

非制冷色散式成像光谱仪辐射传递模型

许洪,王向军,刘峰

(天津大学精密仪器与光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津300072)

摘要:根据接收信号信噪比,研究了基于非制冷微测辐射热计阵列构造色散式成像光谱仪的可行性。综合考虑目标红外辐射特性、大气传输透过率、仪器接收孔径、色散式光谱仪辐射传递特性、红外阵列探测器参数、数据链传输等环节,建立了完善的色散式长波红外成像光谱仪辐射能量传递模型。选用典型地物红外发射率数据,非制冷微测辐射热计红外焦平面阵列参数,利用低分辨率大气辐射传输计算软件LOWTRAN生成大气红外透过率曲线,依据传递模型,计算了以非制冷微测辐射热计阵列为探测器的色散式长波红外成像光谱仪可达到的光谱分辨率,验证了依据非制冷红外探测器构建小型红外成像光谱遥感器的潜力。

关键词:辐射传递模型; 微测辐射热计; 成像光谱仪; 长波红外; 遥感

中图分类号: TN21; TP7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2009)01-0031-05

Radiative transfer model of uncooled dispersive imaging spectrometer

XU Hong, WANG Xiang-jun, LIU Feng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to the SNR of receiving signal, the feasibility of the LWIR uncooled microbolometer FPA based dispersive imaging spectrometer was studied. Considering the characteristic of target radiation, the effect of atmospheric transfer transmittance, receiving aperture of instrument, radiative transfer characteristic of dispersive spectrometer, performance parameters of the infrared detector array as well as data communication, a perfect radiative transfer model was constructed. Infrared emissivity data of several typical ground objects, and the performance parameters of the state-of-the-art uncooled microbolometer IRFPA were selected, the LOWTRAN code was utilized to generate the atmospheric transmittance curve. Spectral resolution of a LWIR dispersive imaging spectrometer based on an uncooled microbolometer FPA were calculated in terms of transfer model. The result shows the potential for using the uncooled microbolometer FPA to construct small LWIR imaging spectrometer.

Key words: Radiative transfer model; Microbolometer; Imaging spectrometer; LWIR; Remote sensing

收稿日期:2008-05-20; 修订日期:2008-06-25

基金项目:国防重点预研基金项目

作者简介:许洪(1975-),男,北京人,博士生,主要从事红外多光谱探测技术的研究。Email: xuhongpost@163.com

导师简介:王向军(1955-),男,黑龙江哈尔滨人,博士生导师,主要从事精密测试技术及仪器、光电探测技术、影像与视觉测量方面的研究。
Email:xdocuxjw@vip.163.com

0 引言

工作于长波红外波段(8~14 μm)的成像光谱仪器,可以实现图、谱合一,在陆地海洋地理遥感,大气、土壤和水体的污染物遥感监测,军事目标侦查探测、监视等民用和军事领域,正逐渐发挥越来越重要的作用,受到各国的重视^[1]。色散式成像光谱仪结构无动部件、光谱分辨率高、视场大、数据处理实时性好,是一种很好地适应现场使用的光谱仪器,适合于星载、机载等使用条件严格的环境,成为目前主要的遥感用成像光谱仪器。

以往,长波红外波段多谱、超谱成像光谱仪基本使用制冷的光子型红外探测器作为敏感元件,仪器体积大、成本高、能耗大。20世纪90年代中后期以来,随着非制冷红外探测器制作技术的快速发展,特别是基于MEMS技术的微测辐射热计阵列的发展,使得利用非制冷微测辐射热计构建小型、低成本、低功耗成像光谱仪成为可能。已知的基于微测辐射热计阵列的热波段多光谱成像光谱仪系统包括:1997年“发现号”航天飞机搭载的三波段ISIR系统,火星2001轨道飞行器搭载的九波段THEMIS系统,以及热波段高分辨率地球绘图仪(THEMA)系统^[2-4]。近年,随着低空小型携带平台的发展,基于非制冷微测辐射热计的小型超光谱($\Delta\lambda/\lambda \geq 100$)成像光谱仪成为可能,已经可以看到基于此技术的傅里叶变换成像光谱仪的报道^[5]。

由于自然界物体在长波红外波段辐射能量较低;超光谱色散式成像光谱仪以棱镜或光栅为分光元件,将入射辐射分解为连续的窄带辐射,导致每一窄波段上的单色辐射能量很低;相比可见光波段光电探测器,工作于长波红外波段的光电探测器灵敏度较低、噪声电压高,需要接收更多的人射辐射;并且目标热辐射在长距传输过程中,会受到大气的衰减,使得色散式长波红外光谱遥感仪的接收口径普遍较大,相应的体积也较大。并且在灵敏度和噪声水平上,由于非制冷探测器阵列同比制冷型器件要低几个数量级,因此,在仪器设计阶段,为了精确地确定仪器结构参数和可达到的光谱分辨率之间的关系,优化结构参数,需要建立严格的热辐射传递模型,进行全面的分析研究。

1 色散式长波红外成像光谱仪辐射传递模型

在长波红外波段,地物表面对外界环境的热反射

部分较小,主要探测目标的自身热辐射。图1给出了机载或星载推帚式成像光谱仪对地观测的过程示意图,穿轨的带状视场沿平台运行轨道推扫,构成二维空间图像,色散元件将全波段辐射沿光谱方向分解,形成光谱维数据,被观测瞬时视场所包含的地物表面发出的热辐射,经大气层衰减传输至机载/星载成像光谱仪接收孔径,聚焦在色散式光谱仪的入射狭缝上,再经过光栅或棱镜等分光元件的色散,在红外焦平面阵列上成像,最终转换为各光谱段对应的光电信号,经模数转换后形成图谱数据“立方体”,经下行数据链路传至地面终端。为了精确确定成像光谱仪的结构尺寸与接收信号强度和作用距离之间的关系,需要建立辐射接收模型,对各个环节的辐射能量传递进行精确计算。

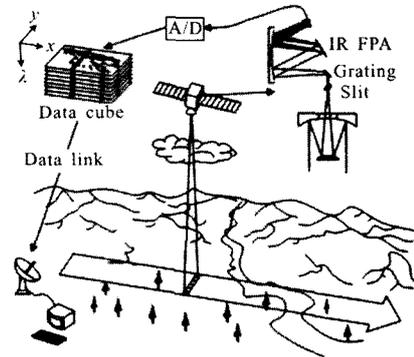


图1 推帚式色散成像光谱仪对地观测过程示意图

Fig.1 Scheme of observation procedures of the pushbroom scanning dispersive imaging spectrometer

1.1 目标长波红外辐射特性

各种不同材质地物具有不同的长波红外光谱发射率,多光谱、超光谱遥感系统也正是依据红外光谱发射率的不同来区分不同地物的。最初,用于指导遥感仪器设备设计的地物红外光谱发射率数据需要经过地面实验室精确测量获得,图2为取自ASTER光

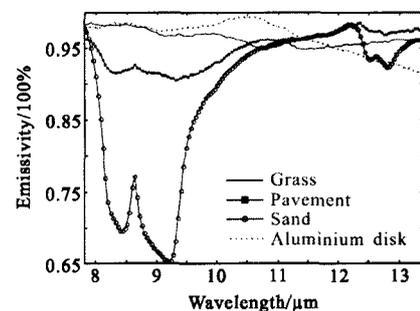


图2 不同材质地物的长波红外光谱发射率

Fig.2 Spectral emissivity of different material objects in LWIR band

谱数据库的几种典型地物红外光谱发射率数据。可以看到,大多数地物在热红外波段具有较高的发射率(>0.9),所以地表辐射主要是地物自身的热辐射。

由于太阳在长波红外波段的辐射部分很小,可以忽略不计。遥感目标的辐射成分主要包括自发辐射成分、大气层下行辐射和环境辐射的反射成分和大气层上行辐射成分^[6],其辐射亮度可以表示为:

$$L(\lambda)=\varepsilon(\lambda)L_B(\lambda,T)+[1-\varepsilon(\lambda)]L_i(\lambda)+L_\uparrow(\lambda) \quad (1)$$

式中: $\varepsilon(\lambda)$ 是地物表面发射率; $L_B(\lambda,T)$ 为绝对温度, T 是黑体的单色辐射亮度,可由普朗克公式表示为:

$$L_B(\lambda,T)=2hc^2/\lambda^5(e^{hc/\lambda kT}-1) \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常数; k 为玻耳兹曼常数。在设计阶段,由于自发辐射占主要成分,所以以此为依据计算地物辐射通量。

1.2 入射狭缝处的接收辐照度

假定光谱仪接收望远物镜的口径为 D ,焦距为 f ,目标单色辐射亮度为 $L(\lambda)$,则光谱仪入射狭缝处的接收辐照度 $E_i(\lambda)$ 可表示为:

$$E_i(\lambda)=\pi L(\lambda)\tau_a(\lambda)D^2/4f^2 \quad (3)$$

式中: $\tau_a(\lambda)$ 为大气传输透过率。

当仪器采用卡塞格林物镜系统时,主镜口径为 D_1 ,次镜口径为 D_2 ,入射狭缝处的接收辐照度 $E_i(\lambda)$ 为:

$$E_i(\lambda)=\pi L(\lambda)\tau_a(\lambda)(D_1^2-D_2^2)/4f^2 \quad (4)$$

1.3 色散式光谱仪能量传递特性

图3为色散式光谱仪内部光路结构示意图,由入射狭缝处的接收辐照度转换为像平面处的接收辐照度,需要经过准直物镜的准直,色散元件的色散和成像物镜的成像,在这个过程中,需要考虑的影响辐照度的因素包括系统的透过率、物镜焦距、衍射效率、色散元件的横向放大率等。下面给出广泛应用的光栅色散式光谱仪能量传递特性。

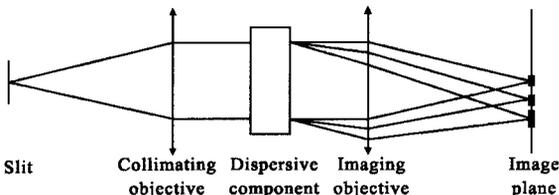


图3 色散式光谱仪内部光路结构示意图

Fig.3 Scheme of optical structure of dispersive spectrometer

光栅光谱仪接收的入射辐射,由入射狭缝经分光系统照射在红外传感器上的单色辐照度 $E_o(\lambda)$ 表示为:

$$E_o(\lambda)=\tau_m E_i(\lambda)f_1^2/f_2^2 \gamma \quad (5)$$

式中: τ_m 为第一级主极大能量衍射效率,一般可达80%以上; f_1 为准直物镜的焦距, f_2 为成像物镜的焦距; γ 为光栅色散系统的横向放大率。

1.4 大气传输透过率的影响

大气中的水分和二氧化碳对长波红外辐射的吸收将是影响长波红外光谱仪作用距离的关键因素。根据大气传输理论,当遥感高度为 H ,俯视方向天顶角为 θ ,由目标至红外光谱传感器的大气积分透过率为:

$$\tau_{H,\theta}(\lambda)=e^{-\int_0^H \alpha(\lambda,h) \sec\theta dh} \quad (6)$$

式中: $\alpha(\lambda,h)$ 是单位距离的大气传输衰减系数。

目前,在大气遥感和光电探测技术领域,经常使用由美国空军研究实验室开发的大气传输透过率计算专用软件LOWTRAN或MODTRAN,进行遥感数据的校正和光电探测器的设计工作。

1.5 噪声等效光谱亮度表达的系统噪声

机载/星载成像光谱仪的系统噪声 V_{noise} 主要包括红外探测器的输出噪声、A/D转换噪声、数据链路传输噪声等。随着遥感用高光谱分辨率成像光谱仪的发展,引入了噪声等效光谱亮度(NESR)参数表达系统噪声:目标在被测波段的辐射亮度引起的信号强度与系统噪声相当时,亮度值称为系统的噪声等效光谱亮度,即

$$NESR=V_{\text{noise}}/A \quad (7)$$

式中: A 为系统增益。

红外探测器输出的噪声主要有量子噪声、热噪声、 $1/f$ 噪声、读出噪声,一般可由探测器的标称比探测率参数进行数量级估算,即:

$$\sigma_D=S(\lambda)\sqrt{A_d \cdot \Delta f / D^*} \quad (8)$$

式中: A_d 为探测像元的面积; $S(\lambda)$ 为探测器光谱响应灵敏度; Δf 为系统带宽; D^* 为比探测率。

信号的A/D转换噪声电压均方值计算公式为:

$$\sigma_{A/D}^2=\frac{1}{12} \cdot \left(\frac{L_{\text{max}}}{2^Q-1} \right)^2 \quad (9)$$

式中: L_{max} 为探测器可探测的最大辐亮度值,即探测器的动态范围; Q 为需要量化的比特位数。

数据链路的传输噪声电压均方值计算公式为:

$$\sigma_c^2 = B_e \cdot \sum_{q=0}^{Q-1} \left(2^q \cdot \frac{L_{\max}}{2^Q - 1} \right)^2 \quad (10)$$

式中: B_e 为传输过程可容忍的误码率。

这样, 系统噪声可表示为:

$$V_{\text{noise}} = \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_{A/D}^2 + \sigma_C^2} \quad (11)$$

由此可计算出成像光谱仪的噪声等效光谱亮度。

2 色散式成像光谱仪辐射传递模型表达式

由于不同地物在窄波段的辐射能量差异很小, 为了得到准确可靠的单色辐射测量值, 需要使红外光电传感器转换的信号电压与噪声电压的信噪比高于一定的阈值信噪比 SNR_{th} 。所以有:

$$V_s \geq V_{\text{noise}} \cdot SNR_{th} \quad (12)$$

式中: 信号电压 V_s 可以表示为:

$$V_s = \frac{A_d \cdot S(\lambda) \cdot \pi \cdot L(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_s(\lambda) \cdot D^2}{4f^2} \quad (13)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为波段带宽; $\tau_a(\lambda)$ 为大气光谱透过率; $\tau_s(\lambda)$ 为成像光谱仪系统透过率; D 为望远镜口径。

3 基于非制冷微测辐射热计阵列的成像光谱仪可行性研究

非制冷微测辐射热计探测器无需制冷设备, 可以设计成小型化的热红外成像系统, 但是较低的灵敏度使其在弱信号探测、遥距探测使用中受到限制。近年来, 随着微测辐射热计研制技术的发展, 其技术指标已有很大提升^[7-9], 在遥感探测中的潜力越来越大。

采用参考文献 [10] 介绍的非制冷微测辐射热计阵列的典型数值, 其光谱灵敏度在工作光谱范围内近似不变。设定遥感成像光谱仪的应用场景为低空小型携带平台, 对 300 K 地面场景遥感观测, 工作高度大于 1 km, 由于探测器阵列帧频为 60 Hz, 飞行速度约为 216 km/h, 工作光谱波段位于 7.8~13.4 μm , 主要的系统工作要求和器件参数见表 1, 相应的光谱分辨率将依此确定。

观测的目的是针对各种不同的地物进行精确的光谱成像探测, 因此在每个波段都要得到具有可靠信

表 1 成像光谱仪的观测要求和非制冷焦平面阵列的性能参数

Tab.1 Request of small imaging spectrometer and performance parameters of uncooled microbolometer FPA

| System parameters of dispersive imaging spectrometer | | Performance parameters of uncooled microbolometer FPA | |
|--|------------------------|---|--|
| Height | ≥ 1 km | Frame frequency | 60 Hz |
| Cruising speed | 216 km/h | D^* | $1.6 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ |
| Spectral coverage | 7.8~13.4 μm | Pixel size | 39 $\mu\text{m} \times 39 \mu\text{m}$ |
| Ground temperature | 300 K | Sensitivity | $3.5 \times 10^4 \text{ V/W}$ |

噪比的探测信号, 就需要兼顾不同目标的光谱发射率特征, 根据各波段中光谱发射率的最低值进行设计。由于大部分目标的长波红外波段发射率极小, 为了能够顺利区分不同目标的光谱发射率, 需要设置较高的信噪比阈值, 在高端要求的超光谱成像光谱仪系统中, SNR_{th} 往往达到 500 以上。文中只考虑非制冷焦平面阵列本身的噪声, 不考虑 A/D 噪声和数据传输噪声, 这在设计良好的电路系统和不需数据传输链路的情况下是可能的。但在设计良好的色散式光谱仪系统, 其光谱透过率往往达到 0.5 以上, 为了简化计算, 设定成像光谱仪系统的辐射透过率为 0.5 (这个设定是偏保守的)。

在仿真分析中, 认为地面景物在长波红外波段的反射率及大气路径辐射很低, 不考虑反射大气背景辐射和路径辐射成分, 采用 LOWTRAN 大气辐射透过率软件 (LOWTRAN CODE) 计算了相应工作场景的大气路径透过率, 主要的参数设定为: 1976 年美国标准大气模型; 乡村消光系数, 缺省气象视距 23 km; 春-夏季对/平流层廓线; 天顶角为零的垂直向下方向。针对不同观测距离的大气辐射透过率曲线如图 4 所示。

由于红外遥感器望远物镜 F 数一般为 1, 因此其口径与焦距尺寸相等。根据前面的公式, 计算得到该系统的光谱分辨率约为 0.9 μm 。若要实现更高的光谱分辨率, 则需要采用探测率更高的制冷型红外光子探测器。

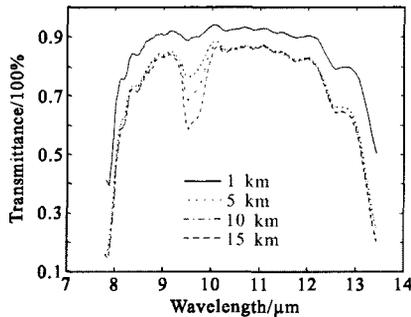


图4 典型气象条件下不同观测高度的大气辐射透过率

Fig.4 Curves of atmospheric radiant transmittance at different observation altitude

4 结论

非制冷微测辐射热计红外焦平面阵列是发展迅速的新一代红外探测器件,在构建小体积、低成本的红外成像光谱仪的应用上有巨大潜力。由于非制冷焦平面阵列的探测率比制冷的光子型探测器要低几个数量级,因此在色散式分光结构中,难以用其构造高光谱分辨率的成像光谱仪,但是可以利用其构造小型化多光谱成像光谱仪。此外,可以通过牺牲扫描成像的速度,增加积分时间来提高信噪比,从而提高光谱分辨率。由于傅里叶变换式红外成像光谱仪的光通量远大于色散式成像光谱仪,因此还可以考虑基于非制冷焦平面器件来构造高分辨率的傅里叶变换式红外成像光谱仪。

参考文献:

- [1] XU Hong, WANG Xiang-jun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J].*Infrared and Laser Engineering*(许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用. 红外与激光工程),2007,36(1):13-17.
- [2] SPINHIRNE J D, SCOTT V S, LANCASTER R S, et al. Performance and results from a space borne, uncooled microbolometer array spectral radiometric imager [C]//*IEEE Aerospace Conference*,2000,3:125-134.
- [3] MURPHY D, RADFORD W, FINCH J, et al. Multi-spectral uncooled microbolometer sensor for the Mars 2001 orbiter THEMIS instrument [C]//*IEEE Aerospace Conference*,2000,3:151-163.
- [4] COPPO P, BATTISTELLI E, BARILLI M, et al. Requirements and design of a thermal high-resolution Earth mapper (THEMA) based on uncooled detectors[C]//*Proceedings of SPIE, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VI*, 2003,4881:531-542.
- [5] LUCEY P G. Uncooled long-wave infrared hyperspectral imaging: United States, 7135682[P].2006-11-14.
- [6] HAN Xin-zhi. *Spaceborne Multispectral Remote Sensing*[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House(韩立志. 航天多光谱遥感. 北京: 宇航出版社),1991.
- [7] TEZCAN D S, EMINOGLU S, AKIN T. A low-cost uncooled infrared microbolometer detector in standard CMOS technology [J].*Electron Devices*,2003,50(2):494-502.
- [8] XING Su-xia, ZHANG Jun-ju, CHANG Ben-kang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology[J].*Infrared and Laser Engineering*(邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状. 红外与激光工程), 2004, 33(5): 441-444.
- [9] PARRISH W J, WOOLAWAY J T II, KINCAID G T, et al. Low-cost 160x128 uncooled infrared sensor array[C]//*Proceedings of SPIE, Infrared Readout Electronics IV*,1998,3360:111-119.
- [10] POPE T D, ALAIN C, BERGERIB A. Microbolometer detector array for satellite-based thermal infrared imaging[C]//*Proceedings of the 2004 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems*,2004: 310-314.