

应用于森林火灾监测的中波红外相机设计

陈凯^{1,2}, 孙德新¹, 刘银年¹

(1.中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对森林火灾监测的迫切性及现实意义, 对火焰红外辐射特性进行分析, 根据火焰的光谱曲线, 得出观测火焰的适宜波段。基于以上分析结果, 设计了一套应用于森林火灾监测的中波红外相机, 并在外场模拟森林火灾现场, 进行成像实验, 得到了红外图像数据, 实验结果表明监测效果良好。

关键词: 红外辐射; 火焰光谱; 中波红外; 森林火灾

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)06-0514-05

Design of MWIR Camera Applied to Forest Fire Monitoring

CHEN Kai^{1,2}, SUN Dexin¹, LIU Yinnian¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For urgency and significance of forest fire monitoring, infrared radiation characteristics of flame was theoretically analyzed and appropriate observation wave band was found based on the spectral curve of the flame. According to the above results, a set of MWIR camera used in forest fire monitoring was designed. Infrared image data was obtained by experiments under the condition of simulating forest fire spot in the outfield. The experimental results demonstrated the camera's excellent performance.

Key words: infrared radiation, flame spectrum, MWIR, forest fire

0 引言

森林火灾是林业主要灾害之一, 会造成严重的森林资源损失, 甚至威胁到人类的生命安全, 森林火灾监测意义重大。当前国内主要的森林火灾监测方式包括地面巡护、航空巡护、瞭望台监测和卫星遥感监测^[1], 可以看出国内的监测技术一般需要大量的人力和物力, 观测范围小、效率低且受天气状况和地理环境的影响较大, 先进的方法比如卫星遥感的经济投入又过于巨大。

红外热成像技术是一种被动式的非接触检测与识别, 不受电磁干扰, 能全天候工作, 而且探测能力强作用距离远^[2]。近年来探测器领域的前沿技术已经有了长足的进步, 基于机载平台的红外相机是一种极为重要的探测器手段^[3], 应用于森林火灾监测可以实现昼夜工作、扩大观测范围和及时有效地探测到森林火灾或火灾隐患。

1 火焰红外辐射特性

不同材料燃烧的火焰辐射光谱各不相同, 火焰光谱是火焰在整个波段范围内的辐射强度的分布, 它是波长的函数, 其分布如图 1^[4]所示, 火焰辐射光谱包括紫外、可见光和红外等波段, 这些电磁辐射主要是

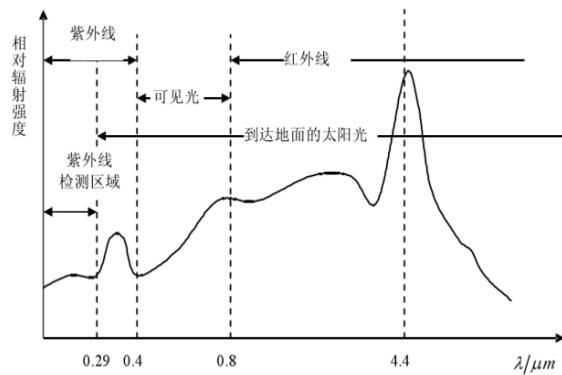


图 1 火焰辐射光谱图

Fig.1 Flame radiation spectrum

收稿日期: 2015-12-17; 修订日期: 2016-01-05。

作者简介: 陈凯 (1989-), 男, 江苏句容人, 博士研究生, 研究方向为高光谱成像信息获取与处理技术。E-mail: chenkai891219@sina.com。

通讯作者: 刘银年 (1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为高光谱成像技术。E-mail: ynliu@mail.sitp.ac.cn。

基金项目: 国家 863 计划 (2014AA123202)。

由燃烧产物的分子在高温受激状态下释放出来的。在波长 $4.4\text{ }\mu\text{m}$ 附近能够清楚的观察到火焰光谱的峰值，这是 CO_2 原子团的发光光谱，是火焰所特有的性质，且该波长的辐射强度很大，因此可以将火焰从太阳光的辐射光谱中分离。

根据普朗克辐射定律：

$$W_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} (\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}) \quad (1)$$

式中： c_1 为第一辐射常数， $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^4$ ； c_2 为第二辐射常数， $c_2 = ch/k = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ 。

图 2 给出 500~900 K 几个特定温度下黑体辐射的光谱通量密度曲线^[5]，可以看出随着黑体温度增加，光谱辐射通量密度迅速增加，峰值波长向短波方向移动，即高温物体辐射的峰值波长较短。

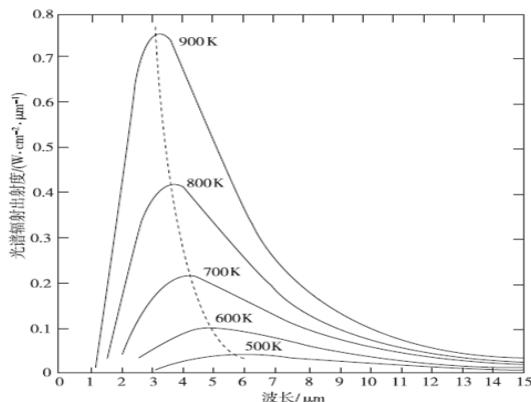


图 2 不同温度下黑体光谱辐射通量密度

Fig.2 Spectral radiant flux density of black body under different temperature

木材燃烧时火焰温度一般为 600~800°C，根据维恩位移定律：

$$\lambda_m T = 2897.8 \text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K} \quad (2)$$

式中： λ_m 为黑体光谱辐射通量密度最大的峰值波长； T 为黑体的绝对温度。

可以得出木材燃烧火焰的辐射峰值波长在 $3.62\sim 4.83\text{ }\mu\text{m}$ 。根据以上分析可知，以 $4.4\text{ }\mu\text{m}$ 为中心的中波红外波段是探测森林火灾的重要波段。目前用于森林火灾监测的主要还是长波红外，其实中波红外和长波红外谱段成像各有特点^[6]，本文将在森林火灾监测方面进行两者成像效果对比。

2 中波红外相机设计

2.1 组成部分

中波红外相机由光学镜头、探测器及其驱动模块、信号调理及滤波模块、数模转换模块、逻辑时序控制模块和数据传输及通信模块组成，图 3 为相机组

成框图。

光学镜头将目标红外辐射聚焦到探测器的焦平面阵列上实现光电转换；探测器及其驱动模块为探测器正常工作提供必要的偏置电压与时序脉冲；信号调理及滤波模块

对探测器输出信号进行幅度调整和低通滤波；数模转换模块对调理后的模拟信号进行采样和量化，将其转换成数字信号；逻辑时序控制模块是系统的核心部分，完成所有的时序控制，包括探测器驱动、模数转换采样、RS422 通信以及图像数据接收与格式编排；数据传输及通信模块对格式编排后的图像数据进行传输以及完成与 FPGA 的通信。

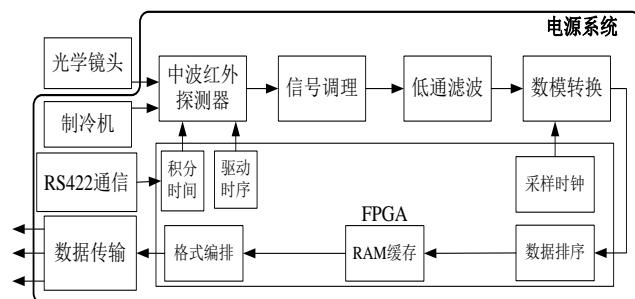


图 3 中波红外相机原理框图

Fig.3 Functional block diagram of MWIR camera

2.2 光学镜头

光学系统指标如表 1 所示。

表 1 光学系统指标

Table 1 Optical system indicators

视场	$5^\circ \times 6.25^\circ$
响应波段	$3.5\sim 5.0\text{ }\mu\text{m}$
镜头焦距	88 mm
口径	44 mm
F 数	2.0

光学系统采用三分离式结构，由于 Si 和 Ge 是中波红外波段消色差效果最好的材料组合，为追求优良的像质效果，透镜材料选用 Si-Ge-Si 搭配，镜筒材料选用膨胀系数较小的铟钢，通过透镜材料与镜筒材料的搭配实现消热差和消色差。

同时，针对制冷型探测器的中波红外成像系统及三分离式物镜结构，本设计采用直接将孔径光阑设计在冷屏位置的方法，以实现 100% 冷光阑效率，达到抑制背景辐射杂光的要求，物镜光路设计如图 4 所示。

最后，为进一步消除红外相机杂散光，镜头增加遮光罩，同时机械结构内壁涂有低发射高吸收涂层进行杂光抑制。该光学系统具有 100% 冷光栏效率和消色差消热差的优点，成像质量很高。

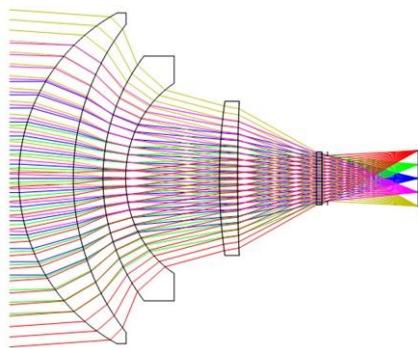


图4 中红外物镜光路图

Fig.4 The light path of infrared objective

2.3 探测器及其驱动模块

采用法国 Sofradir 公司 320×256 制冷型中波红外焦平面探测器，响应波段 $3.5\sim5.0\text{ }\mu\text{m}$ ，像元大小 $30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$ 。

探测器驱动包括 2 个部分：偏置电压和时序脉冲，根据 Sofradir 公司数据手册给出的参数^[7]，探测器正常工作需要 3 种电压，如表 2 所示。

表2 探测器偏压

Table 2 Detector bias voltages

Electrical function name	Bias type	Range value	Typical value
Gpol	tunable	$0\sim2\text{ V}$	$0.8\text{ V}\pm0.2\text{ V}$
VDDA	fixed	5 V	5 V
VDDL	fixed	5 V	5 V

为满足探测器偏压需求，设计中采用高精度、低压差、 5 V 输出的线性稳压芯片 LP2953 提供，并进行滤波，其中 Gpol 经电阻分压后通过运放的电压跟随获得。

探测器工作需要 2 个脉冲信号，主时钟 MC 和积分信号 INT，MC 范围为 $1\sim6.6\text{ MHz}$ ，可以控制像元读出速率，积分信号 INT 控制探测器积分时间的长短，这 2 种脉冲信号均通过逻辑时序控制模块提供。

2.4 信号调理及滤波模块

探测器有四路输出 OUT1/2/3/4，每路输出的模拟电压范围为 $1.9\sim4.35\text{ V}$ ，在模数转换前需要对信号进行幅度调整和滤波降噪，图 5 为信号调理及滤波模块。

先采用减法电路减去背景参考电压 1.87 V ，再经过滤波电路进行滤波，本设计中滤波电路采用二阶低通滤波，Sallen-Key 拓扑结构，通带增益为 2，调理及滤波后信号范围为 $60\text{ mV}\sim4.96\text{ V}$ ，模数转换芯片的输入电压为 $0\sim5\text{ V}$ ，这样充分利用了模数转换器的最大动态范围，同时基于小型化设计思想，该模块中的运放均采用单电源供电、轨对轨、四通道的高速运放 AD8044，有效地减小硬件电路尺寸。

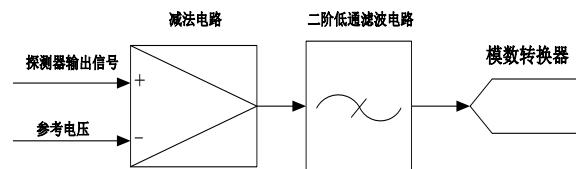


图5 信号调理及滤波模块

Fig.5 Signal conditioning and filtering module

通常，低通滤波电路带宽为信号带宽 $3\sim5$ 倍，对于 4 MHz 信号，一般采用 20 MHz 的带宽，为进一步降低电路系统噪声，本设计的低通滤波带宽仅为 6 MHz ，将模数转换器的采样位置选在信号下降沿前，这样既能获取信号幅值，又能大幅降低噪声。原理仿真见图 6，输入信号范围 $3\sim4\text{ V}$ ，减去背景信号 1.9 V ，滤波电路放大倍数为 2，即输出幅值为 $2.2\sim4.2\text{ V}$ 。

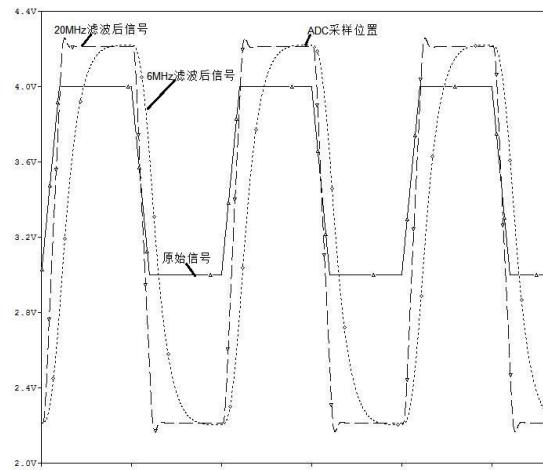


图6 信号滤波仿真

Fig.6 Simulation of signal filtering

图 7 为噪声功率谱密度曲线，可以看出进一步降低通带带宽可以减小系统噪声。对于 12 bit 量化系统，系统噪声低于 5 个 DN 值 (digit number)。

2.5 数模转换模块

为适应探测器读出速率范围 $1\sim6.6\text{ MHz}$ ，本设计采用 12 bit 量化位数、 10 MSPS 采样率的流水线型模数转换器 AD9220，输入电压范围为 $0\sim5\text{ V}$ ，并行数据输出。

采样时钟的上升沿对模拟信号进行采样，为保证最佳的采样位置，通过示波器观察模拟信号与采样时钟的相位关系，利用逻辑时序控制模块对模数转换器的采样时钟进行相位调整。

2.6 逻辑时序控制模块

逻辑时序控制模块是系统核心部分，采用 FPGA 完成探测器驱动时序产生、模数转换器采样时钟设置、图像数据接收、图像格式编排、图像数据发送以

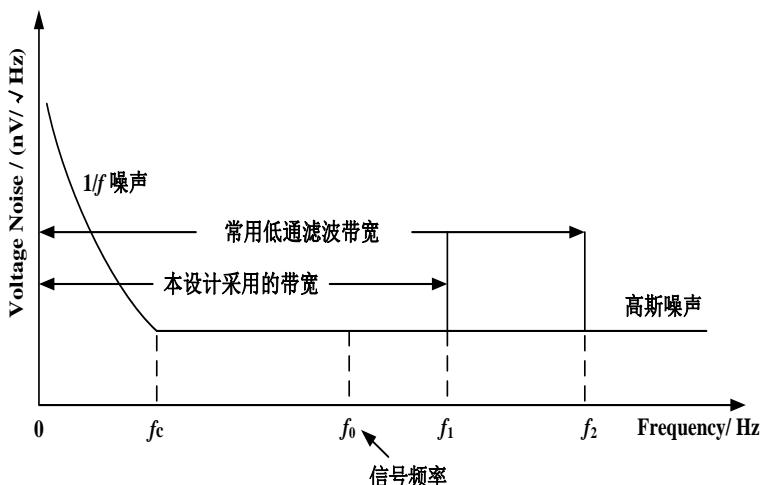


图7 噪声功率谱

及RS422通信指令接收，图8为逻辑时序控制模块。

使用硬件描述语言Verilog完成程序编写及相关时序仿真与验证工作。

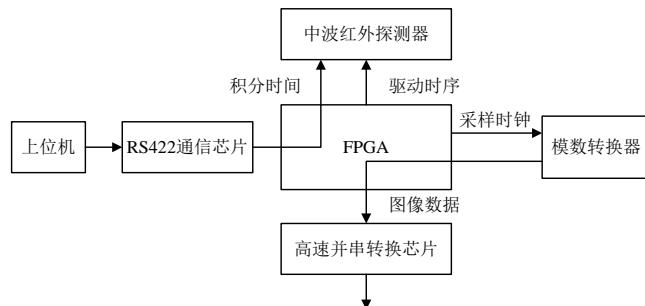


图8 逻辑时序控制模块

Fig.8 Logic sequence control module

2.7 数据传输及通信模块

红外图像数据采用数据速率2.7Gpbs的并串转换芯片TLK2711及同轴电缆完成高速、大数据量的串行传输。在PCB布局布线时，数传芯片的并行高速数据总线需要进行等长处理，同时串行输入输出端保证 50Ω 电阻端接匹配。

通信模块采用RS-422标准，实现上位机与FPGA之间的通信，主要功能是发送8bit的积分时间调整指令，即0X00-0XFF，共256档，实时选择探测器的积分时间。积分时间范围：0.05~5.44 ms。

图9为探测器读出时序，根据时序图可以得出相机帧频计算公式：

$$\text{Frame_time} = \frac{1}{[256 \times (320 \div 4) + 66.5] \times \text{MC} + \text{INT}}$$

式中：MC为系统主时钟；INT为积分时间。

在MC为6.6MHz时，帧频与积分时间关系见表3。由表3可见该中波相机帧频可达300Hz以上，能满足绝大多数应用场合的需求。

Fig.7 Noise power spectrum

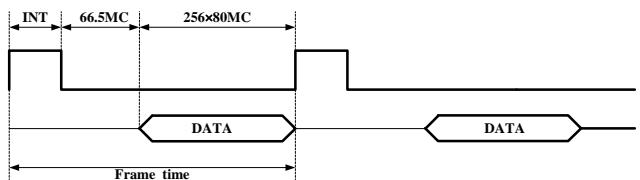


图9 中波红外探测器读出时序

Fig.9 Readout sequence of MWIR detector

表3 不同积分时间下的相机帧频

Table 3 Frame rate of the MWIR camera under different integration times

INT/ms	0.1	2	4
Frame rate/Hz	311.9	195.8	140.7

由于制冷型探测器相对于非制冷型体积较大，设计中通过优化布局减小电路板与机械结构尺寸，使得相机整体紧凑且小型化。图10为所设计的中波红外相机实物图，表4为相机的主要性能指标，含体积重量。

3 实验结果及分析

为验证相机的火灾监测效果，在内蒙古根河地区农田点燃收割后的麦秆来模拟森林火灾现场，并在直升机上同时使用可见光、中波红外和长波红外相机对地成像。



图10 中波红外相机实物图 Fig.10 MWIR camera

表4 相机主要性能指标

Table 4 Main performances of the MWIR camera

分辨率	320×256
响应波段	3.5~5.0 μm
像元大小	30 μm×30 μm
镜头焦距	88 mm
相机尺寸	350 mm×220 mm×180 mm
量化位数	12 bit
NETD	32 mK@300 K (积分时间 2 ms)
重量	1 kg
功耗	<12 W

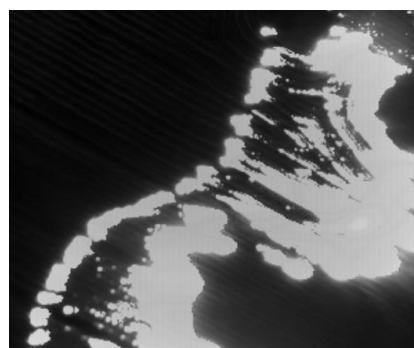
图 11(a)~(c) 分别为可见光、中波红外和长波红外相机获取的图像。

通过对比分析 3 幅图像，可以发现：

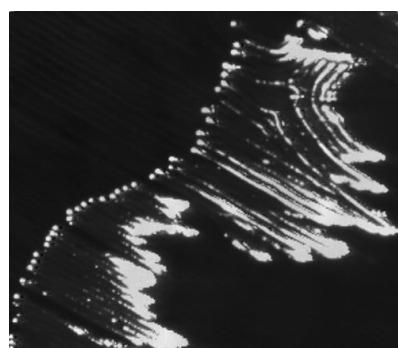
- 1) 在没有明火时，中波和长波红外相机均能发现正在发生的火灾，可见光相机不能。
- 2) 与长波红外相比，中波红外对森林火灾木制材料燃烧的热辐射更为敏感且响应强烈。长波红外能探测到的火焰，在中波红外上更为明显；长波红外探



(a) 可见光



(b) 中波红外



(c) 长波红外

图 11 火焰图像 Fig.11 Flame image

参考文献：

- [1] 黄玉章. 红外热成像技术及其在火灾监控中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 11-12.
Huang Yuzhang. Infrared thermal imaging technology and its application in fire monitoring[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 11-12.
- [2] 蔡鑫, 赵敏, 李然, 等. 基于热释电红外传感器的火灾探测系统设计[J]. 红外技术, 2007, 29(12): 697-700.
CAI Xin, ZHAO Min, LI Ran, et al. Design of a fire detection system based on pyroelectric infrared sensor[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(12): 697-700.
- [3] 徐新行, 陈宁, 王兵, 等. 机载紧凑型中波红外相机的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0816002.
Xu Xinheng, Chen Ning, Wang Bing, et al. Design of compact middle-wave infrared camera used on airborne platform[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0816002.

测不到的火焰，在中波红外上能够发现。

这与前文光谱特征分析得出的探测中心波长结果相吻合，并在此得到验证。

4 结论

通过对木制材料燃烧的光谱特征进行理论分析得出最佳探测中心波长为 3.62~4.83 μm，并依此选择中波红外波段，设计一套中波红外相机用于森林火灾监测。为验证设计，进行了外场火灾模拟实验，实验结果显示，中波红外图像上火焰清晰可辨，达到预期的森林火灾监测目的。

更为重要的是，与森林火灾探测通常采用的长波红外相比，中波红外对木制材料燃烧热辐射的探测能力更为突出、响应更为强烈，能发现长波红外探测不到的火灾或高温隐患，实际效果优于长波红外，这对森林火灾的监测或预防意义重大。同时，相机设计具备体积小、重量轻、高帧频等特点。所以，今后基于无人机平台的中波红外相机将成为森林巡护、火灾监测的重要发展方向。

- [4] 廖晓思. 火焰光谱分析系统[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009: 11-12.
Liao Xiaosi. Analysis system of flame spectrum [D]. Xi'an: Xidian University, 2009: 11-12.
- [5] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 22-24.
Zhou Shichun. *Introduction to Advanced Infrared Optoelectronic Engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 22-24.
- [6] 马文坡. 中波红外与长波红外推扫成像性能分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3861-3865.
Ma Wenpo. Performance analysis on MWIR and LWIR pushbroom imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3861-3865.
- [7] Sofradir Corporation. MARS MW K508 320×256/256×256 MW IRCCMOS Multimode integrated detector dewar cooler assembly (IDCDA) with microcooler type K508 technical specification[Z]. France Sofradir Corp., 2004.