

文章编号:1001-5078(2024)03-0440-08

· 光学技术 ·

# 用于远距离高温目标辐射探测的光谱系统设计

尹亮<sup>1</sup>, 王加朋<sup>2</sup>, 杜继东<sup>2</sup>, 邱超<sup>2</sup>, 郭靖<sup>2</sup>, 于昌本<sup>2</sup>, 周志强<sup>1</sup>, 丛嘉伟<sup>1</sup>

(1. 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074)

**摘要:** 针对远距离高温目标多光谱辐射测温的需求, 设计了一款多通道光谱探测系统。系统前端采用同轴两反卡塞格林式结构收集目标光谱辐射, 后端包括用于目标定位的长波红外成像瞄准系统和分别工作在 380~1050 nm、980~2550 nm 双波段光谱系统。光谱系统采用 Czerny-Turner 结构, 在 380~1050 nm 波段分辨率优于 5 nm, 980~2550 nm 波段分辨率优于 15 nm, 光谱通道数量大于 220 个。400 m 目标外场实验和 700~2300 °C 高温黑体温度实验表明, 多通道光谱探测系统能够进行远距离目标的瞄准和光谱探测。本文设计的多通道光谱探测系统有望用于地面、航空及航天等远距离的温度探测。

**关键词:** 光学系统设计; 多光谱辐射测温; 卡塞格林; Czerny-Turner 结构

中图分类号: TN216; TP73 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.03.016

## Design of a spectroscopic system for radiation detection of high-temperature targets over long distances

YIN Liang<sup>1</sup>, WANG Jia-peng<sup>2</sup>, DU Ji-dong<sup>2</sup>, QIU Chao<sup>2</sup>, GUO Jing<sup>2</sup>, YU Chang-ben<sup>2</sup>,  
ZHOU Zhi-qiang<sup>1</sup>, CONG Jia-wei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Testing, Beijing 100074, China)

**Abstract:** In this paper, a multi-channel spectral detection system is designed to address the need for multi-spectral radiometric temperature measurement of high temperature targets over long distances. The front end of the system uses a bi-reflective Cassegrain structure to collect the spectral radiation of the target, while the back end includes a long-wave infrared imaging targeting system for target location and a dual-band spectral system operating at 380~1050 nm and 980~2550 nm respectively. The spectral system adopts Czerny-Turner structure, with a resolution better than 5 nm in the 380~1050 nm band and 15 nm in the 980~2550 nm band, and the number of spectral channels is greater than 220. The 400 m target outfield experiments and the 700~2300 °C high temperature blackbody temperature experiments show that the multi-channel spectral detection system is capable of targeting and spectral detection of long-range targets. The multi-channel spectral detection system designed in this paper is expected to be used for long-range temperature detection on the ground, in aviation and in space.

**Keywords:** optical system design; multispectral radiation thermometry; Cassegrain; Czerny-Turner structure

### 1 引言

多光谱辐射测温是非接触测温方式的一种, 通

过探测器采集目标多个光谱通道的辐射信息, 经过算法处理得到物体的真实温度及光谱发射率, 具有

作者简介: 尹亮(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为光学系统设计。E-mail: yinliang\_0907@163.com

通讯作者: 丛嘉伟(1983-), 男, 博士, 副教授, 研究方向包括等离子激元在纳米光学中的研究与应用, 人工电磁特异材料, 激光与物质的相互作用过程等。E-mail: jw.cong11@gmail.com

收稿日期: 2023-07-13; 修订日期: 2023-08-13

适用材料多样、受环境影响小、测温更准确和测温上限更高的优点<sup>[1-2]</sup>。在远距离测温过程中,被测物和光学系统之间会存在水汽、二氧化碳和颗粒物等杂质,宽波段范围和多波长通道的辐射测温能够选用合适的波段避开杂质的吸收峰来获取待测物体的光谱信号,全面反应出目标的辐射信息<sup>[3]</sup>。在火箭羽流、高温爆炸和移动飞行器等特殊场景的测温过程中设备需要远离待测目标,否则测温设备会受到场地中强破坏、强震动和强电磁干扰的影响,导致测试结果不精确,严重的话甚至会损坏设备<sup>[4-7]</sup>。

传统的多光谱测温仪探测系统光谱通道数量少,不能较为全面的测量目标的光谱辐射特性,探测距离短,不能满足如今的远距离高温复杂目标的探测需求<sup>[8-11]</sup>。为了达到更远的探测距离和获取更多的光谱通道,国内外纷纷展开了远距离多光谱辐射测温光学系统的研究工作。王振涛等人为测量激光诱导的辐射温度场研制的一款五通道四波长的多光谱测温光学系统,波长通道数量较少<sup>[12]</sup>。孙琨等人研制多光谱测温光学系统分为瞄准系统、光纤传输系统和分光系统三部分,可实现对爆炸火焰温度的远距离测量,但光学瞄准系统安置在爆炸的现场,容易损坏,光学系统的波长通道数量仅为6个<sup>[13]</sup>。符泰然等人设计的能够实现远距离高温目标测量的多光谱高温计,该高温计的光学系统使用光纤+光谱系统的方式实现远距离高温目标的辐射探测,波段范围在200~1700 nm之间,测温距离会受到光纤长度的限制<sup>[14]</sup>。梁美等人研制的用于火箭发动机的多光谱测温光学系统在普通模式下工作距离为3~20 m,通过光纤传输可延长至100 m,波长通道仅为六个<sup>[15]</sup>。占春连等人研制的测量火焰爆炸温度的多光谱辐射测温设备,光学系统采用卡式镜头收集远距离爆炸目标的辐射信息,后续分光模块采用滤光片的形式,波长通道数量较少<sup>[16]</sup>。

针对现有远距离辐射测温系统探测距离短和光谱通道数量少的问题,本文设计了一款用于远距离高温目标辐射测温的双波段多通道探测系统。系统集成380~1050 nm(VNIR)、980~2550 nm(SWIR)双波段光谱系统,可实现两个波段同时探测目标辐射信息,双波段光谱系统通道数量大于220个,可以全面反映目标的光谱辐射特性,并采用长波红外成像系统作为瞄准定位系统。设计的多通道探测系统可实现

远距离、宽光谱和多通道对目标进行探测,对民用及军事领域的辐射测温技术发展有着重要意义。

## 2 光学系统组成及设计指标

### 2.1 光学系统结构

为了实现对400 m处大小为0.8 m×0.8 m目标的瞄准和不同温度下的光谱信号探测,380~1050 nm波段的光谱通道数量大于120个,980~2550 nm波段的光谱通道数量大于100个,设计了多通道光谱探测系统。多通道光谱探测系统的整体结构如图1所示,光学系统的主要组成部分有前置光学系统、VNIR、SWIR光谱系统和长波红外成像光学系统,VNIR、SWIR光谱系统对称分布在主镜出光孔两侧,长波红外成像系统与前置光学系统主光轴保持一致。

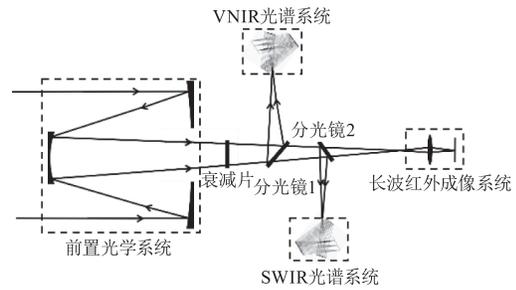


图1 多通道光谱探测系统结构图

Fig. 1 Multi-channel spectral detection system architecture diagram

### 2.2 前置光学系统

前置光学系统收集远距离待测目标的全部辐射信息进入后续光学系统中,系统的波段范围宽,通光口径大,透射式系统无法满足要求,选择同轴两反卡塞格林式结构作为前置光学系统<sup>[17]</sup>。综合考虑系统结构长度限制和后续分光光学系统的分辨率要求,将前置光学系统的口径设置为320 mm,焦距为1000 mm。

$$\omega = \arctan\left(\frac{\sqrt{a^2 + a^2}}{L}\right) \quad (1)$$

式中,其中 $\omega$ 为视场大小; $a$ 为待测目标的边长; $L$ 待测目标距离系统的距离。计算可得0.8×0.8 m待测目标在400 m处视场大小约为0.16°,为了便于后续光谱系统信号探测和长波红外成像设计,在设计时留出余量,将前置光学系统的半视场大小设计为0.2°。

前置光学系统的一次像面位于主镜的右侧,利用两片分光镜将光路分为380~1050 nm光谱系统、980~2550 nm光谱系统和长波红外成像瞄准系统三部分,各分系统对前置光学系统的一次像面进行二次成像。由普朗克定律可知,目标的辐亮度会随温度的升高而升高,因此在前置光学系统后通过加入不同衰减

倍率的衰减片防止探测器饱和,影响测试结果。

### 2.3 光谱系统

光谱系统是多通道光谱探测系统的核心部分,设计指标要求光谱系统实现 380 ~ 1050 nm、9800 ~ 2550 nm 的宽光谱,220 个波长通道对目标进行探测,可获得目标在不同波长下的辐射信息,全面反应目标辐射特性。按照分光原理的不同,常用的分光元件可以分为棱镜,滤光片和光栅三种。棱镜是利用色散将光分成不同波长的单色光,光能量损失小,缺点是分光波长的数量和棱镜的数量成正比。滤光片是对所需波段的光进行选择吸收,设计简单,通光量大,缺点是波长增多时,滤光片数量也会随之增加。光栅利用光的干涉和衍射原理,使不同波长的混合光经过光栅后按不同的角度出射,形成不同波长的光谱谱线。本次设计光谱范围宽,所需波长数量多,使用具有分辨率高、光谱排列均匀和光谱范围宽的光栅为分光元件<sup>[18]</sup>。

VNIR 光谱系统的通道数量大于 120 个,分辨率约为 5 nm,设计时选择线对数为 300 lines/mm 的光栅,像元大小 24  $\mu\text{m}$ ,像素数为 1044  $\times$  64 的 CCD 探测器。SWIR 光谱系统的通道数量大于 100 个,分辨率约为 15 nm,设计时选择线对数为 200 lines/mm 的光栅,像元大小 25  $\mu\text{m}$   $\times$  250  $\mu\text{m}$ ,像素数 512 个的 In-GaAs 线阵探测器。

### 2.4 长波红外成像光学系统

设计时需要探测的目标较远,长波红外光谱区域是大气窗口,在此波长区域工作的光学系统主要探测的是源自目标本身的热辐射,考虑到实际应用场景和远距离探测时大气透过率的影响,采用长波红外成像系统作为瞄准探测系统<sup>[19]</sup>。为充分利用探测器靶面和消除残余像差,在前置光学系统后端设计了二次成像镜组,长波红外系统的焦距为 2000 mm,选用像元大小 17  $\mu\text{m}$ ,像素数 640  $\times$  512 的非制冷型氧化钒红外焦平面作为探测器。

## 3 系统仿真

### 3.1 整体光路仿真结果

利用 ZEMAX 软件将设计完成的各分系统进行多重组态整合光路,多通道光谱探测光学系统三维结构图如图 2(a) 所示,图 2(b) 为 VNIR 光谱系统三维结构图,图 2(c) 为 SWIR 光谱系统三维结构图,图 2(d) 为长波红外成像光学系统三维结构图。

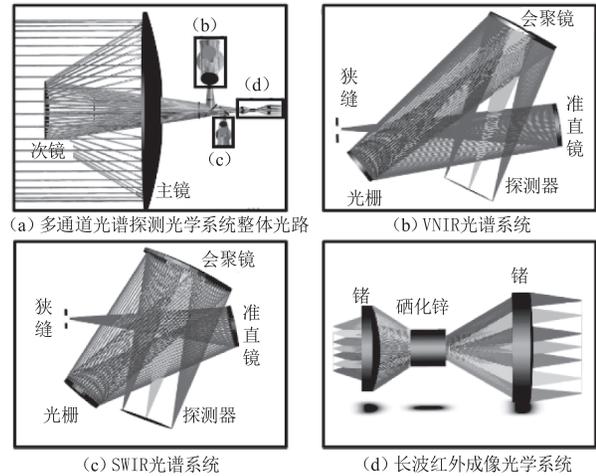


图 2 多通道光谱探测光学系统三维结构图

Fig. 2 Three-dimensional structure of the multi-channel spectral detection optical system

### 3.2 前置光学系统仿真分析

前置光学系统的结构为图 2(a) 中主镜和次镜。图 3 是前置光学系统物距在 400 m 时不同视场和波长下的点列图,图 4 是前置光学系统物距在 400 m 的 MTF 图。前置光学系统主镜和次镜为偶次非球面,主镜为孔径光阑,为多通道光谱探测光学系统提供一次成像,成像质量越高越好。前置光学系统像面在各个中心波长处各视场的点斑均方根半径最大值为 5.326  $\mu\text{m}$ ,小于艾里斑,MTF 在 30 lp/mm 时均高于 0.4,满足成像光学系统设计的要求。

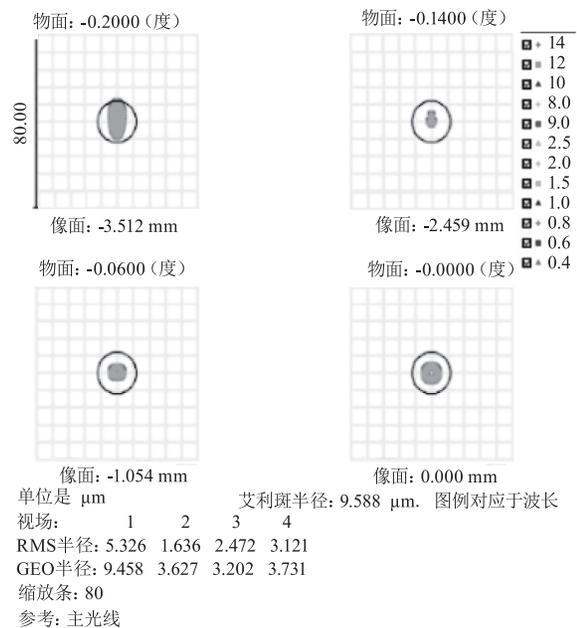


图 3 前置光学系统物距在 400 m 处的点列图

Fig. 3 Point column diagram of the front optical system object distance at 400 m

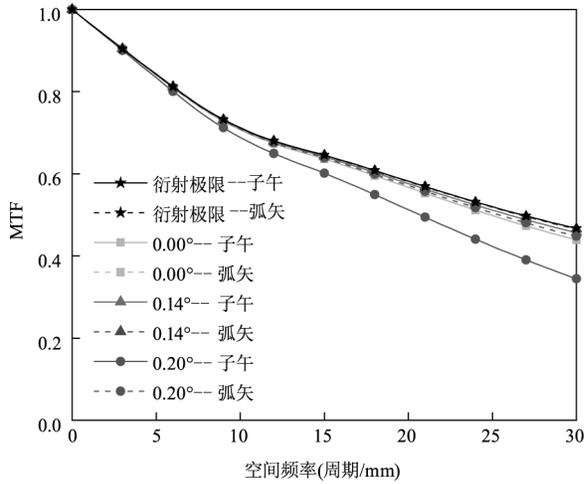


图4 前置光学系统物距在 400 m 处的 MTF 图  
Fig. 4 MTF diagram of the front optical system  
object distance at 400 m

### 3.3 光谱系统仿真分析

光谱系统采用 Czerny-Turner 交叉非对称型结构为初始结构,经分光镜分光后 VNIR 光谱系统、SWIR 光谱系统对称分布在主镜出光孔处,结构简单,便于装调。图 5 为 VNIR、SWIR 光谱系统仿真后的 Y 方向均方根半径图, VNIR 波段范围内的 Y 方向光斑均方根半径小于 13  $\mu\text{m}$ , SWIR 波段范围内的 Y 方向光斑均方根半径小于 17  $\mu\text{m}$ , 小于探测器像元尺寸。图 6(a)为 VNIR 光谱系统在 380 nm、715 nm 和 1050 nm 处间隔 5 nm 的点列图,从图中可以看出,任意一组中的两个光斑均可以清晰分开,表明 VNIR 光谱系统的光谱分辨率达到 5 nm 设计要求。图 6(b)为 SWIR 光谱系统 980 nm、1715 nm 和 2550 nm 处间隔 15 nm 的点列图,任意一组中的两个光斑均可以清晰分开,表明 SWIR 光谱系统的光谱分辨率达到 15 nm 设计要求。

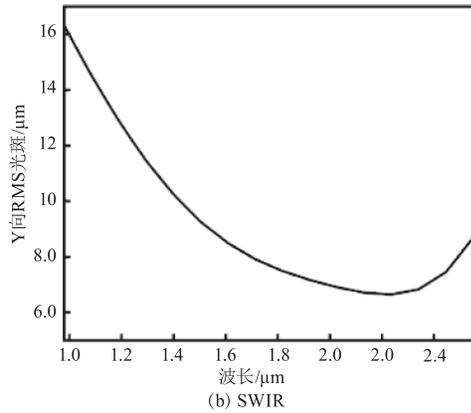
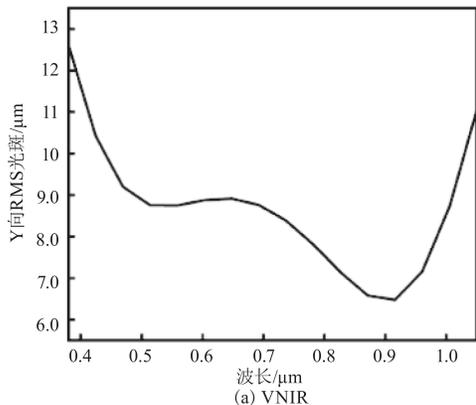


图5 光谱系统 Y 方向点斑均方根半径  
Fig. 5 Spectral system root mean square radius  
of spot in Y direction

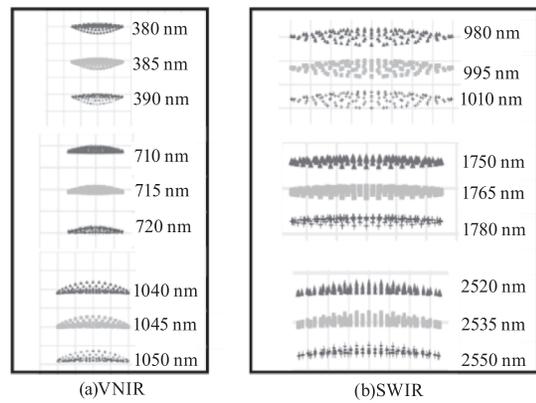


图6 光谱系统不同波长处点列图  
Fig. 6 Spectroscopic system with dot plots at  
different wavelengths

### 3.4 长波红外光学系统仿真结果

长波红外成像系统是对远距离目标进行成像瞄准,设计时将长波红外成像系统与前置光学系统主光轴保持一致,采用三片红外校正镜进行像差校正,优化完成后的长波红外成像系统如图 2 (d)所示所示,长波红外成像系统的前两片透镜为非球面透镜,使用的材料分别是在长波红外波段具有高透光率的锗和 ZnSe,第三片透镜为球面透镜,所用材料锗。

图 7,图 8 分别是长波红外成像系统的点列图和 MTF 图,长波红外成像系统在各个中心波长处各视场的点斑均方根半径小于 7  $\mu\text{m}$ ,长波红外成像系统的 F 数较大,受衍射极限的限制,MTF 图下降较快,系统的 MTF 均接近衍射极限,成像质量良好。

## 4 实验结果

### 4.1 分辨率实验

采用中心波长处谱线下降到最大值的一半时所

对应的半高宽 (FWHM) 来表征光谱系统在波长处所对应的系统分辨率。VNIR 波段光谱系统使用汞灯作为光源,SWIR 波段光谱系统采用 1064 nm、1310 nm、1490 nm 和 1550 nm 波长的激光器光源对完成波长定标的光谱系统进行分辨率的验证,谱线半高宽如图 9 所示。

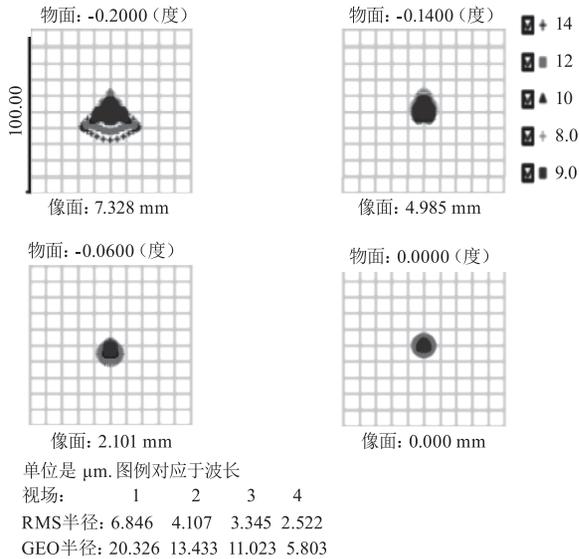


图 7 长波红外成像点列图

Fig. 7 Longwave infrared imaging spot map

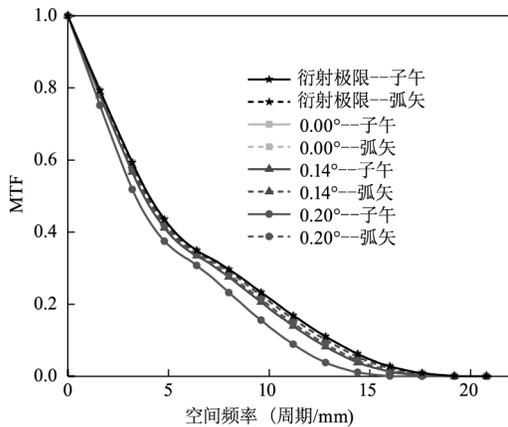
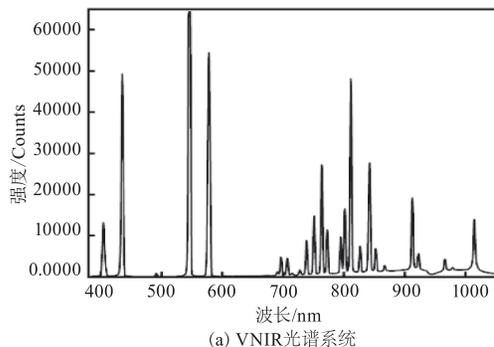
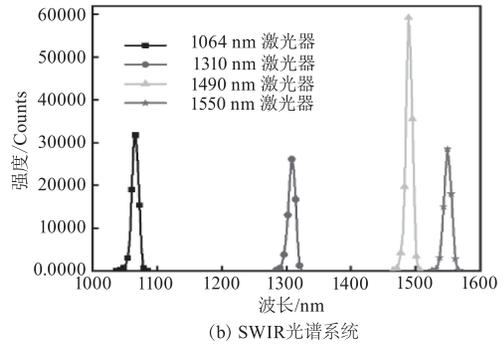


图 8 长波红外成像 MTF 图

Fig. 8 Longwave infrared imaging MTF map



(a) VNIR光谱系统



(b) SWIR光谱系统

图 9 谱线半高宽图

Fig. 9 Half height and width diagram of spectral lines

光谱系统的谱线半高宽测试结果如表 1、2 所示,VNIR 光谱系统选取了信噪比较高的波长记录,测试结果表明,VNIR 光谱系统波段范围内的分辨率小于 5 nm,光谱通道数量大于 120 个,SWIR 光谱系统波段范围内的分辨率小于 15 nm,光谱通道数量大于 100 个,满足设计指标。

表 1 VNIR 光谱系统汞氙灯 FWHM 测试表

Tab. 1 VNIR spectroscopy system mercury-argon

lamp FWHM test table

| WAVE/nm | FWHM/nm |
|---------|---------|
| 404.66  | 4.129   |
| 435.84  | 3.721   |
| 546.08  | 4.518   |
| 576.96  | 4.518   |
| 763.51  | 3.348   |
| 842.46  | 3.737   |
| 912.30  | 3.321   |
| 1014.55 | 4.030   |

表 2 SWIR 光谱系统激光器 FWHM 测试表

Tab. 2 SWIR spectrum systems laser FWHM test table

| WAVE/nm | FWHM/nm |
|---------|---------|
| 1064.00 | 12.743  |
| 1310.00 | 13.163  |
| 1490.00 | 11.768  |
| 1550.00 | 13.800  |

#### 4.2 远距离目标外场实验

为验证多通道光谱探测光学系统的外场环境适应能力,对设计的光学系统开展了 400 m 处外场实验。实验设备如图 10(a)所示,0.8 m × 0.8 m 待测目标放置在距离光学系统 400 m 处位置。

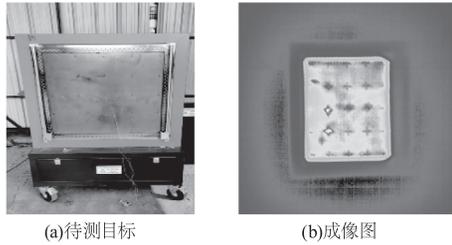


图 10 远距离目标场实验

Fig. 10 Long-range target outfield experiment

外场实验中使用长波红外成像系统瞄准目标, 瞄准后的成像图如 10(b) 所示, 此时待测目标所成的像大小约占  $240 \times 240$  个像素, 与理论计算值  $235 \times 235$  像素相近, 长波红外成像系统能清晰成像, 可满足对远距离目标的瞄准。

图 11 是同一温度的待测目标在不同实验场景下光谱辐射信号曲线, 从图中可以看出, 目标在同一温度下 400m 外场实验辐射信号曲线和实验室内辐射信号曲线整体趋势相近, 但远距离目标的光谱辐射信号传输过程中会受到大气透过率的影响, 整体信号曲线偏弱。

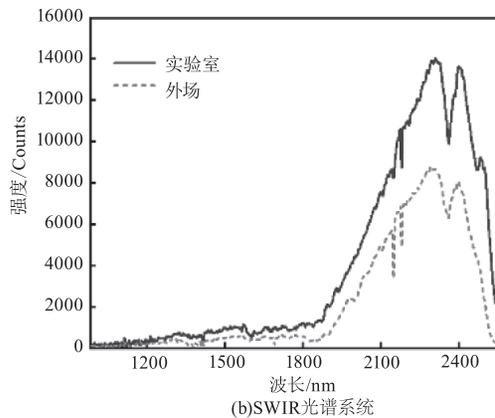
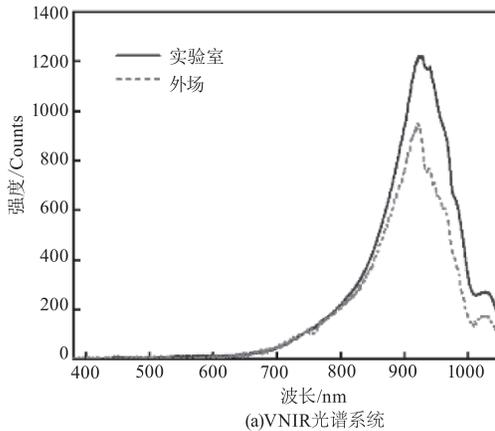


图 11 待测目标光谱辐射信号

Fig. 11 Spectral radiation signal of the target to be measured

### 4.3 温度实验

为验证多通道光谱探测系统的温度探测性能, 通

过在平行光管的焦平面处放置高温黑体, 模拟无穷远处高温目标, 黑体温度可从  $700\text{ }^\circ\text{C}$  提升至  $2300\text{ }^\circ\text{C}$ 。图 12 为 VNIR 光谱系统探测不同温度的光谱辐射信号曲线图, 图 13 为 SWIR 光谱系统探测不同温度的光谱辐射信号曲线图。由普朗克定律可知, 目标的辐亮度会随温度的升高而升高, 实验中切换 1% 和 0.01% 衰减率的衰减片防止探测器饱和, 影响测试结果。温度实验验证了本次设计的探测系统能够进行高温目标的光谱信号探测, 也为多光谱辐射测温的温度反演提供有效的标定数据。

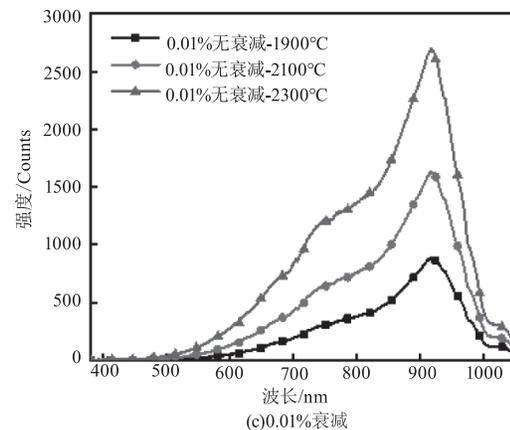
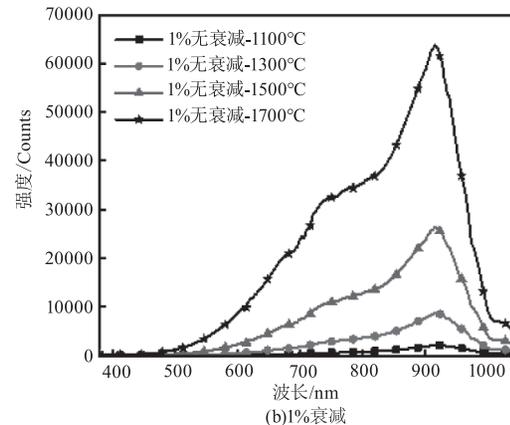
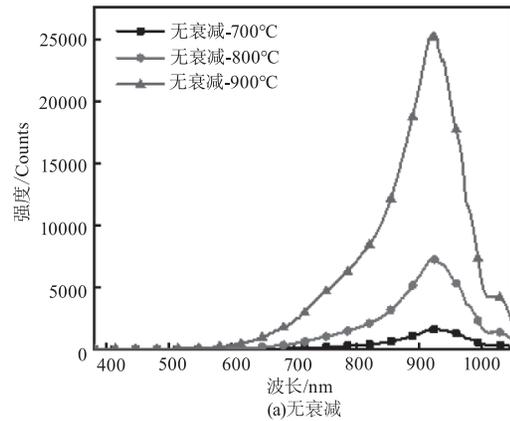


图 12 不同温度 VNIR 光谱系统探测信号

Fig. 12 VNIR spectroscopy system detects signals at different temperatures

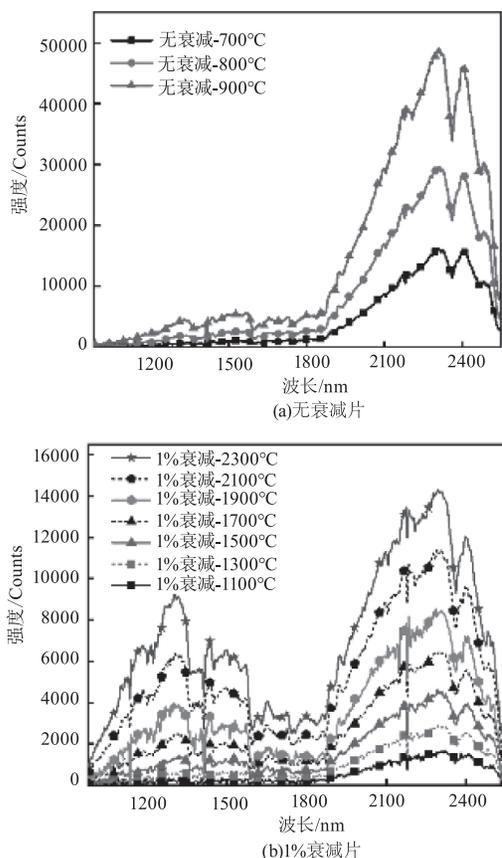


图13 不同温度 SWIR 光谱系统探测信号

Fig. 13 Detection signals of SWIR spectroscopy systems at different temperatures

## 5 结论

本文设计了一款面向远距离高温目标的多通道光谱探测系统,系统由大口径卡塞格林结构收集目标辐射信息,380 ~ 1050 nm、980 ~ 2550 nm 双波段光谱系统对目标的光谱信号处理,使用长波红外成像系统对远距离目标进行瞄准定位。双波段光谱系统在 380 ~ 1050 nm 波段分辨率优于 5 nm,980 ~ 2550 nm 波段分辨率优于 15 nm,光谱通道数量大于 220 个,可实现两个波段同时探测目标辐射信息,全面反应目标的光谱辐射特性。在 400 m 远距离目标外场实验和高温黑体温度实验中,探测系统光谱信息丰富,成像质量良好。设计的多通道光谱探测系统为远距离多光谱辐射测温探测技术的发展提供了一种可实现的技术手段,并且也为其他远距离辐射探测领域中探测系统的研制提供一定的参考。

## 参考文献:

[1] Sun Hongsheng, Liang Xingang, Ma Weigang, et al. Radiation thermometry method under diffuse medium condi-

tions (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 27-36. (in Chinese)

孙红胜,梁新刚,马维刚,等. 弥散介质条件下辐射测温方法(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 27-36.

[2] António Araújo. Multi-spectral pyrometry-a review [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(8).

[3] Zhang Ziwen. Research on multi-spectral radiometric temperature measurement technology based on infrared spectrometer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020 (in Chinese)

张子文. 基于红外光谱仪的多光谱辐射测温技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020

[4] Liang Gao, Li Xine, Meng Tingwei, et al. Analytical study of optimal temperature measurement band of multispectral transient temperature measurement system [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(5): 759-763. (in Chinese)

梁高,李新娥,孟庭伟,等. 多光谱瞬态测温系统最优测温波段的分析研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(5): 759-763.

[5] Tairan Fu, Jiangfan Liu, Minghao Duan, et al. Subpixel temperature measurements in plasma Jet environments using high-speed multispectral pyrometry [J]. Journal of Heat Transfer, 2018, 140(7).

[6] B. Bouvry, G. Cheymol, L. Ramiandrisoa, et al. Multispectral pyrometry for surface temperature measurement of oxidized Zircaloy claddings [J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 83: 78-87.

[7] Qin Yalou. Study on Multispectral temperature Measurement Technology in damage [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)

秦亚楼. 激光毁伤中多光谱测温技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

[8] Shu Zheng, Weiguang Cai, Chen Zhao, et al. On the measurement of flame temperature and emissivity based on multispectral imaging technique [J]. Measurement, 2022, 196.

[9] W Wojcik, V Firago, A Smolarz, et al. Multispectral high temperature thermography [J]. Sensors (Basel), 2022, 22(3).

[10] Zhentao Wang, Jingmin Dai, Sen Yang. The development of a multispectral pyrometer for achievable true temperature field measurements of the explosion flame [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(6).

- [11] Liu Qiuzuo, Cao Jinghua, Yang Jiaqiang, et al. Portable multi-band common aperture optical design[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(7):1078-1082. (in Chinese)  
刘秋佐, 曹景华, 杨加强, 等. 便携式多波段共孔径光学设计[J]. *激光与红外*, 2022, 52(7):1078-1082.
- [12] Zhentao Wang, Jingmin Dai, Sen Yang, et al. Development of a multi-spectral thermal imager for measurement of the laser-induced damage temperature field [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 123:104158.
- [13] Sun Kun, Sun Xiaogang, Jingmin Dai. Development of a multispectral thermometer for measuring the true temperature of an explosion flame[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(3):849-852. (in Chinese)  
孙崐, 孙晓刚, 戴景民. 测量爆炸火焰真温的多光谱温度计的研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(3):849-852.
- [14] T Fu, P Tan, C Pang, et al. Fast fiber-optic multi-wavelength pyrometer [J]. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82(6):064902.
- [15] Mei Liang, Bojun Sun, Xiaogang Sun, et al. Development of a new fiber-optic multi-target multispectral pyrometer for achievable true temperature measurement of the solid rocket motor plume [J]. *Measurement*, 2017, 95:239-245.
- [16] Zhan Chunlian, Han Jun, Lu Shaojun, et al. Research on multi-spectral, thermometry for the flame temperature measurement of ammunition explosions [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(6):48-52. (in Chinese)  
占春连, 韩军, 路绍军, 等. 弹药爆炸火焰温度多光谱测温技术研究[J]. *计测技术*, 2018, 38(6):48-52.
- [17] Peng Liwei, Chen Yu, Dong Dapeng, et al. Design of a common aperture optical system for multiband spectral reception and visible imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7):258-268. (in Chinese)  
彭礼威, 陈宇, 董大鹏, 等. 多波段光谱接收与可见光成像共孔径光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(7):258-268.
- [18] Xia Guo, Wu Xiao, Huang Chan, et al. Design of the optical system of a crossed asymmetric Czerny-Turner spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4):21-28. (in Chinese)  
夏果, 吴骠, 黄禅, 等. 交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J]. *光子学报*, 2017, 46(4):21-28.
- [19] Hao Siyaun, Xie Jialan, Wen Maoxing, et al. Design and realisation of a lightweight and compact long-wave infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9):293-300. (in Chinese)  
郝思远, 谢佳楠, 温茂星, 等. 轻小型长波红外光学系统的设计及实现[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(9):293-300.