

文章编号 1004-924X(2008)12-2429-06

# 气象测云红外成像系统的设计与分析

丁金伟<sup>1,2</sup>, 张葆<sup>1</sup>, 李永刚<sup>1</sup>, 撒芑芑<sup>1,2</sup>

(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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**以云层为目标,进行了目标与背景的红外波段分析,确定了气象测云红外成像系统的工作波段(8~14 μm)和红外成像系统的主要技术参数,如视场角、焦距等。基于非制冷红外焦平面阵列(UFPA)探测器件进行了气象测云红外成像系统的光学设计、结构与电路设计,对系统光学设计结果进行详细分析。针对该系统设计了红外图像自适应非均匀校正系统和温度调焦机构,使其在-35℃~+50℃均能清晰成像,校正后残余非均匀性<0.2%。对校正前后图像效果进行对比表明,该系统成像效果较好。

**关键词:**气象测云;非制冷红外焦平面阵列;非均匀性校正;红外成像系统

**中图分类号:**TN216;TH765.6 **文献标识码:**A

## Design and analysis of infrared imaging system for cloud meteorological observation

DING Jin-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Bao<sup>1</sup>, LI Yong-gang<sup>1</sup>, HAN Peng-peng<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** For cloud meteorological observation, the infrared bands of goal, cloud, and background are analyzed and the work band (8~14 μm) of an infrared imaging system for cloud meteorological observation and the main technical parameters such as the angle of field of view, the focal length for infrared imaging system are determined. On the basis of Uncool Infrared Focal Plane Array (UFPA) detector, the optics, structure and the circuit of the infrared imaging system for cloud meteorological observation are designed. The results of optical system design are analyzed in detail. Then, an adaptive Non-uniformity Correction (NUC) system for infrared images and a focusing mechanism on temperature are designed, so that the infrared imaging system can take clear images in the temperature range of -35℃~+50℃. After the adjustment, the remaining non-uniformity is less than 0.2%. Experimental results show that corrected images are better than original one, which means proposed imaging system has a high imaging ability.

**Key words:** cloud meteorological observation; Uncool Infrared Focal Plane Array (UFPA); non-uniformity Correction (NUC); infrared imaging system

收稿日期:2008-08-06;修订日期:2008-10-06.

基金项目:国防科技预研基金资助项目(No. 1040603)

## 1 引言

中高空云层的云雾体积、形状以及云层内悬浮粒子性质等参数,是制作临近天气预报和中短期天气预报的必要资料。在抗洪救灾、森林防火、环保观测以及局部战争等场合都有广泛应用。但是以上应用场合的天气情况下,空气中的气溶胶浓度大,在大气透过率很低,能见度差,仅通过可见光波段对云层进行观测效果并不理想。如果在夜晚观测,更是只能通过红外波段才能取得较好效果。

红外成像通常指  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  的中波红外(MWIR)成像和  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  的远红外(LWIR)成像。红外成像系统用于观察热源,为获取最大的系统灵敏度,大多数热成像系统使用低温制冷的探测器,同时,红外光学镜头材料的价格通常十分昂贵,因此较高的成本使得红外成像在气象上的应用较少。

近年来,随着非制冷红外焦平面列阵(UFPA)探测器件的发展,非制冷型红外热成像系统的成本大幅降低,可靠性明显提高,在军事和民用领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。利用非制冷焦平面红外探测器可以以较低的使用成本实现通过红外波段全天候地观测云层云状等云雾信息。本文介绍了一种以云层为主要观测目标,采用 UFPA 的红外成像系统的设计。

通常,红外成像系统的设计有 3 个环节,即红外探测器的选择、光学系统的考虑、系统总体指标的分析和复算。本文首先进行目标背景分析,然后按此步骤进行系统设计。

## 2 目标背景特性分析

红外成像系统所接受到的目标与背景,或者目标、背景各部分的辐射能量差,是影响红外性能的重要因素<sup>[3-4]</sup>。在红外成像系统设计之前,首先要进行目标与背景的特性分析。

该热像仪的使用方式可能是在地面对空中进行观测,也可能安装在无人驾驶飞机或者其他飞行器等多种载体上,观测角度各不相同,目标与背景特性也不尽相同,本文针对不同的目标背景情况进行分析。

### 2.1 以天空为背景,云层作为目标

天空为背景的红外辐射是散射太阳光和大气热辐射的组合。图 1 给出了白天天空的红外光谱辐射亮度。图 2 给出的是暗积云下侧的光谱辐射亮度。

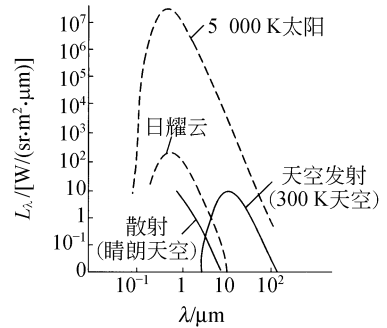


图 1 天空的光谱辐射亮度

Fig. 1 Sky luminance of spectral radiation

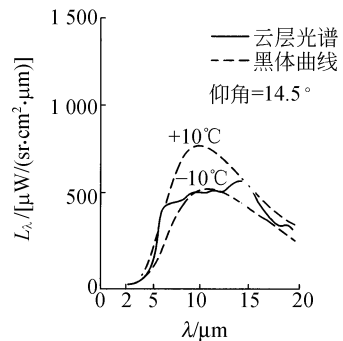


图 2 暗积云下侧的光谱辐射亮度

Fig. 2 Dark cumulus luminance of spectral radiation

由两图可见,在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  范围内,背景天空的红外辐射最小,而在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  范围内,天空热发射区辐照亮度较高。同时对作为目标的云层来说,浓厚云层是良好的黑体,在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  范围内,发射与云层温度有关。取暗积云作为分析对象可见,云层下侧温度为  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  范围内的辐射接近于相同温度下的黑体辐射。

由此可以判断,在以天空为背景的情况下,长波( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ )范围内,天空背景辐射比中波( $3 \sim 5 \mu\text{m}$ )范围大。目标云层的也是如此,但目标辐射亮度远高于天空辐射亮度。

### 2.2 以地面为背景,云层作为目标

当飞机在云层上方时,红外成像系统向下观测,即以地面作为背景,云层作为观测目标。波长

$<4 \mu\text{m}$  时,地物的红外辐射与太阳光和构成地物的物质反射率有关;波长  $>4 \mu\text{m}$  时,地物的红外辐射主要来自自身的热辐射,地物作为背景,中波与长波的辐射照度无明显区别,而目标云层的长波辐射亮度远高于中波辐射亮度。

### 2.3 以海面为背景,云层作为目标

海洋的光辐射由海洋本身的热辐射和它对环境辐射的反射组成,图 3 给出了海洋白天的光谱辐射亮度。

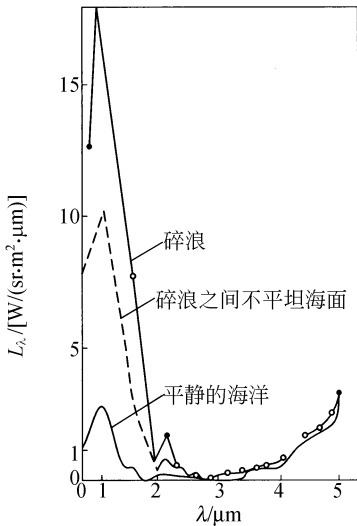


图 3 海洋的光谱辐射亮度

Fig. 3 Ocean luminance of spectral radiation

由于海面的镜面反射现象,在红外波长  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段内,海水亮带区的平均辐射温度达  $44 \text{ }^\circ\text{C}$ ,而非亮带区的海面平均辐射温度为  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ,但在长波  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段内,海洋背景的光谱辐射亮度基本上不受太阳和云层的影响,因此,在以海水为背景的情况下,利用长波  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段的成像系统,可以有效抑制海背景杂波干扰。

## 3 红外成像系统设计

红外成像系统设计的一般过程是:首先,通过分析典型目标尺寸以及目标与背景温差等因素,确定光学系统参数;根据光学参数确定光学镜头结构和红外成像系统整体结构形式以及相应的温度调焦机构;最后,进行红外成像系统的作用距离、MRTD、NETD 等参数分析,进一步校正设计结果。根据以上步骤,进行改进红外成像系统的设计。

### 3.1 红外探测器的选择

通过以上 3 种目标/背景特性分析比较,可以选取  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段作为该红外成像系统的工作波段。在本设计中,采用了法国 SOFRADIR 公司的多晶硅非制冷焦平面微热型探测器,探测器像元数为  $320 \times 240$ ,像元尺寸为  $45 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ ,响应波段是  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ,探测器的 NETD  $< 200 \text{ mK}$ 。

### 3.2 红外镜头设计

#### 3.2.1 目标参数确定

由于本设计中的探测目标是近低空的云层,云层高度一般在  $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}$ 。无论红外成像系统在地面仰视观察或安装在飞行器上俯视观察,考虑观测角度大多数是  $30 \sim 45^\circ$  的情况,目标距离都是  $3 \sim 5 \text{ km}$ 。由此设定以下目标参数:目标距离:  $4 \text{ km}$ ;目标尺寸:  $1\,000 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m}$ 。

#### 3.2.2 红外光学设计

依据 3.2.1 的设定条件,进行光学设计。图 4 为红外光学设计系统结果。

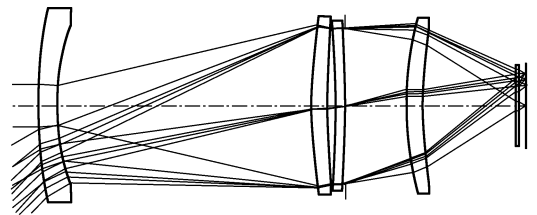


图 4 光学系统布局图

Fig. 4 Optic system layout

该系统由 4 片最为常见的红外材料的透镜组成,前组口径为  $55 \text{ mm}$ ,后截距  $> 20 \text{ mm}$ ,便于安装红外探测器。整个光学筒长为  $90 \text{ mm}$ ,结构比较紧凑。根据观测目标特点,系统确保视场角  $2\omega$  为  $15^\circ$ ;在工作波段和整个视场内,像差校正完善;采用主动调整像面的方法来补偿温度和气压变化而引起的像面移动。

光学设计结果为:

视场角:  $2\omega = 15^\circ$

焦距:  $54.69 \text{ mm}$

光学系统  $F$  数:  $1.0$

#### 3.2.3 光学设计分析

本系统进行了光学传递函数分析,常温下 MTF 全视场  $> 0.7$ ;系统光学设计结果分析如图 5~7 所示,包括 MTF、点列图及像差曲线等。

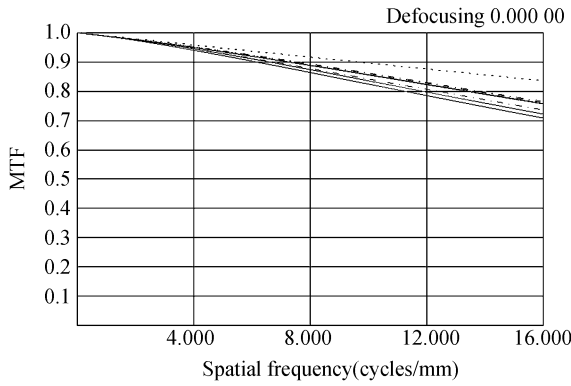


图 5 传递函数(MTF)

Fig. 5 MTF curves

各光学元件之间相对位置(包括空气间隔、同轴度等)符合光学设计要求。镜头结构设计需要考虑镜筒材料、镜片装配顺序、隔圈与压圈的结构形式、装配后应力残余等各方面的要素,确保成像清晰,性能可靠。本系统的结构形式如图 8 所示。

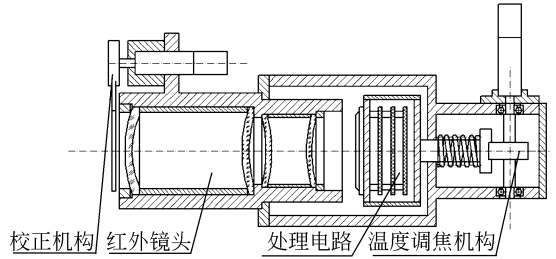


图 8 系统机械结构

Fig. 8 Infrared imaging system

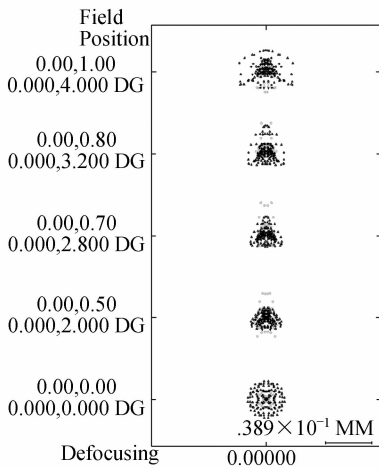


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

### 3.2.5 温度调焦机构

使用环境的温度变化能引起光学元件之间间隔的变化,改变光学系统的焦距;同时温度变化使得红外光学材料自身的折射率发生很大改变,单个光学透镜的焦距随之改变,进而影响整个光学系统的成像质量。因此,红外光学系统设计通常都要进行相应的温度补偿或者结构无热化措施。

而在本系统中,由于镜筒较短,系统工作范围较宽,经过温度效应分析,采用多种结构材料与光学材料进行匹配也无法实现系统无热化。最终采用主动温度调焦机构,确保系统在工作温度范围内成像质量完好。温度调焦机构如图 9 所示。

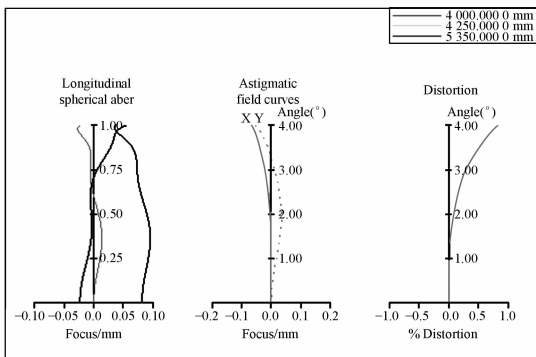


图 7 像差曲线

Fig. 7 Aberration plot

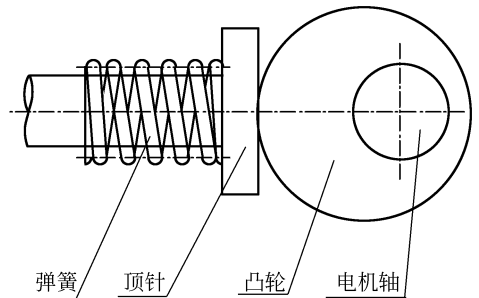


图 9 调焦机构图

Fig. 9 Focusing mechanism on temperature

### 3.2.4 镜头结构布局

红外成像系统的最终成像质量与光学镜头的质量直接相关,而光学镜头的设计原则就是确保

当温度引起成像质量变化时,调焦电机通电运行,带动变焦凸轮转动,凸轮与弹簧共同作用,带动红外探测器单元在光轴方向上前后移动,使得光学系统像面与探测器像面重合,获得清晰图像,完成温度调焦过程。

### 3.3 系统控制电路

红外成像系统电气部分主要由探测器组件、缓冲电路、成像处理电路、系统电源组成。红外成像系统控制电路组成框图如图 10 所示。

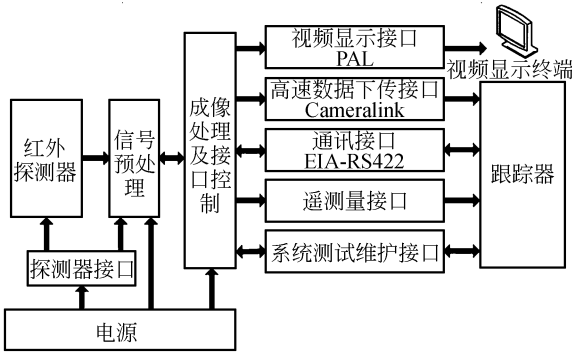


图 10 控制系统组成框图

Fig. 10 Block diagram of control system

(1) 探测器组件:完成辐射的光电转换,包括焦平面探测器,多路传输器,与探测器共同构成一完整的组件。

(2) 探测器缓冲电路:为探测器提供其工作所需的各种偏置电压,完成信号缓冲等功能转换。

(3) 成像处理电路:完成探测器 A/D 转换以及输出电路的非均匀校正、显示控制等功能。

(4) 系统电源电路:为 A/D 与 NUC 电路和探测器组件供电。

### 4 宽温范围内图像自适应非均匀性校正设计

红外成像的非均匀性校正效果是影响红外图像质量的一个关键因素。尤其是当成像系统在相对较宽工作环境温度范围(-35℃~+50℃)时,红外探测器的响应呈现非线性特征,且响应曲线的曲率在各段温度点内有所不同,各像元在全分度范围内的响应曲线也是不同的,因此,对红外图像进行实时的非均匀性校正来获取高质量的红外图像将成为红外成像技术推广应用的技术关键<sup>[5]</sup>。通常采用的两点标定单点修正的方法由于响应曲线曲率较大的温度段可能会较大地偏离校正拟合线,从而呈现较大的残余非均匀性,通常难以在全温度范围内取得良好的校正效果。

本系统的设计采用了分段方式的自适应非均

匀性校正方法,即采用多段线性拟合响应曲线的方法来实现全温度范围内的校正参数的标定。通过多次试验,将全温度范围根据其响应曲率的不同进行适当分段,在各段范围内选去适当的积分时间,采用两温度点校正线性拟合的方法获取该段温度范围的校正参数,温度范围与积分时间的选取既要满足非均匀性要求,又要确保系统灵敏度。

经过多次反复试验,将整个温度范围划分为 6 段,不同的温度范围对应不同的积分时间。表 1 是工作温度范围与积分时间的对应关系。

表 1 温度与积分时间对应关系

Tab. 1 Relation of temperature and integral time

序号	工作温度 (°C)	积分时间 (ms)
1	-35 ~ -25	9
2	-25 ~ -15	7
3	-15 ~ 0	5
4	0 ~ +15	4
5	+15 ~ +30	2
6	+30 ~ +50	1

在热像仪初始化时,要完成 6 组校正参数的现场修正,并在系统中储存修正后的参数。在系统实际工作过程中,根据上级系统的温度传感器测量的环境温度信息自动选择所处的温度段,切换探测器积分时间及校正参数,完成自适应实时非均匀性校正。经测试,在工作温度范围(-35℃~+50℃)内校正后残余非均匀性<0.2%。图 11 为红外成像系统校正前后针对同一目标的不同成像效果对比。



图 11 红外图像校正结果对比

Fig. 11 Comparison of images with and without NUC

由图 11 可见,该成像区域地面背景相对复杂,测试时机在春季傍晚时分,该时段目标背景的温度差异较小,对红外系统成像较为不利;但天空背景单一,有利于进行对比测试,因此,选取该时段区域进行校正对比测试。由前后对比可以看出,进行非均匀性校正后,可有效提高红外成像的均匀性,减少图像残余干扰,同时通过校正机构对校正参数进行现场修定,有效地消除了少数灰度偏差较大的亮暗像素点,视频显示效果明显优化。

## 5 结 论

为满足在较经济的情况下对云层进行红外波段观测,本文提出一种采用非致冷红外探测器的红外成像系统的设计方案。该系统光学成像质量较好,机械结构稳定可靠,电路处理单元功能齐备;同时采用主动温度调焦方案和自适应红外校正方案,确保系统效果;具有较强的实际使用价值。

### 参考文献:

- [1] SEOK M H, HYUN S K, WEE K Y, *et al.*. High performance long-wave infrared sensor with large zoom optics and high-definition television format[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(12):123201.
- [2] 邢素霞. 非制冷红外热成像系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.  
XING S X. *Study of uncooled infrared thermal imaging system*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [3] 张军. 军事气象学[M]. 北京:气象出版社,2005.  
ZHANG J. *Military Meteorology*[M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese)
- [4] 宣益民,韩玉阁. 地面目标与背景地红外特征[M]. 北京:国防工业出版社,2004.  
XUAN Y M, HAN Y G. *Infrared Characterizations of Ground Targets and Backgrounds*[M]. Beijing: National Defence Industry Press,2004. (in Chinese)
- [5] 代少升,袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正的新技术[J]. 光学 精密工程,2004,12(2):201-204.  
DAI SH SH, YUAN X H. Real-time correction of infrared image nonuniformity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2):201-204. (in Chinese)

作者简介:丁金伟(1976—),男,吉林人,主要研究方向为光电仪器的光机总体设计。E-mail:jinweid@yeah.net