

# 基于图像处理的太阳光矢量倾角测量方法

Measuring method for inclination angle of sun light vector with image processing technique

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)王红睿 方伟  
WANG Hong-rui FANG Wei

**摘要:**为了提高在轨太阳光谱辐射的绝对定标精度,提出了太阳光矢量和太阳光谱仪主光轴夹角的测量方法。以图像处理技术为基础,构造了太阳光矢量和太阳光谱仪主光轴夹角的测量系统。入射的太阳光经在成像器件上成像,然后经过图像处理,获取了太阳光像点中心的位置,进而计算了太阳光矢量和与太阳光谱仪主光轴的倾角。实验表明测量方法是有效的,测量系统工作可靠稳定,测量精度约为 $0.05^\circ$ 。

**关键词:**图像处理;光谱仪;辐射定标;太阳辐射

中图分类号:TN216 文献标识码:A

**Abstract:** Measuring method of angle between sun light and optical axis of solar spectrometer is proposed to improve precision of absolute calibration for solar spectral irradiance. Measuring system is constructed to obtain the angle between sun light and optical axis of solar spectrometer. The sun light falls in to the imaging device and the image is grabbed. Central position of sun's image is obtained through image processing. Then angle between sun light and optical axis of solar spectrometer is calculated. Experiments have indicated that the measuring method is validated, and the measuring system work reliably. Measuring precision is about  $0.05^\circ$ .

**Key words:** Image processing; Spectrometer; Radiation calibration; Solar radiation

## 引言

航天光谱仪器的辐射定标通常采用地面定标的方法。一般采用地面上的实验室辐射标准来校正航天光谱仪器的定标装置,其中太阳辐射常被用作辐射的基准。由于受到各种不利因素的影响,在轨定标装置的稳定性限制了辐射定标的精度。另外,由于地面实验室和宇宙环境的差异,航天光谱仪器的测量数据一般不能追溯到国际单位制标度。为此,航天光谱的绝对辐射测量技术受到了普遍的重视。绝对辐射测量仪器可不依赖于任何辐射标准而直接标定辐射。通常的绝对辐射测量仪器都是热电型探测器。绝对辐射测量一般采用电标定的方法,以电功率再现的方法来定标辐射。

对于高精度的在轨太阳光谱辐射绝对测量及定标任务,需要考虑一系列的外界因素,引入相应的数据校正处理操作,例如对应温度漂移的校正处理、日地距离的校正处理等。但是,在现有大多数的太阳光谱辐射的绝对定标设备中,通常假设待测的入射光垂直进入仪器,没有考虑入射光以特定角度入射仪器的情况。这些设备通常忽略了对入射光与仪器主光轴倾角的修正。太阳光谱的绝对辐射定标精度可进一步提高。

为了提高卫星上太阳光谱辐射绝对定标的精度,研究了太阳光矢量和太阳光谱仪主光轴夹角的测量方法。针对卫星上太阳光谱辐射的绝对定标任务,采用图像处理的方法,初步构造了测量太阳光和光谱仪主光轴夹角的原理验证样机。整个测量系

统包括探测单元、图像处理等模块。入射的太阳光通过滤光片衰减后在 CCD 成像器件的光敏面上成像,然后由信息处理电路完成图像读取、图像预处理、图像分割、图像分析等操作,获取太阳光像点中心的像素标号,最终得到太阳光矢量和与太阳光谱仪主光轴的倾角。

## 1 测量系统简述

测量系统由下列几个部分组成,示意图见图 1。

(1)探测单元。包括视场限制光阑、成像光孔、衰减滤光片(可选)等。成像单元采用小孔成像的方式,避免了引入透镜等光学部件,整体的光学结构紧凑、简单。光学系统中无像差。这种光学结构降低了整体光机结构设计的复杂性,减轻了整体的质量,提高了系统的可靠性。入射光经过光阑后,在成像器件的光敏面上成像。成像器件主要完成信息的采集工作。选用面阵的 CCD 图像传感器来获取光经过小孔成像形成的图像信号。需要根据跟踪精度、测量精度等指标,选择成像器件像元阵列的尺寸  $M(X$  方向像素个数) $\times N(Y$  方向像素个数)、成像器件的物理尺寸  $W(宽度)\times H(高度)$ 。另外还要根据预定的测量精度要求,选择透光阑的直径  $d$ 、光阑到成像器件表面的焦距  $f$ 。

(2)图像处理单元。这个单元主要完成采集图像预处理、图像特性的抽取、图像分析、角度计算等工作。以数字采集盒来捕获图像,采用上位机来实现图像处理等算法。



图 1 探测单元示意图

王红睿:博士 助理研究员

基金项目:自然科学基金(61077080),航天光谱仪新理念高精度在轨绝对辐射定标方法研究。(1.基金申请人:方伟 2.基金资助项目名称:航天光谱仪新理念高精度在轨绝对辐射定标方法研究 3.基金颁发部门:中国国家自然科学基金委员会)

### 1.1 成像光孔

成像光孔是在一块圆形金属片上经过钻孔而加工制成的。成像光孔的前面是视场限制光栏,后面是衰减滤光片。视场限制光栏及圆形金属片表面全部经过涂黑处理。在加工及安装成像光孔的过程中,要保证其孔径的中心光轴与 CCD 图像传感器光敏面的中心法线重合。在成像光孔的设计过程中,要考虑到下面几个限制因素。

第一点,确定成像光孔直径的时候,应考虑太阳光经过光孔的衍射效应。成像光孔的直径不能太小以避免太阳光在图像传感器光敏面形成非圆形强度变化的衍射光斑。

第二点,合理选择成像光孔到成像器件表面的距离  $d$  以保证测量系统的视场角满足要求。这个成像光孔到图像传感器光敏面的垂直距离是决定系统视场角大小的重要因素。

第三点,合理选择成像光孔和成像器件表面的距离  $d$  以使得测量系统的角度分辨率满足设计要求。

### 1.2 滤光片

由于太阳光的能量较大,为了防止 CCD 图像传感器长期工作在饱和状态,没有采用直接成像的方法,而是采用外加滤光片的设计。在设计衰减滤光片时需要注意太阳的光谱辐射特性,综合考虑下面几个问题。

第一点,为了保证 CCD 图像传感器处于稳定的工作状态,需要有效地控制入射到图像传感器的太阳光总能量。

第二点,尽量不要使得图像传感器工作在饱和状态。

第三点,为了使得 CCD 图像传感器具有较高的工作效率,需要调节入射到 CCD 图像传感器上的太阳光谱频带。

第四点,为保证测量系统长期宇航飞行的可靠性,需要考虑对 CCD 图像传感器的辐照保护。

## 2 图像处理算法

在获取了包含太阳像点的图像后,为了计算太阳像点的中心位置,将采用图像处理的方法。图像处理由图像预处理、图像特征抽取、图像分析三个模块组成。图像预处理包括空域滤波增强。图像特征抽取包括自动阈值设定、二值化图像。图像分析包括图像的连通区域标记、中心计算等等。

### 2.1 图像滤波

为了提高太阳像点和背景之间的对比度,尽量多的消除背景的影响,采用空域的滤波增强方法。空域增强方法是指直接作用于像素的增强方法,可表示为:

$$g(x, y) = F[f(x, y)] \quad (1)$$

其中  $f(\cdot)$  和  $g(\cdot)$  分别为增强前后的图像,  $(x, y)$  表示图像中的某个像素点,  $F$  代表滤波操作。

采用了非线性的中值滤波器来进行图像增强,以便在消除图像噪的同时保持图像的细节,处理步骤如下:

- (1) 将模板在图像中遍历,逐一将模板中心移动到各个像素;
- (2) 读取经过模板平滑后各像素的灰度值;
- (3) 将平滑后的灰度值从小到大排序;
- (4) 选择中间的像素灰度值;
- (5) 将这个中间像素灰度值赋给对应模板中心位置的像素。

### 2.2 图像分割

采用局部阈值的方法不利于整个系统的自动化运行。因此,

采用设置全局阈值的方法来分割图像。

选取 Otsu 阈值设置方法来自动地求取全局阈值以便分割图像。Otsu 阈值设置方法使用了最小二乘法原理,可以得到使目标像素和背景像素类间距离最大的阈值  $T$ 。

根据 Otsu 方法获取的阈值  $T$ ,可以将太阳像点区域提取出来,将目标和背景初步分割开来。经过图像分割处理后的图像  $g(x, y)$  为

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) \geq T \\ 0 & \text{if } f(x, y) < T \end{cases} \quad (2)$$

### 2.3 计算太阳像点中心

在对图像进行分割之后,可提取太阳像点的中心位置。计算太阳像点中心的方法有重心法、相关算法等。结合图像的特点,采用重心法来计算太阳像点的中心位置。把太阳像点的区域重心视为太阳像点的中心。

在获取了二值化图像之后,太阳像点的中心为

$$x_p = \frac{\sum_{j=1}^M x_j p_j}{\sum_{j=1}^M p_j} \quad (3)$$

$$y_p = \frac{\sum_{j=1}^M y_j p_j}{\sum_{j=1}^M p_j} \quad (4)$$

其中  $p_j$  为二值化图像中的像素灰度值,  $x_j$  为像素的行标号,  $y_j$  为像素的列标号,  $M$  为图像中的像素总数。

### 2.4 太阳光和太阳光谱仪主光轴的夹角

由图 2,在图像传感器 X 方向和 Y 方向,太阳像点中心 C 到图像传感器中心 O 的距离分别为

$$|OA| = |0.5N_x - x_p| k_x \quad (5)$$

$$|OB| = |0.5N_y - y_p| k_y \quad (6)$$

其中,  $k_x$  为图像传感器 X 方向每个像素的物理长度,  $k_y$  为图像传感器 Y 方向每个像素的物理长度,  $N_x$  为面阵 CCD 图像传感器 X 方向像素个数,  $N_y$  为面阵 CCD 图像传感器 Y 方向像素个数。

图像传感器中心 O 到太阳像点中心 C 的距离为

$$|OC| = \sqrt{(0.5N_y - y_p)^2 k_y^2 + (0.5N_x - x_p)^2 k_x^2} \quad (7)$$

假设太阳光为平行光,则太阳光矢量和太阳光谱仪主光轴的夹角为

$$\theta = \frac{d}{\sqrt{(0.5N_y - y_p)^2 k_y^2 + (0.5N_x - x_p)^2 k_x^2}} \quad (8)$$

## 3 实验结果

采用第二节中介绍的测量系统测量了太阳光矢量和太阳光谱仪主光轴的夹角。实验中测量系统捕获到的图像及太阳像点中心的定位结果见图 2。在图 2 中,图(b)为图(a)的太阳像点定位结果,图(c)为图(d)的太阳像点定位结果,图(f)为图(e)的太阳像点定位结果。其中的红色“\*”表示太阳像点中心,红色数字为太阳像点中心像素的标号。

由图像处理的结果,对照图 2 中的原始图像,可知测量系统能较为准确地定位太阳像点的中心。使用上述的测量系统进行了累计时间约为 100 个小时的性能考核试验。测试结果经过分析后,得到了该系统的技术指标。其中,太阳光矢量和光谱仪主光轴的夹角的测量偏差约为  $0.05^\circ$ 。通过实验可知测量系统可较为准确并稳定地测量太阳光和太阳光谱仪主光轴的夹角,为卫星上太阳光谱辐射的高精度绝对定标任务提供了技术支持。

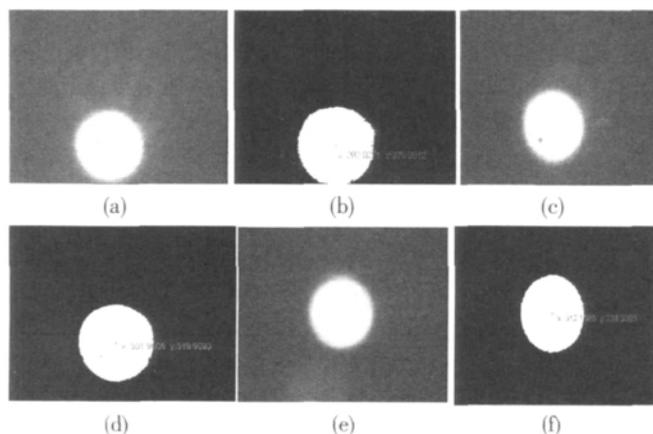


图2 系统获取的图像及太阳像点中心定位结果

## 4 结论

为了提高卫星上太阳光谱辐射的绝对定标精度,以数字图像处理技术为基础,研究了太阳光矢量和光谱仪主光轴夹角的测量方法,构造了测量太阳光和光谱仪主光轴夹角的原理验证样机。角度测量系统包括探测单元、图像处理等模块。入射的太阳光通过滤光片衰减后在 CCD 成像器件上成像,然后图像处理模块完成图像读取、图像预处理、图像分析等操作,获取太阳光像点中心的位置,得到太阳光矢量和与光谱仪主光轴的倾角。实验表明测量系统可较为准确并稳定地获取太阳光和仪器主光轴的夹角,太阳光矢量和光谱仪主光轴夹角的测量精度约为  $0.05^\circ$ 。

创新点:以图像处理技术为基础,提出了太阳光矢量和太阳光谱仪主光轴夹角的测量方法。

作者对本文版权全权负责,无抄袭。

### 参考文献

- [1] Jerald W, Juan F, George L and etc. The spectral irradiance monitor: measurement equations and calibration [J]. Solar Physics, 2005, 230: 169-204
- [2] 王伟,方伟,禹秉熙,姚海顺.FY-3 卫星太阳辐照度监测仪星上测量校正因子的研究[J].长春理工大学学报,2003,16(3):87-91.
- [3] 禹秉熙,方伟,王玉鹏. 卫星宽视场绝对辐射计太阳越过视场时入射光变化与腔温响应函数 [J]. 光学 精密工程,2004, 12 (4): 353-358.
- [4] 弓成虎,方伟. FY-3A 太阳辐射监测仪的程控设计与实现[J]. 光学 精密工程,2010, 18(7): 1475-1482.
- [5] 李君兰,张大卫,王以忠等. 面向 IC 封装的显微视觉定位系统 [J]. 光学 精密工程,2010, 18(4): 965-972.
- [6] 赵小川,罗庆生,陈少波. 改进型图像中的直线快速检测[J]. 光学 精密工程,2010, 18 (7): 1654-1660.
- [7] 石文轩,吴敏渊,邓德祥. 遥感图像去云雾噪声的实现[J]. 光学精密工程,2010, 18 (1): 266-273.
- [8] 张磊,何昕,魏仲慧等. 三角形星图识别算法的改进[J]. 光学 精密工程,2010, 18 (2): 458-463.
- [9] 侯晴宇,张伟,武春风等. 改进的均值移位红外目标跟踪[J]. 光学 精密工程,2010, 18 (2): 458-463.
- [10] 苑玮琦,董茜,桑海峰. 基于方向梯度极值的手形轮廓跟踪算法[J]. 光学 精密工程,2010, 18 (2): 1875-1883.
- [11] 刘建伟,梁晋,梁新合. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学 精密工程,2010, 18 (2): 126-135.
- [12] 冉峰,杨辉,黄舒平. 面阵 CCD 彩色视频图像实时采集系统的设计[J]. 光学 精密工程,2010, 18 (1): 273-280.

[13] 何家维,何昕,魏仲慧等. 电子倍增 CCD 星相机的设计[J]. 光学 精密工程,2010, 18(3): 764-770.

[14] 宋庆华,江春华等. 基于图像处理的火炮身管定位定向方法 [J]. 微计算机信息,2010,1(1):109-110

[15] 高伟欣,穆向阳等. 基于图像处理的焊管焊缝气孔检测[J]. 微计算机信息,2010,2(2):33-35

作者简介:王红睿(1980-),男(汉族),博士,吉林长春人,助理研究员,研究方向:辐射测量,机器视觉,非线性控制。

**Biography:** WANG Hong-rui (1980-), male (Han), PhD, assistant researcher. He received BEng and MEng in Department of control engineering in Jilin University in 2006 and 2009 respectively. His research interests include radiation calibration, machine vision and nonlinear control.

(130025 吉林 长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 王红睿 方伟

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Changchun, Jilin, Changchun 130025, China) WANG Hong-rui FANG Wei

通讯地址:(130033 吉林 长春 长春市东南湖大路 3888 号长春光机与物理研究所空间一部) 王红睿

(收稿日期:2010.10.25)(修稿日期:2011.01.25)

(上接第 21 页)

[3] 丁志军, 基于 Petri 网精练的系统建模与分析, 同济大学博士论文, 2006.

[4] Jensen, K. Colored Petri Nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use Volume 1, Basic Concepts. Monographs in Theoretical Computer Science. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2nd corrected printing 1997.

[5] 卞直荣,张等. 基于着色 Petri 网的 IPsec 协议建模与分析[J]. 微计算机信息. 2010, 7-3: 95-96

[6] CPN Tools[CP]. <http://www.daimi.au.dk/CPNtools/>, 2010.

作者简介:李景霞(1976-),女(汉族),安徽巢湖人,安徽农业大学计算机系讲师,博士,主要研究方向为服务计算。赵慧娟(1977-),女(汉族),山东泰安人,上海海洋大学计算机系讲师,在读博士,主要研究方向为服务计算。

**Biography:** LI Jing-xia (1976-), female (Han Nationality), ChaoHu city of AnHui province, School of Information and Computer Sciences, Anhui Agricultural University, lecturer. Main research field: service computing.

(230036 合肥 安徽农业大学信息与计算机学院) 李景霞 赵慧娟

(201306 上海 上海海洋大学信息学院) 李景霞 赵慧娟 (School of Information and Computer Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China) LI Jing-xia ZHAO Hui-juan

(Information College, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China) LI Jing-xia ZHAO Hui-juan

通讯地址:(230036 安徽省合肥市市长江西路 130 号安徽农业大学信息与计算机学院计算机系) 李景霞

(收稿日期:2010.10.25)(修稿日期:2011.01.25)

您的才能 + 阅读本刊 = 您的财富