

折反式红外全景天空相机光学系统设计

王 健^{1,2}, 荆 雷², 郭帮辉^{1,2}, 孙 强¹, 卢振武¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用红外全景天空相机可以获得天空中云的分布和温度信息, 从而可对天气状况做出判断。采用等距离投影成像方式, 可根据简单的数据转换关系从天空全景图像中任意点的位置坐标得到其对应的空间角度。为了实现等距离投影红外全景相机的设计, 提出了一种简洁高效的计算等距离投影反射镜面型的数值方法, 并在此基础上设计了 8~12 μm 长波红外波段全景天空相机。该相机的视场角为 $360^\circ \times (5^\circ \sim 80^\circ)$, 校准畸变量在 $\pm 0.02\%$ 以下, MTF 值在探测器 Nyquist 频率处高于 0.4, 非常适用于全景天空观测。

关键词: 等距离投影; 折反式; 全景相机; 长波红外; 光学设计

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0648-05

Optical design of catadioptric infrared panoramic sky camera

Wang Jian^{1,2}, Jing Lei², Guo Banghui^{1,2}, Sun Qiang¹, Lu Zhenwu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By use of an infrared all-sky camera, the distribution and thermal information of cloud in the sky can be obtained, thus the weather conditions can be further estimated and predicted. with the equidistance projection imaging method, every point in an all-sky image can be mapped into its corresponding spatial angle via simple data processing and conversion. An easy-to-use numerical method was proposed to acquire the profile of a catadioptric mirror, which brought the property of equidistance projection and played the most important role in a catadioptric panoramic lens. With this numerical method, an f-theta catadioptric infrared panoramic sky lens operating at 8-12 μm was designed for cloud observation. The sky lens had a wide field of view of $360^\circ \times (5^\circ \sim 80^\circ)$, the calibrated distortion was less than $\pm 0.02\%$, and the MTF was over 0.4 at the Nyquist frequency of 14 lp/mm. The designed camera was very suitable for all-sky observation.

Key words: equidistance projection; catadioptric; all-sky camera; LW-infrared; optical design

收稿日期: 2012-07-22; 修订日期: 2012-08-19

基金项目: 中国科学院院地合作项目

作者简介: 王健(1980-), 男, 博士生, 主要从事红外光学系统和光学设计方面的研究。Email: mrwangj@yahoo.com.cn

导师简介: 卢振武(1955-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事波动光学、衍射光学方面的研究。Email: luzw@ciomp.ac.cn

0 引言

近年来,红外全景天空相机在气象学领域得到了越来越广泛的应用,美国、日本等国家的多个观测站已经启动了 CONCAM、TASCA、MMT 等全景天空观测项目^[1-3],中国于近年也开始了相关领域的研究^[4-5]。观测人员根据全景相机对天空半球所成的图像,分析天空中云层的覆盖比例和分布情况,计算云的运动速度,进而可对天气状况做出快速准确的判断和预测。与可见光全景天空相机相比,红外全景相机不仅能获取云的图形信息,还能获取云的温度信息。特别是对中低云层成像时,由于云层接近地表,辐射温度较高,会与天空背景形成强烈的温度反差^[3]。另外,红外全景天空相机在夜间、尘雾等不适合可见光波段成像的条件下也能正常工作,具有更好的环境适应性^[6-7]。

全景光学系统的实现方式主要有两种:传统的鱼镜头结构和折反式结构^[8]。鱼镜头具有体积小、不存在中心视场遮拦的优点,但在视场内或视场周围存在强光源(如太阳)的情况下,通常会受到杂散光的影响,从而导致图像的恶化^[1]。折反式全景成像系统由一个曲面反射镜和一个折射镜组构成,通过反射镜对光线入射角进行压缩,降低了光线在折射镜组的入射角度,可以最大程度地减少二次反射引起的杂散光;反射镜与折射镜组之间为开放式结构,可以避免视场外的强光在筒壁上反射所产生的杂光。基于上述原因,在气象观测中,很多红外全景光学系统都采用折反式结构^[2-3]。

在红外全景天空相机光学系统设计中,除了要对球差、彗差、色差等影响成像质量的像差进行校正外,还要对镜头的畸变进行特殊控制。在折反式系统中畸变的控制主要通过对反射镜面型的设计来实现。在现有的设计中,大多采用等角度投影方法,即反射镜以某一比例系数对光线的入射角度进行压缩反射。虽然这种投影方式能够实现对空间目标的定位,但是相机的空间分辨率随视场角度的改变而改变。解决这一问题的途径是采用等距离投影方法。文中根据气象观测的需要,提出了一种数值求解等距离投影反射镜面型的方法,并在此基础上设计了一套满足等距离投影关系的红外全景天空相机光学系

统。系统的工作波段为长波红外 8~12 μm,视场角为 360°×(5°~80°),f-θ 畸变量在±0.02%以下。

1 系统工作原理

折反式红外全景天空相机的工作原理如图 1 所示。从云层发出的红外辐射,被反射镜反射后,经由折射单元成像在探测器靶面上。

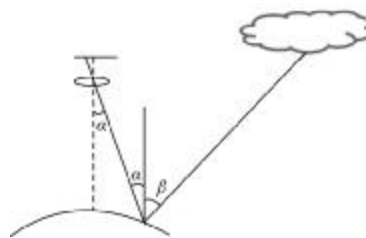


图1 全景天空相机工作原理图

Fig.1 Operating principle of panoramic sky camera

全景相机的视场范围很大,基本上覆盖了天空半球。对于理想的无畸变光学系统,像高 h 与入射角度 β 之间应满足:

$$h=f \cdot \tan \beta \quad (1)$$

其中, f 为系统焦距。当 β 接近 90° 时,像高趋于无穷大,所以对于全景相机,不可避免地要对图像引入较大的畸变,这也使得像高与目标的角度关系变得相对复杂。为了精确获得目标的空间角度与像面坐标之间的关系,通常要对镜头畸变进行特殊控制,将光学系统设计为等距离投影模式,即整个成像系统的像高与目标高度角直接成线性关系,亦即满足 $f-\theta$ 条件。

$$h=k\beta \quad (2)$$

其中, k 为常数。利用公式(2)就可以直接建立图像位置坐标与空间方位的简单映射关系。

对公式(2)两边微分可得:

$$\delta h=k \cdot \delta \beta \quad (3)$$

从公式(3)可以看出等距离投影方式的另一个优点:像高变化量只与视场变化量有关,而与视场角的大小无关。也就是说,系统的角分辨率不随视场变化,探测器每个像素对应固定的空间角度。

2 等距离投影反射镜面型计算方法

折反式系统中,反射镜的面型对整个系统的畸变有着很大的影响。反射镜面型不合理,单独依靠折

射单元很难实现对畸变和其它像差的控制。反之,如果通过反射镜实现等距离投影关系,可以显著地降低后端折射单元的设计难度。

参考文献[9-10]给出了满足特殊投影关系的反射镜的设计方法。其方法都是采用半解析方法,在一定的近似条件下利用数值求解微分方程的方式获得镜面面型,求解过程极为繁琐。基于光线反射前后的角度关系和等距离投影条件,采用数值计算的方法对所需的反射镜面型逐点求解,而后对获得的坐标点进行多项式拟合,最终得到满足要求的曲面面型。

图 2 给出了反射镜数值求解所用到的主要光线

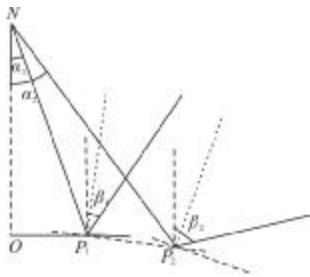


图 2 反射模型的光线关系

Fig.2 Rays propagation in the reflecting model

关系。为了便于显示,图中角度都被夸张画出。图中 O 点为反射镜的中心,光线对反射镜的入射点为 P,入射角度为 β ,反射后对折射单元的角度为 α 。折射单元位于反射镜正上方的 N 点,焦距为 f_r 。当反射镜满足等距离投影关系时,折射单元不引入畸变,因此折射单元的像高与折射单元的入射角之间满足公式(1)。

结合等距离投影条件(2),可得:

$$\beta = k' \cdot \tan \beta \alpha \quad (4)$$

其中, $k' = \frac{f_r}{k}$ 同样为一常数。

下面确定比例系数 k' 。假设 N 到 O 点的距离为 H,反射镜的通光直径为 D,则折射镜组的最大入射角满足:

$$\tan \alpha_m = \frac{D}{2H} \quad (5)$$

全景相机的最大视场为 β_m 。把 β_m 及 α_m 代入公式(4),可以确定比例系数:

$$k' = \frac{2H}{D} \beta_m \quad (6)$$

各参数确定以后,可利用下面求解方式对镜面面型进行数值求解:

(1) 从 N 点引出一个小的角度 α_1 ,与镜面经 O 点的切线交于 P_1 。利用公式(4)可以确定其对应的角度 β_1 ,根据 α_1 和 β_1 确定镜面在 P_1 点的法线方向及切线方程。

(2) 增加入射角度至 α_2 ,与经过 P_1 点的切线交于 P_2 。同样利用(4)式确定其对应的角度 β_2 ,根据 α_2 和 β_2 计算镜面在 P_2 点的法线方向和切线方程。

(3) 利用以上方法,逐渐增大入射角度 α 至折射镜组的最大入射角 α_m ,可获得一系列坐标点 P_1, P_2, \dots, P_m 。

(4) 对这些坐标点进行多项式拟合或高次非球面方程拟合,即得到满足等距离投影的曲面形式。

根据数值试验,采用这种方法时,只需要取 10 个点左右就能获得较高的精度,与微分方程的求解方式相比偏差在 1% 以下。

3 光学系统设计及分析

基于以上等距离投影反射镜的计算方法,设计了一套折反式长波红外全景天空相机光学系统。选用的探测器分辨率为 384×288 ,像元大小为 $35 \mu\text{m}$ 。光学系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 光学系统主要指标

Tab.1 Parameters and specifications of optical system

Parameters	Specifications
Wavelength range/ μm	8-12
Field of view/($^\circ$)	$360 \times (5-80)$
F/#	1
Spatial resolution/($^\circ$)	0.28
Imaging quality	MTF > 0.4 @ Nyquist frequency
f- θ distortion	< $\pm 0.1\%$

从图 1 中可以看出,反射镜上方的折射镜组对系统的中心视场具有遮挡作用,折射镜组距反射镜的高度 H 和折射单元的外形尺寸影响着中心遮拦视场的大小。通常情况下, H 越大,遮拦比越小。同时,折射镜高度与反射镜直径决定着折射单元最大入射角度的大小,也就约束了折射单元的焦距。对遮拦比和折射单元入射角度进行分析后,取 $H=600 \text{ mm}$, $D=$

240 mm。

根据以上参数和第 2 节所提出的反射镜设计方法,得到等距离投影反射镜面型方程的多个采样点,镜面及光线计算结果如图 3 所示。

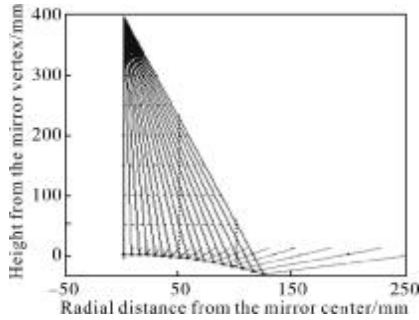


图 3 反射镜各采样点及光线轨迹

Fig.3 Mirror sampling points and their rays tracking

因为反射镜是回转对称的,可以利用金刚石车削技术加工,所以在进行数据处理时几乎没有对拟合曲线类型的要求。对这些采样点进行简单的三次多项式拟合,得到反射镜的初始面型方程:

$$y=0.023\ 9r-0.003\ 6r^2-2.372\times 10^{-6}r^3$$

对于折射单元,根据公式(4)和公式(1)可以得到其主要参数: $\alpha_m=11.3^\circ$, $f_r=25.2\text{ mm}$ 。折射单元需要校正反射镜所引入的像差,主要为场曲和像散。由于反射镜不会引入色差,且折射单元焦距较短,轴向色差和二级光谱都不明显,因此折射单元的设计可采用 3 组 4 片式结构,材料可以全部采用锗透镜。

在折反式全景天空相机光学系统的优化设计中,首先控制折射单元的焦距和畸变对透镜组进行优化,直到其满足基本的成像关系;再将反射镜参数设为变量,对折反系统进行总体性的优化。在进行总体优化时,不再限制焦距量,而是通过控制不同视场的像高以使光学系统保持 $f-\theta$ 成像条件。通过以上方法完成系统的优化后,得到的系统光路如图 4 所示。

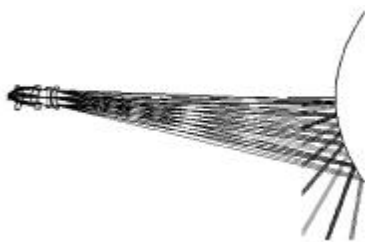


图 4 系统光路图

Fig.4 Optical system layout

对设计结果的成像质量分析如图 5~7 所示。图 5 为光学系统的调制传递函数(MTF)曲线。在探测器的 Nyquist 频率(14 lp/mm)处镜头 MTF 高于 0.6,能够满足系统的成像要求。

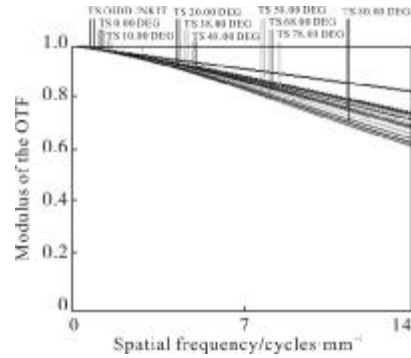


图 5 不同视场下的调制传递函数曲线

Fig.5 MTF curves for different field of view

图 6 为系统的圆内能量比例随半径的变化情况。从图中可以看出,对于所有视场,超过 70%的点目标能量都能落入 $35\ \mu\text{m}$ 的直径之内。

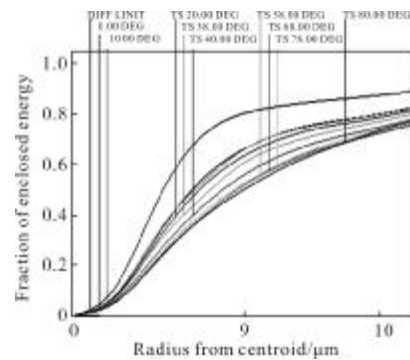


图 6 圆内能量随半径变化的曲线

Fig.6 Encircled energy versus radius

系统的场曲和 $f-\theta$ 畸变曲线如图 7 所示。可以看

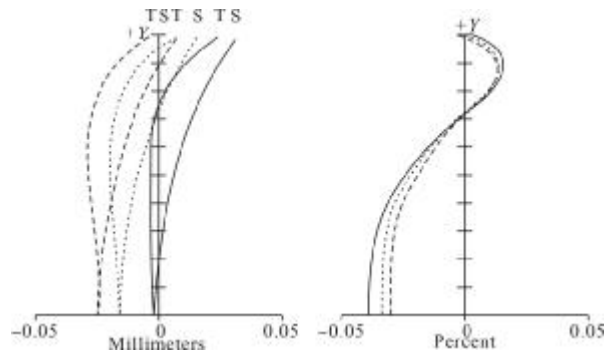


图 7 场曲和 $f-\theta$ 畸变曲线

Fig.7 Field curvature and $f-\theta$ distortion

出,系统的校正后 $f-\theta$ 畸变在 $\pm 0.02\%$ 以内,像高与目标角度间满足严格的线性关系。

以上成像性能分析说明光学系统具有较好的成像质量,并且满足等距离投影关系,便于对云层图像进行图像处理和分析,能够满足气象观测的需要。

4 结 论

折反式全景镜头畸变控制的核心在于反射镜的设计。常规的等距离投影反射镜设计方法需要半解析法求解微分方程,过程繁琐且计算量大。文中利用反射镜的等距离投影条件和光线反射的角度关系,提出了一种用于等距离投影反射镜设计的数值方法,并在此基础上对全景红外相机光学系统进行了设计。系统的视场角达到了 $360^\circ \times (5^\circ \sim 80^\circ)$,在探测器 Nyquist 频率处的 MTF 值优于 0.6,角分辨率为 0.28 ($^\circ$)/pixel, $f-\theta$ 畸变在 $\pm 0.02\%$ 以下。该系统在气象观测领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Pickering T E. The MMT all-sky camera [C]//SPIE, 2006, 6267: 62671A1-A7.
- [2] Zeljko Andreic. A simple 180° field of view $F-\theta$ all-sky camera [C]//SPIE, 1991, 1500: 293-304.
- [3] Naruhisa Takatoa, Norio Okadab, George Kosugia, et al. All-sky $10\mu\text{m}$ cloud monitor on Mauna Kea [C]//SPIE, 2003, 4837: 872-877.
- [4] Sun Xuejin, Gao Taichang, Zhai Dongli, et al. Whole sky infrared cloud measuring system based on the uncooled infrared focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 763-764. (In Chinese)
- 孙学金, 高太长, 翟东力, 等. 基于非制冷红外焦平面阵列的全天空红外测云系统[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 763-764.
- [5] Wang Haojing, Wang Jianli, Wang Minghao, et al. Photoelectric measuring system with large field for cloud position determination [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1722-1731. (In Chinese)
- 王昊京, 王建立, 王鸣浩, 等. 大视场云层分布定位的光电测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1722-1731.
- [6] Harvey M, Michael J, Jeffrey M. Optical design of a panoramic, wide spectral band, infrared fisheye lens [C]//SPIE, 2006, 6342: 63421P.
- [7] Fan Yongjie, Jin Weiqi, Liu Chongliang, et al. New progress on FLIR imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 189-194. (In Chinese)
- 范永杰, 金伟其, 刘崇亮, 等. 前视红外成像系统的新进展[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(2): 189-194.
- [8] Liu Jun, Li Jing, Gao Ming. Design of five-channel infrared panoramic optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 668-673. (In Chinese)
- 刘钧, 李璟, 高明. 五通道红外全景光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 668-673.
- [9] Zeljko Andreic, Nikola Radic. All-sky camera with a concave mirror[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(1): 149-153.
- [10] Chahl J, Srinivasan M. Reflective surfaces for panoramic imaging[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 8275-8285.