y_0) 为星点的中心坐标, σ_{PSF} 为高斯半径, 表示点扩散函数的能量集中度。

对点目标进行亚像素细分通常采用质心公式:

$$x_c = \sum x_{ij} I_{ij} / \sum I_{ij}, y_c = \sum y_{ij} I_{ij} / \sum I_{ij}, \quad (3)$$

其中: $I_{ij} = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \phi(x, y) dx dy$ 为 CCD 像元 (i, j) 的能量测量值, (x_{ij}, y_{ij}) 为 CCD 像元 (i, j) 沿轴向的坐标。背景电平和 CCD 像素读出噪声影响了星点中心坐标的探测精度。可以通过设置一个阈值 I_t 来减小这个影响因素, 从而提高星点中心坐标的精度。这样质心公式改为:

$$x_c' = \sum x_{ij} (I_{ij} - I_t) / \sum (I_{ij} - I_t)$$

$$y_c' = \sum y_{ij} (I_{ij} - I_t) / \sum (I_{ij} - I_t), \quad (4)$$

阈值 I_t 可以设为背景灰度平均值。

显然, 在不考虑噪声的情况下, CCD 像元对光斑能量分布的采样会导致点扩散函数变形, 从而导致亚像素细分质心计算的误差。当 $\sigma_{\text{PSF}} = 0.671$ 时, 有 95% 以上的光能量落在 3×3 像元上, 内插精度在 0.0001 Pixel 的量级^[6], 能满足目前星敏感器的精度要求。

3.2 电路噪声带来的星点定位误差

实际应用中, 采用 3×3 星点来计算星点中心坐标。

对于理想的 6 等星, 设其在实验室条件下灰度分布为表 3。已知其理想的中心亮度为 $E_0 = 160$ 。据理想星点光能量分布 (取 $\sigma_{\text{PSF}} = 0.671$ Pixel) 计算得到其它像素的灰度分别为: $E_1 = 63$, $E_2 = 25$ 。设该理想的 6 等星星像点的灰度矩阵为 E_0 。

表 3 实验室 6Mv 星灰度分布

Tab.3 Gray distribution of 6 Mv star

E_2	E_1	E_2
E_1	E_0	E_1
E_2	E_1	E_2

由电路噪声带来的星点定位误差可以如下计算: 首先产生一个灰度服从 $N(3.5, 1.0^2)$ 分布的 3×3 随机矩阵 W ; 将 W 作为随机噪声加到理想星点 E_0 上, 从而得到了含电源纹波噪声的星点, 其灰度矩阵为 $E = E_0 + W$; 由公式 (4) 可以计算得到该星点中心坐标 (x_c', y_c') ; 重复上述步骤 m 次, 得到 m 个星点中心坐标; 最后计算标准差:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ci}' - x_0)^2}{m-1}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (y_{ci}' - y_0)^2}{m-1}}, \quad (5)$$

σ_x, σ_y 为电路噪声带来的星点定位误差。

3.3 计算结果及分析

由式 (5) 计算可得到 σ_x, σ_y 随 m 变化的关系曲线, 如图 2 所示。从图中可见随着 m 的增加, σ_x, σ_y 趋于稳定, 最终当 m 取得足够大时, σ_x, σ_y 均稳定在 0.0045 Pixel (约 $1/200$ Pixel 量级)。

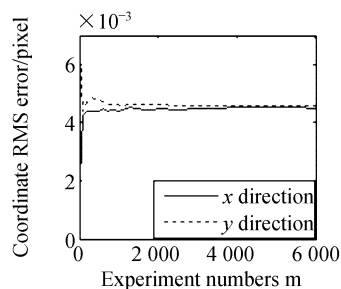


图 2 星点坐标标准差曲线

Fig.2 RMS error curve of star coordinate

由上述结果可知:实验室拍摄的 6 等星的星点定位精度量级为 $1/25$ Pixel, 电路噪声带来的星点定位误差是 $1/200$ Pixel 量级。该结果本身也还存在着一些误差因素, 比如由实验数据统计噪声分布时, 实验室拍了 $n=10$ 幅星图得到了一个正态分布, 由于 n 值不够大, 所以计算出的均值和标准差可能会有偏差; 背景星图是在不同时刻拍摄得到的, 光强的微小变化也可以带来图像上像素灰度的波动等等。

4 结 论

本文提出了一种简单易行的测量星敏感器电

路模块带来的图像噪声的方法。实验及理论分析表明:对于研制的星敏感器而言, 电路模块带来图像噪声符合正态分布; 对实验室条件下实测 6 等星星点定位精度为 $1/25$ Pixel, 电路噪声将引起约 $1/200$ Pixel 量级的标准差; 随着星等的提高, 标准差将减小。由此可知:电路模块带来的噪声对星点定位精度的影响是不容忽视的。本文对星敏感器电路噪声的分析方法, 在适当的实验条件下, 可以类似的用于对其它噪声进行分析。

参考文献:

- [1] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers-a tutorial[J]. *IEEE Trans. On Aerospace and Electronics Systems*, 2002, 38(2):587-599.
- [2] 卢欣, 方蓉初. 星敏感器技术[J]. *控制工程*, 2001, (6):69-78.
LU X, FANG R CH. The technology of star sensors[J]. *Control Engineering*, 2001, (6):69-78. (in Chinese)
- [3] GERALD C. *Holst. CCD arrays, cameras, and displays*[M]. Washington: JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [4] 佟首峰, 阮锦, 郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(2):140-145.
TONG SH F, RUAN J, HAO ZH H. Noise reducing scheme on output signal of CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2):140-145. (in Chinese)
- [5] 陈迎娟, 张之江, 张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(2):216-220.
CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel nonuniformity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(2):216-220. (in Chinese)
- [6] 王一凡. 根据光能量分布确定 CCD 内插求中心精度[J]. *控制工程*, 1993, (4): 11-13.
WANG Y F. Centroid accuracy determination of CCD interpolated method by optical energy distribution [J]. *Control Engineering*, 1993, (4):11-13. (in Chinese)

作者简介:张 辉(1974—), 女, 新疆哈密人, 博士生, 目前主要从事星敏感器技术研究。E-mail: zhanghuixj@sohu.com