

光学学报

非制冷热红外成像光谱仪内部杂散辐射的分析与抑制

谢鑫龙^{1,2}, 朱晓晓^{1,2}, 朱嘉诚^{1,2**}, 沈为民^{1,2*}

¹苏州大学光电科学与工程学院教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

²苏州大学光电科学与工程学院江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 尺寸小、成本低和寿命长的非制冷热红外成像光谱仪对探测高温目标有巨大潜力,但其严重的内部噪声会降低检测灵敏度。非制冷热红外成像光谱仪主要的噪声包括探测器噪声、光机元件表面散射杂光引起的噪声、光栅非工作级次产生的杂光噪声和光机元件自身的背景辐射噪声。推导了包含上述噪声的噪声等效温差(NETD)公式,以 Offner 型热红外成像光谱仪为例,分析 NETD 与系统 F 数和机械元件内表面光学属性等主要影响因素之间的关系,研究了光机表面抛光处理在抑制光谱仪内部背景辐射噪声方面的能力。最后,采用像元间线性关系法扣除了剩余的噪声,使探测信号与目标本身信号基本一致。

关键词 仪器; 非制冷热红外成像光谱仪; 内部热辐射; 杂散辐射抑制; 噪声等效温差; 表面抛光

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1512006

Analysis and Suppression of Stray Radiation in Uncooled Thermal Infrared Imaging Spectrometer

Xie Xinlong^{1,2}, Zhu Xiaoxiao^{1,2}, Zhu Jiacheng^{1,2**}, Shen Weimin^{1,2*}

¹Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;

²Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract The uncooled thermal infrared imaging spectrometer with small size, low cost, and long life has great potential for detecting high-temperature targets, but its severe internal noise will reduce the detection sensitivity. The main noise of uncooled thermal infrared imaging spectrometer includes the detector noise, the noise caused by the stray light from the surface of the opto-mechanical component, stray light noise generated by the non-working order of the grating, and the background radiation noise of the opto-mechanical component. The noise equivalent temperature difference (NETD) formula containing the above noise is derived. Taking the Offner thermal infrared imaging spectrometer as an example, the relationship among NETD, the F number of the system, and the optical properties of the inner surface of mechanical components is analyzed. Then, the ability of opto-mechanical surface polishing to suppress the internal background radiation noise of the spectrometer is studied. Finally, the linear relationship between pixels is used to remove the remaining noise, so that the detection signal is basically consistent with the target signal.

Key words instrumentation; uncooled infrared imaging spectrometer; internal thermal radiation; stray radiation suppression; noise equivalent temperature difference; surface polishing

1 引言

使用测微辐射热计阵列的非制冷热红外成像光谱

仪在尺寸、质量和能耗上比制冷型成像光谱仪更有优势,它在监控极端环境的高温事件中有巨大潜力,目前正在行星探测、火山监测和火灾监控等领域中得到

收稿日期: 2021-12-21; 修回日期: 2022-01-08; 录用日期: 2022-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(62105230)、中国博士后科学基金(2020M681700)

通信作者: *swm@suda.edu.cn; **zjc@suda.edu.cn

了应用^[1-2]。然而,与可见近红外或短波红外成像光谱仪相比,热红外成像光谱仪有其巨大的缺点。在常温下,仪器自身的热辐射也在其探测波段范围内,这会极大干扰对信号的检测,严重时甚至淹没辐射信号。因此,实现非制冷热红外光谱仪的关键就是要降低背景辐射,进而提高检测灵敏度。

欧盟委员会第四届环境与气候研究发展计划中提出了大幅宽传感器 MUST^[3],该传感器是被应用于地球观测的非制冷红外系统, F 数为 1,噪声等效温差(NETD)为 0.43 K(300 K 温度下),其探测器带有 Peltier 效应热电控温装置,用以精细地调节环境温度,但这会增加仪器的质量。日本与欧洲共同发射 Akatsuki 卫星用于阐明驱动金星快速大气循环的机制和云层物理^[4],该卫星的长波红外(LIR)传感器使用非制冷测微辐射热计阵列, F 数为 1.4,该传感器中使用快门时间插值法来扣除背景噪声,这会导致仪器无法连续地获取图像。美国宇航公司研制了新型机载热红外成像光谱仪 MAKO,采用 Dyson 型分光装架, F 数为 1.25,光学系统整机采用液氮制冷以保持 10 K 温度的工作环境,NETD 为 0.1~0.2 K^[5],但由于存在制冷装置,故系统的体积和质量无法实现很小。欧洲与日本成功发射 BepiColombo 卫星,其热红外成像光谱仪 MERTIS 基于非晶硅测微辐射热计阵列^[6],采用全反射光学设计以进行水星表面成分探测、成岩矿物识别和水星表面测绘等研究, F 数为 2,光谱分辨率为 90 nm,NETD 小于 3 K(300 K 温度下),光谱仪整体体积小且质量轻。由此可见,与制冷型光谱仪相比,非制冷型光谱仪有着尺寸更小、成本更低和寿命更长的优势,但它的检测灵敏度 NETD 会差约一个量级。值得注意的是,MERTIS 系统的机械内壁采用抛亮处理,这能降低系统内部辐射强度,有利于提高检测灵敏度,但也会增强由表面反射的杂光强度。本文将研究在非制冷热红外成像光谱仪系统中,光机表面抛亮处理在抑制杂散热辐射性能方面的优势,这对非制冷热红外成像光谱仪系统的设计有指导意义。

2 光学系统结构

非制冷型热红外成像光谱仪检测灵敏度虽然不如制冷型热红外成像光谱仪高,但是它有着质量轻、成本低和寿命长的优势,进而更加适用于深空探测任务。本文给出的热红外成像光谱仪用于探测金星大气中的 SO_2 分布和大气表面的热潮运动,这对理解金星大气的大气化学、动力学和辐射能力平衡有着巨大的作用^[7]。温度为 350 K 的金星大气表面辐射出射度峰值波长为 8.3 μm ,因此将系统的探测波段定为 7~14 μm 。大气气体分布探测要求光谱分辨率达到 100 nm,探测器选择像元尺寸为 25 μm 、NETD 为 60 mK 的氧化钒非制冷热红外焦平面阵列。光谱仪具体参数指标如表 1 所示。

综合考虑系统的体积小、性能高和畸变小的要求,本文选择 Offner 型成像光谱仪光学结构^[8-9],其光路图

表 1 光谱仪参数指标

Table 1 Parameter indexes of spectrometer

Parameter	Value
F number	2
Focal length f / mm	60
Wavelength / μm	7~14
Spectral resolution / nm	100
Pixel size / μm	25
Field of view / ($^\circ$)	3.48
Image size (mm \times mm)	3.84 \times 1.75

如图 1 所示。目标辐射进入前置望远系统成像到中间的狭缝处,通过狭缝的辐射经分光系统最终成像在探测器上。前置望远系统由三块离轴反射镜组成,其中主镜 M1 和三镜 M3 为非球面镜,次镜 M2 为球面镜。分光系统由一块大的球面反射镜和与之相对的凸面光栅构成。光谱仪整体体积为 135 mm \times 150 mm \times 40 mm。

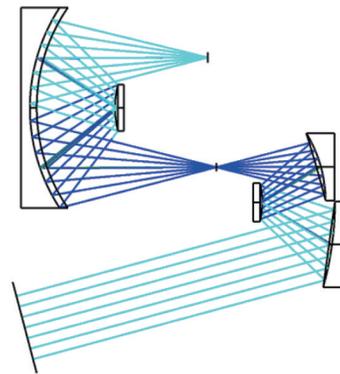


图 1 光谱仪光路图

Fig. 1 Light path diagram of spectrometer

图 2 和图 3 分别给出了光谱仪的调制传递函数(MTF)曲线和点列图。从图 2 可以看出,光谱仪各个视场的 MTF 曲线均接近衍射极限。从图 3 可以看出,所有光斑均在艾里斑以内,系统整体性能较好。

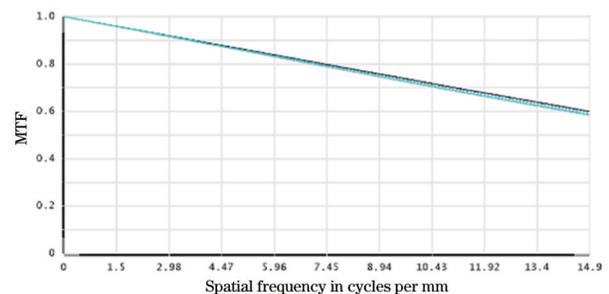


图 2 光谱仪的 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curve of spectrometer

在系统前安装的 Stavroudis 遮光罩能够抑制视场外部的红外辐射,它是一种椭圆与双曲面交替相交的全反射结构遮光罩,具有结构稳定、抑制视场外杂光能力强和自身辐射通量小的优势^[10]。整体的光机结构如图 4 所示。

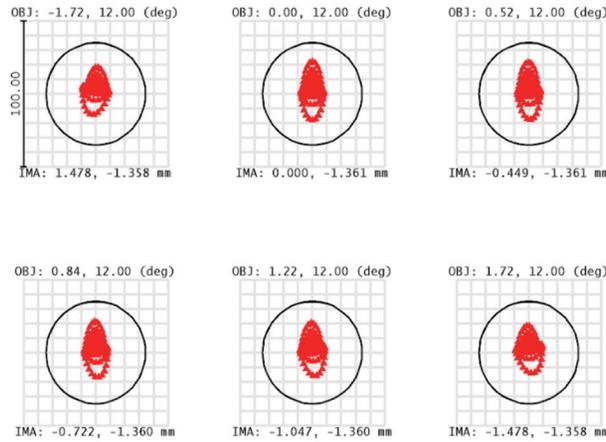


图 3 光谱仪点列图

Fig. 3 Spot diagram of spectrometer

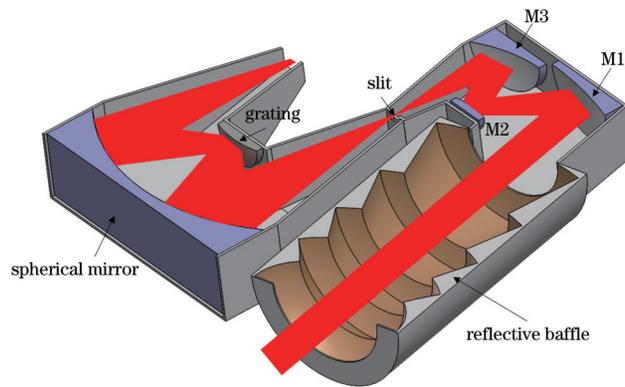


图 4 光机结构模型

Fig. 4 Structural model of optical machine

3 杂散辐射噪声分析与抑制

NETD 是评价热红外成像光谱仪灵敏度的常用方法,也是量化系统区分目标温度变化或目标与背景

温差能力的指标。为研究非制冷热红外成像光谱仪的噪声,需要推导其与 NETD 的关系。

红外焦平面阵列通过吸收入射辐射升温来产生信号,其工作原理如图 5 所示。

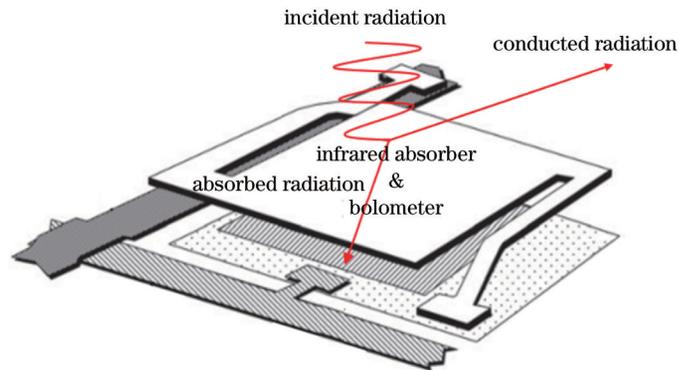


图 5 红外焦平面阵列工作原理

Fig. 5 Working principle of infrared focal plane array

热平衡方程为

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G(\Delta T) = \epsilon \beta Q_0 e^{j\omega t}, \quad (1)$$

式中: C 为焦平面阵列吸收辐射材料的热容; G 为热

导; ϵ 为吸收系数; β 为焦平面阵列像元填充数; ω 为红外辐射调制频率; t 为任意时刻; Q_0 为入射辐射; ΔT 为探测器温度变化的大小,其表达式^[11]为

$$\Delta T = \frac{\epsilon\beta Q_0 e^{i\omega t}}{G\sqrt{(1+\omega^2\tau^2)}}, \quad (2)$$

式中: τ 为热时间常数。若此时偏置电压为 U_{bias} , 则探测器的输出信号为

$$\Delta V = \frac{U_{\text{bias}}\alpha\epsilon\beta Q_0 e^{i\omega t}}{G\sqrt{(1+\omega^2\tau^2)}}, \quad (3)$$

式中: α 是电阻温度系数。响应率定义为单位辐射通量入射到焦平面阵列上产生的信号大小, 其表达式为

$$R_x = \frac{\Delta V}{Q} = \frac{U_{\text{bias}}\alpha\epsilon\beta}{G\sqrt{(1+\omega^2\tau^2)}}. \quad (4)$$

NETD (M_{NETD}) 的定义为当探测器的输出信号等于噪声时, 目标辐射源的温度变化, 则有

$$M_{\text{NETD}} = \frac{4F^2 V_n}{R_x A \tau_0 (\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}}, \quad (5)$$

式中: F 为光谱仪的 F 数; A 为探测器像元面积; τ_0 为系统透过率; $(\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}$ 为工作波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的温度对比度; V_n 是探测器噪声电压。检测输出的总噪声电压可分为探测器噪声电压与背景杂散辐射噪声电压 V_{back} , 具体可表示为

$$V_{\text{total}} = \sqrt{V_n^2 + V_{\text{back}}^2}. \quad (6)$$

表 2 非制冷红外焦平面阵列参数^[13]

Table 2 Parameters of uncooled infrared focal plane array^[13]

Parameter	Value	Parameter	Value
Image array size ($x_c \times x_l$)	384 × 288	Thermal capacity C	4.34×10^{-10}
Pixel area A / m^2	6.25×10^{-10}	Thermal conduction $G / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1})$	5×10^{-8}
Pixel fill factor β	0.7	Temperature contrast $\frac{\Delta P}{\Delta T} / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	2.426
Bias voltage $U_{\text{bias}} / \text{V}$	2	Boltzmann constant $k / (\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	1×10^{-23}
Image read-out frequency f_i / Hz	50	Absorption in wavelength range of 7–14 μm	0.90
Transmission of system in wavelength range of 7–14 μm ϕ_{7-14}	0.7	Uniformity correction frequency f_s / Hz	1.66×10^{-2}
1/f noise constant K / m^3	4.0×10^{-29}	Resistance R / Ω	2.6×10^4
Volume of vanadium oxide material ν / m^3	3.5×10^{-17}	Temperature coefficient of resistance α	0.02
Total noise voltage of ROIC $V_{\text{ROIC}} / \text{V}$	1.4×10^{-6}	Infrared modulation frequency ω / Hz	30
Bolometer temperature T / K	300	Input referred noise voltage of ROIC $V_{\text{amp}} / \text{V}$	0.8×10^{-6}
Noise voltage of each analogue-to-digital converter $V_{\text{ADC}} / \text{V}$	5.7×10^{-7}	Current noise from ROIC input including bolometer bias current source $I_{\text{ROIC}} / \text{A}$	8.0×10^{-11}

根据式(5)、式(11)和表2, 给出了该红外焦平面阵列探测器的NETD随红外系统 F 数变化的曲线, 如图6所示。可以发现, 系统 F 数越小, 焦平面阵列NETD越小。当 F 数为2时, 焦平面阵列NETD约为248 mK, 远小于350 K的探测目标温度。

3.2 背景杂散辐射噪声

背景杂散辐射是热红外成像光谱仪内部最大的噪声源, 主要包括杂散光噪声、光机自身热辐射噪声和光

3.1 探测器噪声

非制冷热红外焦平面阵列的探测器噪声主要有4种, 分别是1/f噪声、约翰孙噪声、热涨幅噪声和读出电路(ROIC)噪声。它们的噪声电压表达式^[12]分别为

$$V_{1/f} = R \cdot I_{\text{bias}} \cdot \sqrt{\frac{K}{\nu}} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{x_1 \cdot f_i}{f_s}\right)}, \quad (7)$$

$$V_{\text{Johnson}} = 2\sqrt{k} \cdot \sqrt{T \cdot R \cdot x_1 \cdot f_i}, \quad (8)$$

$$V_{\text{thermal}} = 2\sqrt{k} \cdot \frac{R_x T \sqrt{G \cdot f}}{\beta \cdot \epsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}}, \quad (9)$$

$$V_{\text{ROIC}} = \sqrt{V_{\text{amp}}^2 + V_{\text{ADC}}^2 + R^2 \cdot I_{\text{ROIC}}^2}, \quad (10)$$

式中: R 为电阻; I_{bias} 为偏置电流; K 为1/f噪声常数; ν 为氧化钒材料的体积; f_i 为图像读出频率; f_s 为均匀性校正频率; k 为玻尔兹曼常量; T 为工作温度; x_1 为探测器像元列数; f 为焦平面阵列有效读出频率, $f=1/(4\tau)$; $\epsilon_{\lambda_1 - \lambda_2}$ 为探测器吸收系数; V_{amp} 为读出电路输入噪声电压; V_{ADC} 为每个模数转换器的噪声电压; I_{ROIC} 为读出电路输入的电流。此时, 探测器噪声电压可表示为

$$V_n = \sqrt{V_{1/f}^2 + V_{\text{Johnson}}^2 + V_{\text{thermal}}^2 + V_{\text{ROIC}}^2}. \quad (11)$$

氧化钒非制冷焦平面阵列参数的物理含义与参数值由表2给出^[13]。

栅非工作级次衍射产生的噪声。

为得到准确的杂散辐射噪声, 本文使用Lighttools软件分析三种处理方式下系统内部辐射噪声、光机元件表面散射引起的杂光噪声和光栅非工作级次产生的杂光噪声。表3给出了三种机械表面处理时系统各元件的光学属性和光学元件的温度, 图7给出了光谱仪光栅的各级次衍射效率曲线, 用以分析光栅次级衍射的影响。

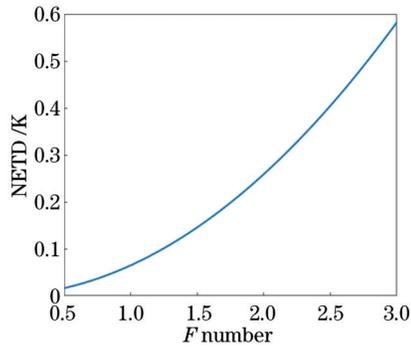
图 6 红外焦平面阵列 NETD 随系统 F 数的变化Fig. 6 NETD of infrared focal plane array varying with F number of system

表 4 给出了表面涂黑漆、表面镀黑镍和表面抛亮

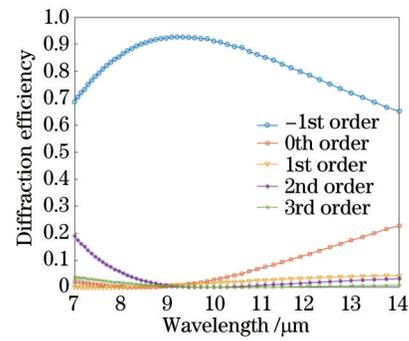


图 7 光栅衍射效率

Fig. 7 Diffraction efficiency of grating

三种情况下到达像面的杂散辐射的辐照度仿真分析结果。

表 3 系统元件的光学属性

Table 3 Optical properties of system components

Component		Treatment method		
		Brighten surface	Blacken surface	Surface with black nickel
Baffle (300 K)	Vanes	Reflectivity: 0.98, absorptivity: 0.01, scattering rate: 0.01		
	M1			
	M2	Reflectivity: 0.95, absorptivity: 0.03, scattering rate: 0.02		
	M3			
Foreoptics (300 K)	Mechanical wall	Reflectivity: 0.94, absorptivity: 0.05, scattering rate: 0.01	Reflectivity: 0.05, absorptivity: 0.90, scattering rate: 0.05	Reflectivity: 0.40, absorptivity: 0.20, scattering rate: 0.40
	Slit (193 K)	Reflectivity: 0.05, absorptivity: 0.90, scattering: 0.05		
Spectrometer (300 K)	Spherical mirror	Reflectivity: 0.95, absorptivity: 0.03, scattering rate: 0.02		
	Convex grating	Reflectivity: 0.90, absorptivity: 0.10 (order: 1, grating constant: 0.74 mm)		
	Mechanical wall	Absorptivity: 0.05, reflectivity: 0.94, scattering rate: 0.01	Absorptivity: 0.90, reflectivity: 0.05, scattering rate: 0.05	Absorptivity: 0.20, reflectivity: 0.40, scattering rate: 0.40

表 4 杂散辐射分析结果

Table 4 Analysis result of stray radiation

Stray light source	Stray radiation of blacken surface $/(W \cdot mm^{-2})$	Stray radiation of surface with black nickel $/(W \cdot mm^{-2})$	Stray radiation of polished surface $/(W \cdot mm^{-2})$
Foreoptics	3.930×10^{-9}	5.330×10^{-10}	9.362×10^{-9}
Slit	7.940×10^{-7}	1.570×10^{-6}	4.370×10^{-6}
Spectrometer	1.710×10^{-4}	1.290×10^{-4}	5.910×10^{-5}
Grating	7.820×10^{-7}	2.830×10^{-6}	1.160×10^{-5}

从表 4 的分析结果中可以看出:由于系统中间存在着狭缝,故内部辐射的主要来源是分光系统表面;采用抛亮处理后的系统杂散辐射要小于其他两种处理方法。表面涂黑漆处理后的系统总杂散辐射照度为 $1.73 \times 10^{-4} W/mm^2$,其中辐射量贡献最大的部分是分光系统,占比为 98.36%;表面抛亮处理后的系统总杂散热辐射照度为 $7.52 \times 10^{-5} W/mm^2$,较表面涂黑漆处理后的总杂散辐射量减少了 57%。根据式(3)和式

(6),可以得到总 NETD 随系统 F 数变化的曲线,如图 8 所示。当 F 数为 2 时,总 NETD 约为 4.5 K,是探测目标温度的 1/70。

3.3 背景噪声扣除

采用表面抛亮处理的光学系统能够抑制内部的杂散辐射,但像面残留的杂散辐射仍会影响探测器的检测灵敏度。目前,很多热红外遥感器采用快门时间插值法去除像面上的背景噪声,这种方式需要通过开关

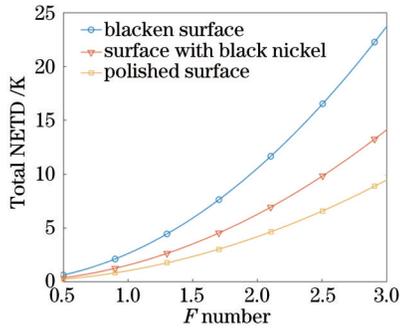


图 8 总 NETD 随系统 F 数的变化

Fig. 8 Total NETD varying with F number of system

快门来实时提取系统背景辐射噪声并进行扣除,但这会造成推扫时获取的光谱仪图像不连续。为此,本文采用像元线性回归模型来建立非场景信号与场景信号的关系^[14]。将探测器表面分为场景区与参考区,具体的分区如图 9 所示。设探测器有 N 行 M 列个像元,若参考区域有 R 个像元,则场景区域有 $MN-R$ 个像元。

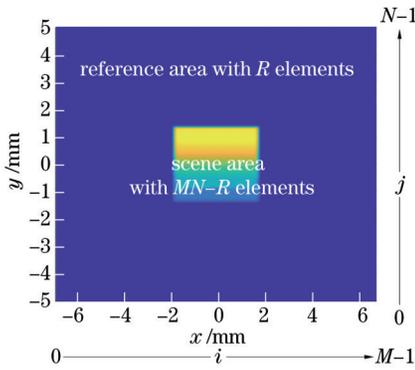


图 9 像面分区

Fig. 9 Partition of image plane

在任意时刻 t 处,第 j 行 i 列的像元信号可以表示为

$$S_{i,j,t} = s_{i,j}^{(0)} + S_{i,j,t}^H + S_{i,j,t}^S, \quad (12)$$

式中: $s_{i,j}^{(0)}$ 为本底噪声信号; $S_{i,j,t}^H$ 为由背景辐射产生的噪声信号; $S_{i,j,t}^S$ 为由探测目标辐射产生的信号。若仪

器工作环境稳定,背景噪声产生的辐射通量几乎不变,则

$$\frac{S_{i,j,t} - s_{i,j}^{(0)} - S_{i,j,t}^S}{s_{i,j}^{(1)}} = \phi_t^H = \frac{S_{m,n,t} - s_{m,n}^{(0)} - S_{m,n,t}^S}{s_{m,n}^{(1)}}, \quad (13)$$

式中: $S_{i,j,t}$ 为任意时刻 t 处第 j 行 i 列的非场景区域像元的信号; $S_{m,n,t}$ 为任意时刻 t 处第 j 行 i 列的场景区域像元信号; $S_{m,n,t}^S$ 为由该像元由探测目标辐射产生的信号; $s_{i,j}^{(1)}$ 和 $s_{m,n}^{(1)}$ 为两个区域像元对辐射通量的灵敏度;由于非场景区域中没有探测目标,即 $S_{i,j,t}^S=0$,故式(13)可以变为

$$\begin{cases} S_{m,n,t} - S_{m,n,t}^S = c_{i,j,m,n} + d_{i,j,m,n}(S_{i,j,t}) \\ c_{i,j,m,n} = -s_{i,j}^{(0)} \frac{s_{m,n}^{(1)}}{s_{i,j}^{(1)}} + s_{m,n}^{(0)} \\ d_{i,j,m,n} = \frac{s_{m,n}^{(1)}}{s_{i,j}^{(1)}} \end{cases}, \quad (14)$$

$c_{i,j,m,n}$ 和 $d_{i,j,m,n}$ 可以通过多张没有场景分量的图像线性回归获得。使用像元线性回归法不必确定场景区域内的绝对辐射通量大小,通过像元间的线性关系即可得到场景区域内的背景辐射噪声,易于应用。场景信号 $S_{m,n,t}^S$ 可由最小二乘法计算得到,即

$$\begin{cases} J(\{S_{m,n,t}^S\}_{m \times n}) = \sum_{m,n} \sum_{i,j} (S_{m,n,t} - S_{m,n,t}^S - d_{i,j,m,n} S_{i,j,t})^2 \\ \frac{\partial J}{\partial S_{m,n,t}^S} = 0 \Rightarrow S_{m,n,t}^S \approx S_{m,n,t} - \frac{1}{R} \sum_{i,j} (c_{i,j,m,n} + d_{i,j,m,n} S_{i,j,t}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\{S_{m,n,t}^S\}_{m \times n}$ 表示 $m \times n$ 个像元信号的集合。

模拟了在 300 K 工作温度下,系统对温度为 350 K 的目标成像的结果,如图 10(a)所示。非场景区域的平均辐照度值为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^2$,场景区域的平均辐照度值为 $1.8 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^2$,两者处于同一个量级。图 10(b)给出了采用像元线性关系法去除背景辐射后的像面辐照度结果,此时场景区域的平均辐照度值为 $6.8 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^2$,与图 10(c)所示的无背景辐射的平均辐照度值 ($7.4 \times 10^{-4} \text{ W/mm}^2$) 十分相近。非场景区域的平均辐照度值为 $7.5 \times 10^{-8} \text{ W/mm}^2$,表明背景噪声已基本扣除。

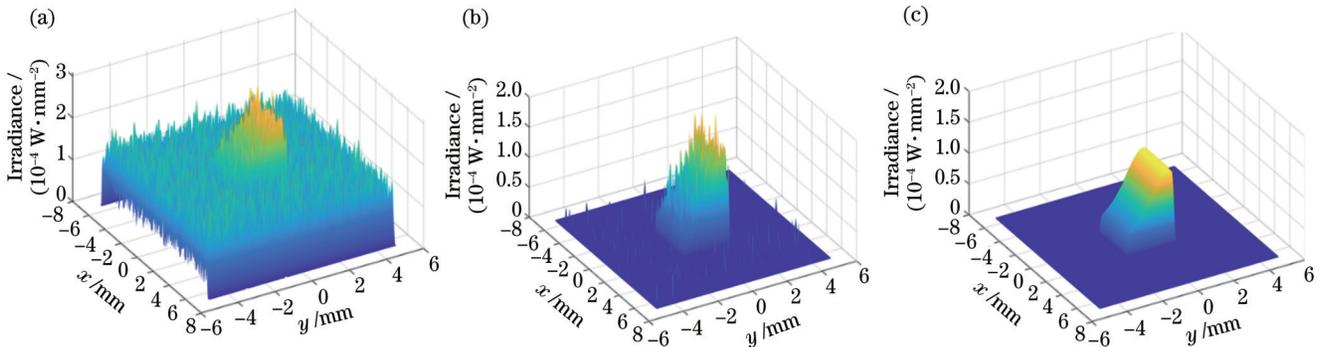


图 10 像元线性关系法去噪的仿真结果。(a)目标被淹没时的像面;(b)算法去噪后的像面;(c)理想像面

Fig. 10 Simulation results of using linear relationship between pixels to remove noise. (a) Image plane when signal is submerged; (b) image plane after denoising by algorithm; (c) ideal image plane

4 结 论

研究了非制冷热红外成像光谱仪的主要杂散辐射来源,推导了红外系统的 NETD 与三种主要杂散噪声的关系式。由软件仿真分析结果可知,相比表面涂黑漆和镀黑镍的处理方法,内壁抛光处理能更好地抑制内部杂散辐射,其分析结果约为其他两种处理方法的 50%。通过计算得到分别采用三种表面处理方法的系统 NETD 随 F 数的变化曲线。当 F 数为 2 时,内壁抛光的系统的 NETD 约为 4.5 K。最后,采用像元线性关系法扣除剩余的背景杂散辐射,使探测信号与目标本身信号基本一致。

参 考 文 献

- [1] Schwartz J R, Kocjan J, Driscoll D. Mid-wave/long-wave infrared dual-octave hyperspectral imaging spectrometer[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, March 8-15, 2003, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2003: 1831-1841.
- [2] Kuenzer C, Dech S. Thermal infrared remote sensing: sensors, methods, applications[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(5): 359-360.
- [3] Duthil P, Vidal A, Dubet D. Medium-scale surface temperature instrument: MUST[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3222: 512-523.
- [4] Fukuhara T, Taguchi M, Imamura T, et al. LIR: Longwave Infrared Camera onboard the Venus orbiter Akatsuki[J]. Earth, Planets and Space, 2011, 63(9): 1009-1018.
- [5] Warren D W, Boucher R H, Gutierrez D J, et al. MAKO: a high-performance, airborne imaging spectrometer for the long-wave infrared[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7812: 202-211.
- [6] Walter I, Zeh T, Helbert J, et al. Deep space instrument design for thermal infrared imaging with MERTIS[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8154: 81540Y.
- [7] Glaze L S, Wilson C F, Zasova L V, et al. Future of Venus research and exploration[J]. Space Science Reviews, 2018, 214(5): 1-37.
- [8] 朱嘉诚, 陆伟奇, 赵知诚, 等. 静止轨道中波红外成像光谱仪分光成像系统[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1122001.
Zhu J C, Lu W Q, Zhao Z C, et al. Spectroscopic imaging system in mid-wave infrared imaging spectrometer on geostationary orbit[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1122001.
- [9] 杨福臻, 陈新华, 赵知诚, 等. 面向小行星探测的可见-红外光谱成像光学系统[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0722002.
Yang F Z, Chen X H, Zhao Z C, et al. Visible-infrared imaging spectrometer for the exploration of asteroids[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0722002.
- [10] Beck T, Lüthi B S, Messina G, et al. Thermal analysis of a reflective baffle designed for space applications[J]. Acta Astronautica, 2011, 69(5/6): 323-334.
- [11] Kruse P W. Uncooled thermal imaging arrays, systems, and applications[M]. Bellingham: SPIE, 2001.
- [12] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Zhou S C. Introduction to advanced infrared optoelectronic engineering[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [13] Niklaus F, Decharat A, Jansson C, et al. Performance model for uncooled infrared bolometer arrays and performance predictions of bolometers operating at atmospheric pressure[J]. Infrared Physics & Technology, 2008, 51(3): 168-177.
- [14] Säuberlich T, Paproth C, Helbert J. MERTIS: shutterless background signal removal[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7808: 78080L.