

热红外高光谱成像仪的灵敏度模型与系统研制

王建宇, 李春来, 王跃明, 吕 刚, 袁立银, 金 健, 陈小文, 谢 峰

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 热红外波段是对地观测高光谱遥感中非常有用的波段, 受限于技术发展, 热红外波段的高光谱成像系统在国内的空间光电系统中并不多见, 近年来在国家相关部门的支持下发展迅速, 取得了较大进展。结合“十二五”期间研制的机载热红外高光谱成像仪系统, 建立了信号流模型, 对系统背景辐射进行了建模仿真, 并对红外焦平面组件等效暗电流进行了分析测量, 在此基础上得出了影响系统的探测灵敏度的关键因素, 给出了系统设计低温光学 100K 制冷的设计依据。机载热红外高光谱成像仪研制完成后, 还进行了探测灵敏度实际测量并与仿真结果进行了对比分析, 对未来进一步发展热红外高光谱成像技术积累了重要数据。

关键词: 热红外高光谱; 背景辐射; 探测灵敏度

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0102001

Sensitivity model and system design for thermal infrared hyperspectral imager

Wang Jianyu, Li Chunlai, Wang Yueming, Lv Gang, Yuan Liyin, Jin Jian, Chen Xiaowen, Xie Feng

(Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The thermal infrared spectrum is a very useful band for earth-observation hyperspectral remote sensing. Due to the limitation of technology, the hyperspectral imaging system of thermal infrared spectrum in domestic space photoelectric system is not very common, but it has developed quickly and made great progress under the support of national related department in recent years. Based on the airborne thermal infrared hyperspectral imager' developing during the Twelfth Five-Year Plan period, the signal flow model of the system was established in this paper. The background radiation of the system was modelled and simulated, the dark current of the infrared focal plane component was analyzed and measured, and on this basis the factors affecting the detection sensitivity of the system were analyzed, the design rules of the cryogenic optical 100 K for the cryogenic temperature was presented. After the completion of the airborne thermal infrared hyperspectral imager, the comparison between the actual detection sensitivity and the simulation results was carried out. The results show that the system has good compliance and has

收稿日期: 2016-08-10; 修订日期: 2016-09-20

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2012AA121102)

作者简介: 王建宇(1959-), 男, 研究员, 博士, 中国科学院空间主动光电技术重点实验室主任, 国家“十二五”863 对地观测与导航领域主题项目“星载红外高光谱成像载荷研制”首席科学家, 作为课题负责人承担了机载热红外高光谱成像仪的研制工作, 目前担任我国“高分辨率对地观测”重大专项航空系统副总设计师。Email: jywang@mail.sitp.ac.cn

accumulated important data for the further development of thermal infrared hyperspectral imaging technology.

Key words: thermal infrared hyperspectral; background radiation; detection sensitivity

0 引言

相对可见光和短波红外波段,热红外进行高光谱成像遥感具有独特应用优势,特别在地质勘探领域,它可以弥补短波无法探测基频振动幅度较大的部分矿物的缺陷,探测到 Si_nO_k 、 SO_4 等原子基频振动及微小变化,识别硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐、磷酸盐等矿物大类,并在此基础上对矿物亚类进行准确识别。在环保领域,热红外光谱仪器可根据气体的吸收或发射峰准确检测出约 90% 的化学气体物质,包括二氧化硫,氨气和氯甲烷等,可有效应用于污染气体排放监测。然而受红外焦平面探测器水平、低温光学工程研制等能力条件的限制,仪器发展和应用处理技术相对于可见/短波高光谱遥感而言发展比较缓慢。文中首先介绍了热红外高光谱成像系统的发展情况,然后信号理论模型出发,分析了信号的组成和影响系统探测灵敏度(以下以 $\text{NE}\Delta\text{T}$ 表示)的因素,仿真并计算得出低温光学制冷 100 K 的设计需求。“十

二五”期间中国科学院上海技术物理研究所研制完成了一台机载热红外高光谱成像仪系统,文中还介绍了该系统的分析和测试情况。

1 热红外高光谱成像系统的发展

热红外高光谱成像仪主要是获取目标在 8.0~12.5 μm 内的精细光谱,以此进行物质探测和识别。它装载于航天或航空平台,其光学视场对应地面的一个条带的红外高光谱信息,通过平台的运动获取地面目标的红外高光谱图像数据立方体。

国外从 20 世纪开始对热红外高光谱成像仪的系统研制和应用开展研究。1998 年美国夏威夷大学完成了热红外高光谱成像仪 AHI 的研制并开展了大量飞行验证工作,取得了有效成果,进入 20 世纪,以 JPL 实验室为代表的机构还陆续发展了 QWEST、MAKO 等类似仪器。在星载对地观测领域,国际上尚未有相关载荷。表 1 给出了几个典型热红外高光谱成像系统。

表 1 国外典型的热红外高光谱成像系统

Tab.1 Foreign typical thermal infrared hyperspectral imager

	Time	Spectra/ μm	Number of bands	IFOV	FOV/($^\circ$)	NETD
TIRIS	1997	7.5-14	64	3.6 mrad	4	-
AHI	1998	7.5-11.5	32	2.02×0.81 mrad	13	0.1 K@300 K
SEBASS	1996	2.5-5.2	110-120	1 mrad	7.3	-
LWHIS	2003	8-12.5	128	0.9 mrad	6.5	-
QWEST	2006	8-12	256	-	40	0.127 K@300 K
MAKO	2010	7.8-13.4	128	0.55 mrad	4	-

国内的相关起步相对较晚,但进展较快,近年来取得了部分标志性成果。“十二五”期间国内第一台机载热红外高光谱成像仪研制完成,并成功进行了飞行验证,目前已经开展航空热红外高光谱成像仪系统的工程研制工作,在星载热红外高光谱成像载荷方面已经开始筹备。目前国内在该领域的研究工作已取得了一定成绩,但仍有大量研究工作待开展。

2 系统的信号建模与仿真分析

针对热红外高光谱成像仪的信号特性,可以建立如图 1 所示的系统信号流模型,遥感仪器一般会受到大气影响。根据图 1 的信号流模型,系统接收了来自待探测目标的辐射功率(以 $P_{\text{tar}}(\lambda)$ 表示)和仪器自身背景辐射功率(以 $P_{\text{back}}(\lambda)$ 表示),光电探测元对

接收的这两类辐射产生响应电流 (分别用 $I_{tar}(\lambda)$ 和 $I_{back}(\lambda)$ 表示)。相对可见/短波谱段的高光谱,系统内部光机组件温度引入的热辐射 $P_{back}(\lambda)$ 必须重点关注。同时,对热红外谱段响应的红外焦平面探测器还存在较大暗电流(用 I_{dark} 表示)。以上三类电流信号会在积分时间(用 T_{int} 表示)内累积形成一定的电压信号(用 $V(\lambda)$ 表示),这就是系统对目标辐射信息的转换过程,也是文中进行热红外高光谱成像系统信号流分析和探测灵敏度影响分析的依据。

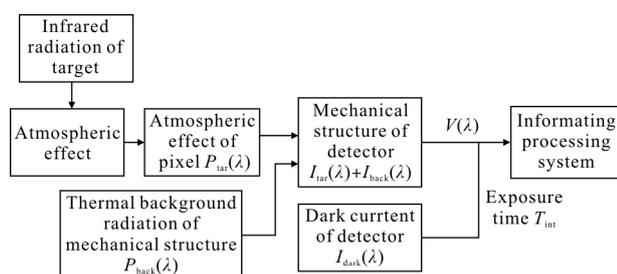


图 1 热红外高光谱成像系统的信号流模型

Fig.1 Signal flow model of thermal infrared hyperspectral imaging system

根据图 1 信号流模型,可得到积分时间 T_{int} 内在探测波段 λ 处的响应全部电子数 $N_e(\lambda)$:

$$N_e(\lambda) = \frac{T_{int} \times (I_{dark}(\lambda) + I_{ph}(\lambda))}{e^-} \quad (1)$$

式中: $I_{ph}(\lambda)$ 为探测元响应总光电流; e^- 为电子电量。其中, $I_{ph}(\lambda)$ 又可以表示为:

$$I_{ph}(\lambda) = R(\lambda) \times (P_{tar}(\lambda) + P_{back}(\lambda)) \quad (2)$$

式中: $R(\lambda)$ 为红外焦平面探测器的电流响应率。探测元的输出是电压形式,也就是图 1 中的 $V(\lambda)$,它是 $N_e(\lambda)$ 在探测器读出电路积分电容 C_{int} 上的累积值:

$$V(\lambda) = \frac{N_e(\lambda) \times e^-}{C_{int}} = \frac{T_{int} \times (I_{dark}(\lambda) + I_{ph}(\lambda)) + D_e e^-}{C_{int}} \quad (3)$$

将公式(1)和(2)带入公式(3),可得:

$$V(\lambda) = \frac{T_{int} \times R(\lambda) \times P_{tar}(\lambda)}{C_{int}} + \frac{T_{int} \times I_{dark}(\lambda)}{C_{int}} + \frac{T_{int} \times R(\lambda) \times P_{back}(\lambda)}{C_{int}} = V_{tar}(\lambda) + V_{dark}(\lambda) + V_{back}(\lambda) \quad (4)$$

可以看出:决定系统输出电压 $V(\lambda)$ 的因素包括目标辐射产生电压信号 $V_{tar}(\lambda)$ 、暗电流累积电压 $V_{dark}(\lambda)$ 和背景辐射产生电压 $V_{back}(\lambda)$ 。一般而言,焦平面探测元的输出电压存在饱和上限 V_{max} ,故目标有效辐射产生的电压信号 $V_{tar}(\lambda)$ 难以完全利用其电压动态范围

$[0, V_{max}]$,这也是限制系统性能提升的关键。在仿真计算得到上述数值的基础上,须通过合理设计使 $V_{back}(\lambda)$ 、 $V_{dark}(\lambda)$ 在 $V(\lambda)$ 中的比例权重降低,为此此节首先对上述三个参量展开仿真和计算。

在仿真计算中,系统输入参数以“十二五”期间研制的机载热红外高光谱成像仪为准,设计波段覆盖 $8.0 \sim 12.5 \mu\text{m}$,包含 180 个光谱通道,光谱分辨率优于 50 nm ,瞬时视场 1 mrad ,总视场大于 13° ,NE ΔT 要求在 $8.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 内优于 $0.2 \text{ K} @ 300 \text{ K}$ (平均)。

2.1 目标辐射信号的计算

系统接收的目标辐射在各个波段的功率 $P_{tar}(\lambda)$ 可表示为:

$$P_{tar}(\lambda) = \frac{1}{4} M(\lambda) \times D_o^2 \times \Omega \times \tau_o(\lambda) \times \tau_a(\lambda) \quad (5)$$

式中: $M(\lambda)$ 为各波段的热红外辐射出射度 (W/cm^2), D_o 为光学系统有效口径; Ω 为瞬时视场; $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统效率; $\tau_a(\lambda)$ 为分波段的大气效率。将光学 $F^\#$ 和光敏元尺寸 d 带入并简化公式(5)可以得到:

$$P_{tar}(\lambda) = \frac{1}{4} M(\lambda) \times d^2 \times \left(\frac{1}{F^\#}\right)^2 \times \tau_o(\lambda) \times \tau_a(\lambda) \quad (6)$$

将输入参数代入公式(6)可以得到各个成像波段探测器像元上接收到的目标辐射能量。系统的光学设计已固定,探测器光敏元和探测器类型有关,目前一般为 $30 \mu\text{m}$ 尺寸的方形探测元,目标信号辐射功率估算以 300 K 黑体表示。这样可以计算得到各波段的 $P_{tar}(\lambda)$ 数值。

按照系统的设计输入参数,在 $8.0 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 之间包含 180 个光谱通道,计算得到目标辐射到达探测元的功率平均在 $1 \times 10^{-11} \text{ W}$ 附近,假设焦平面探测器的电流响应率在 3 A/W ,则可以得到目标辐射功率引起的系统响应电流 $I_{tar}(\lambda)$ 为 $3.0 \times 10^{-11} \text{ A}$ 。

2.2 背景辐射的建模和仿真计算

图 1 所示的信号流模型中,背景辐射信号的存在是限制热红外高光谱成像系统设计的重要因素,系统采取低温光学设计也是为了降低这部分信号在整个焦平面饱和电压限中的比例,增加系统对有效目标信号的累积。背景辐射主要由仪器光学、机械以及其他部件由温度引起,入射到探测元上的背景辐射功率引起背景辐射电压 $V_{back}(\lambda)$,这里展开仿真分析。

针对机载热红外高光谱成像仪的系统光学、机

机械设计开展背景辐射分析仿真。图 2 给出了针对系统利用 Tracepro 软件开展的背景辐射分析的三维模

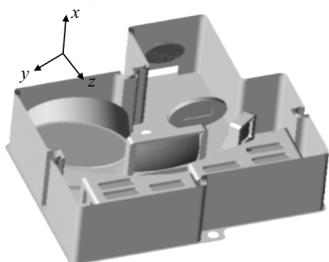


图 2 热红外高光谱成像仪的背景辐射仿真模型

Fig.2 Simulation model of background radiation of thermal infrared hyperspectral imager

型。系统的光谱仪光学部件、狭缝、光栅均固定在光学平台上，光机系统包含在一个封闭的箱体内部，箱体外部则为真空壳体，这样只有箱体靠近系统望远物镜和像方靠近探测器光敏面一侧分别开有一个大小匹配的孔和对应部件，其余都处于封闭状态，这样为背景辐射简化了复杂度，可以不需要考虑此封闭箱体以外空间的背景辐射。考虑到系统对波段的响应特性，仿真中目前设定只追迹 $8.0\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 的光线。在背景辐射仿真分析中主要考虑以下几种情况：(1) 机械内表面发射率对背景辐射的影响；(2) 光机表面温度对背景辐射的影响；(3) 低温冷箱各辐射面源对背景辐射的贡献。通过仿真分析，针对系统的光学、机械和箱体设计，可以得出如下结论：

(1) 当光学机械部分工作于常温时，由光学、机械、箱体产生的背景辐射功率为 $2.8\times 10^{-7}\ \text{W}$ ，相对 2.1 节计算的目标辐射功率 $1\times 10^{-11}\ \text{W}$ ，是其 2800 倍；

(2) 如果采用低温光学设计，将系统光学、机械和箱体内部设计温度在 170 K，采用同样的仿真，可以得到背景辐射功率为目标辐射功率的 100 倍左右；

(3) 如果继续降低制冷温度到 100 K，此时的背景辐射功率为 $6.0\times 10^{-12}\ \text{W}$ ，为目标辐射功率的 60% 左右。

(4) 当低温冷箱温度降到 70 K 时，此时背景辐射产生的辐射量为 $3.8\times 10^{-13}\ \text{W}$ ，此时背景辐射的功率约为目标辐射功率的 1/30。

从上述仿真结果看，系统设计低温光学 100 K 是合理的，既可保证目标辐射功率不至于被背景辐

射所淹没，也不至于投入更大的资源设计低于 100 K 的光机系统。

2.3 焦平面探测器暗电流分析及测试

根据前面的分析，在探测元响应总的光电流 $I_{ph}(\lambda)$ 中，包含了由探测器暗电流累积产生的电压信号 $V_{\text{dark}}(\lambda)$ 。信号 $V_{\text{dark}}(\lambda)$ 与探测器的暗电流可以不完全一样，焦平面组件一般由探测器和读出电路两部分组成，探测器暗电流的提法并未考虑读出电路影响。

文中为了进一步提高信号流模型表示的准确性，采用等效暗电流来表示探测器和读出电路两者工作引入的暗电流，同理暗信号 $V_{\text{dark}}(\lambda)$ 就可以这样来解释，正常工作时如果接收到的辐射总量为零，经过积分时间 T_{int} 后探测元仍然有电压信号输出，改变 T_{int} 发现信号输出和 T_{int} 之间存在比例关系，这里把引起这种暗信号的电流称为焦平面的等效暗电流，这也就是图 1 中的 $I_{\text{dark}}(\lambda)$ 。等效暗电流 $I_{\text{dark}}(\lambda)$ 的存在是由光伏探测器和读出电路的机理决定。

红外焦平面组件响应波长延伸到热红外后等效暗电流的数值会大幅增加，这个分量在系统信号流中不可忽略。通常，无法获取焦平面探测器组件等效暗电流的准确数值，为此可以对系统中等效暗电流进行测试。

采用的测试方法可参考图 3 所示，此时不开探测器杜瓦观测窗口，利用冷屏完全遮挡探测器视场，此时探测器接收到的目标辐射和背景辐射就由冷屏的辐射量决定，由于冷屏靠近探测器，内壁的温度可能只比探测器的工作温度略高，由它产生的并能够到达探测元的辐射功率(包括目标辐射和背景辐射)可以忽略，通过对焦平面设置一个较长的积分时间可以获得一个输出电平就可以反推出等效暗电流。该测试方案需要改装组件的冷屏，在实际的操作中，可

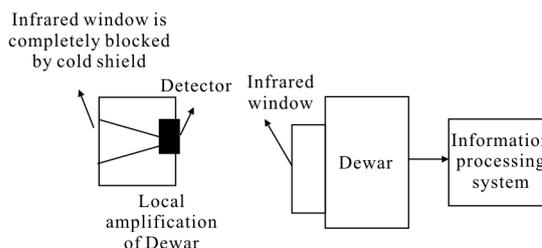


图 3 红外焦平面组件等效暗电流测试方案

Fig.3 Equivalent dark current test program for infrared focal plane components

以参考图 4 所示简化方案。在真空罐中设计一个低发射率金属目标(如抛光铝表面),对目标进行控温,温度设计在 150 K 以下(如果条件允许,可以进一步降低目标温度),目标完全覆盖并包围探测器组件窗口。这样就可以模拟一个窗口完全被冷屏遮挡的等效环境,利用该平台参考上面描述的方案进行等效暗电流测试。

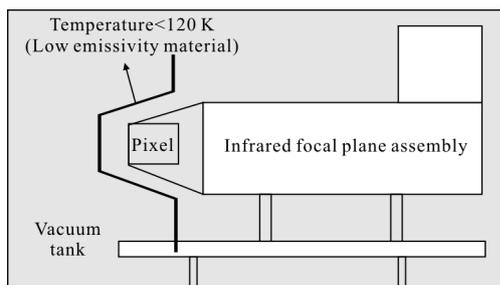


图 4 红外焦平面探测器组件等效暗电流测试系统
Fig.4 Equivalent dark current test system for infrared focal plane detector components

热红外高光谱成像仪引进了法国 Sofradir 公司引进的热红外焦平面组件(RM4 VLW 型号)作为探测芯片,自行封装了杜瓦冷屏,形成红外焦平面探测器组件。

为评估等效暗电流数值,采取图 4 所示系统进行了测量,红外焦平面探测器组件工作温度为 68 K,在真空罐中组件面对约 120 K 的深低温目标,驱动探测器工作,其积分时间可以到达 10 ms,通过器件输出的电压信号反推出其等效暗电流为 1.5×10^{-9} A,经过对比,该值是目标辐射功率引起的响应电流 $I_{tar}(\lambda)$ 为 3.0×10^{-11} A 的 50 倍,这种情况的存在是系统设计无法容忍的,目标的有效信号将完全被等效暗电流所淹没。

为此,重新设计了焦平面组件的制冷机驱动电路,并调整了控制策略,使得组件的工作温度由 68 K 降至 58 K,此时采用同样的测量方法测试得到组件等效暗电流为 1.5×10^{-10} A,此时等效暗电流为 $I_{tar}(\lambda)$ 的 5 倍,和有效信号在一个量级,以下分析均以该值进行。

3 探测灵敏度影响与低温光学仿真

明确系统接收目标功率 $P_{tar}(\lambda)$ 、背景辐射功率 $P_{back}(\lambda)$ 和组件等效暗电流 I_{dark} 后,可以根据下式计算得到系统各波段信噪比:

$$SNR(\lambda) = \frac{N_s(\lambda)}{N_n(\lambda)} = \frac{P_{tar}(\lambda) \times T_{int} \times \eta(\lambda)}{N_n(\lambda)} / \left(\frac{hc}{\lambda} \right) \quad (7)$$

式中: $N_s(\lambda)$ 和 $N_n(\lambda)$ 分别为信号电子数和噪声电子数; $\eta(\lambda)$ 为探测器组件的量子效率; h 为普朗克常数; c 为光速。热红外高光谱成像仪器的噪声包括探测器读出噪声、 $1/f$ 噪声和散粒噪声,散粒噪声是由目标辐射 $P_{tar}(\lambda)$ 、背景辐射 $P_{back}(\lambda)$ 和暗电流 I_{dark} 共同引起。根据噪声理论模型,噪声电子数 $N_n(\lambda)$ 计算公式如下:

$$N_n(\lambda) = \sqrt{N_s(\lambda) + N_{back}(\lambda) + N_{dark}(\lambda) + n_{read}^2} = \sqrt{N_s(\lambda) + \frac{P_{back}(\lambda) \times T_{int} \times \eta(\lambda)}{hc/\lambda} + \frac{I_{dark} \times T_{int}}{e} + n_{read}^2} \quad (8)$$

根据上述两式可计算得到系统信噪比,可以得出指定温度下的探测灵敏度:

$$NE\Delta T(\lambda) = \frac{T_2 - T_1}{SNR_2(\lambda) - SNR_1(\lambda)} \quad (9)$$

系统在系统灵敏度评估时一般针对 300 K 的室温目标,取 $T_1=297$ K, $T_2=303$ K,其余参数依据第 2 节中的数值,得到系统在低温光学 3 个不同温度点下的探测灵敏度,由于探测器组件实际并未给出 12.0~12.5 μm 之间的光谱响应,故这里的探测灵敏度仿真只给出 8.0~12.0 μm 的计算结果,如图 5 所示。

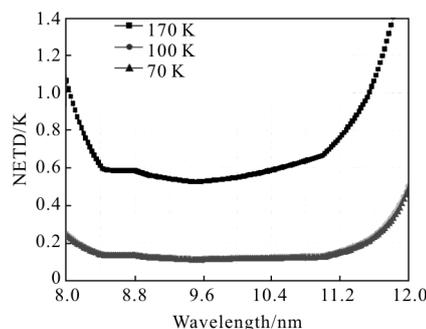


图 5 系统探测灵敏度估算(低温光学 170 K/100 K/70 K)
Fig.5 System detection sensitivity estimation (cryogenic optical 170 K/100 K/70 K)

从估算结果看,当低温冷箱制冷温度为 100 K 时,由于背景辐射能量的降低,系统能够累积的积分时间能够达到 5 ms,其灵敏度达到平均优于 200 mK 的水平,其中在 8.5~11.0 μm 之间接近 100 mK,但是由于组件等效暗电流的限制,当低温光学继续降低到 70 K 时,其积分时间仍然只能到 5 ms,系统的探测灵敏度不再提升。从当前仿真结果来看,组件的暗

电流成为限制探测灵敏度提升的关键。

综上所述,按照系统的设计输入,采用 100 K 的低温光学的设计方案,可以实现探测灵敏度平均优于 200 mK 的水平,但组件的暗电流成为系统探测灵敏度进一步提升的制约,这是未来进一步发展热红外高光谱成像技术需要解决的关键技术之一。

4 样机的研制与探测灵敏度测试

基于以上信号模型的分析 and 低温光学背景辐射的仿真结论,上海技术物理研究所在“十二五”期间研制了一台机载热红外高光谱成像仪样机,其系统组成如图 6 所示。总体技术路线上选择了色散型分光+推扫成像的方案,具体采用闪耀平面光栅分光,面阵红外焦平面组件实现光谱信号获取。基于第 3 节分析,采用了低温光学 100 K 的设计。系统由前置望远镜、低温光谱仪部件(100 K)、焦平面探测器、制冷机及电子机箱组成。低温光谱仪部件设计为一个低温冷箱,内部放置光谱仪部件和焦平面探测器。

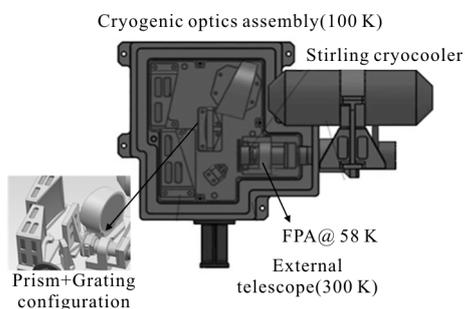


图 6 机载热红外高光谱成像仪组成及低温内部结构

Fig.6 Composition of the airborne thermal infrared hyperspectral imaging system and the interior structure of cryogenic optical

图 7 为机载热红外高光谱成像仪系统照片,系统于 2015 年 3 月在实验室进行了性能测试,结果均满足设计指标要求。这里重点介绍探测灵敏度的测试情况,探测灵敏度测试时,样机低温光学处于 100K 工作温度,放置高精度面源黑体充满系统口径,设置黑体温度,待温度稳定后进行数据采集,测试时黑体设置 2 个温度点分别为 23℃和 33℃,各采集约 1000 帧图像数据。计算得到样机的探测灵敏度结果如图 8 所示,经过统计分析,系统在 8000~10000nm 之间 120 个波段的平均 NETD 为 180 mK,8 000~125 000 nm 之间 180 个波段的平均 NETD 为 337 mK。

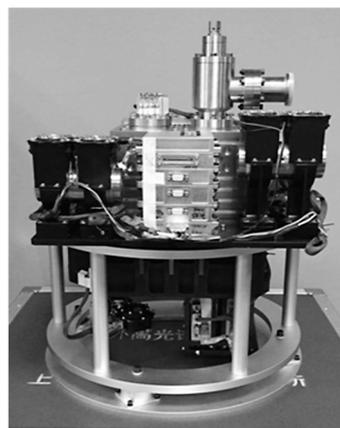


图 7 机载热红外高光谱成像仪系统

Fig.7 Airborne thermal infrared hyperspectral imager system

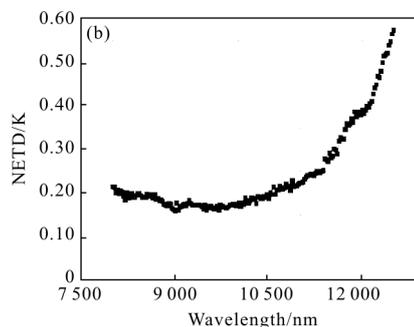
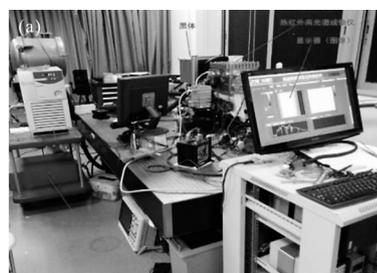


图 8 实测的 8000~12500nm 各波段 NETD 曲线

Fig.8 Measured NETD curves for each band from 8000 to 12500nm

从测试结果看,系统在 8.0~12.0 μm 波段的 NETD 与仿真分析较为接近,值得注意的是系统在 11.0 μm 以后的探测灵敏度明显高于 0.2 K,需要进一步提升性能。将来系统的发展必须重点降低探测器组件等效暗电流,若该值无法改善,继续降低低温光学温度也无法改善系统的探测灵敏度水平。

2015 年 6 月组织开展了热红外高光谱成像仪系统浙江舟山的飞行试验。飞行高度设计为 2000m,航线东西向飞行,飞行平台搭载的设备包括样机和 POS AV510。经过机上实际测试,在高空 2000 m 的条件下,系统低温光学存在 1~2 K 的漂移,其余工况经过测试与实验室一致,这也说明了设置机上定标

装置的必要性。后期上海技术物理研究所对该系统进行设计,研发了新一代热红外高光谱成像仪系统,该系统设置了完备的机上定标装置并将观测视场扩展到 40 °C,新系统于 2016 年 3 月进行了海南飞行试验,图 9 给出了海南飞行获取的热红外高光谱数据立方体,图 10 为处理后的热红外高光谱数据假彩色合成图,取得了较好的效果。这两次飞行活动共获取了约 120G 的热红外高光谱数据立方体,为国内开展热红外高光谱成像技术的研究工作积累了重要数据。

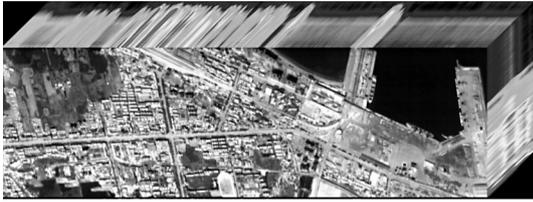


图 9 海南飞行获取的热红外高光谱数据立方体

Fig.9 Thermal infrared hyperspectral data cube obtained by flight in Hainan



图 10 热红外高光谱数据假彩色合成图

Fig.10 False color synthesis of thermal infrared hyperspectral data

5 结论

8.0~12.5 μm 的热红外谱段作为大气窗口内最重要的波段之一,在高光谱成像仪器的研制、数据处理及业务应用方面发展相对缓慢。国内的研究工作起步较晚,近年来取得了一系列成果,从“十一五”开始,上海技术物理研究所在国家多项重点科研项目的持续支持下,从系统原理和试验装置起步,逐步突破了热红外高光谱成像系统总体设计、红外焦平面组件研发和应用、红外高光谱精细分光、低温光学工程实施等关键技术,于 2015 年成功完成了国内第一台热红外高光谱成像仪的研制和

飞行验证,仪器综合指标达到国际一流水平,并于近期完成了对系统的升级开发,目前已经开始进行星载系统的筹划工作。

总体而言,热红外高光谱成像载荷在我国的研究工作仍然不多,目前机载系统尚未完成型号产品定型,星载方面也正开展预先研究,未来其仪器的研制和应用发展仍然有大量工作有待开展,是高光谱遥感的重要发展方向之一。

参考文献:

- [1] Shen Mangzuo, Ma Wenli, Liao Sheng, et al. Development of a cryogenic optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(2): 202-205. (in Chinese)
沈忙作, 马文礼, 廖胜, 等. 低温光学系统的研制[J]. 光学学报, 2001, 21(2): 202-205.
- [2] Wang Jianyu, Xu Weiming, Yuan Liyin, et al. Background radiation suppression of a thermal infrared hyperspectral imaging system [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(6): 419-423. (in Chinese)
王建宇, 徐卫明, 袁立银, 等. 热红外高光谱成像系统的背景抑制和性能优化 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(6): 419-423.
- [3] Wang Jianyu, Wang Yueming, Li Chunlai. Noise model of hyperspectral imaging system and influence on radiation sensitivity [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(4): 614-620. (in Chinese)
王建宇, 王跃明, 李春来. 高光谱成像系统的噪声模型和对辐射灵敏度的影响[J]. 遥感学报, 2010, 14(4): 614-620.
- [4] Li Chunlai, Lin Chun. Space-borne LWIR FPA imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2253-2260. (in Chinese)
李春来, 林春. 星载长波红外焦平面成像系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2253-2260.
- [5] Xue Yongqi. The technical development of airborne scan imaging systems [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1992, 11(3): 169-180. (in Chinese)
薛永祺. 机载扫描成像系统的技术发展[J]. 红外与毫米学报, 1992, 11(3): 169-180.