

侧摆扩视场型星载干涉光谱成像仪杂散光抑制研究

张智南^{1,2}, 李立波^{1*}, 邹纯博¹, 郝雄波¹, 孙剑^{1,2}, 刘学斌¹, 王鹏冲¹, 刘杰^{1,2}¹中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 侧摆扩视场型干涉光谱成像仪通过在光学系统前增加侧摆反射镜来实现视场扩展的功能,然而增加侧摆反射镜会使得不同视场不同通道的光线交错分布,无法使用传统消杂光设计,给杂散光抑制带来困难。针对此类型光学系统提出了一个消杂光设计方法。当侧摆反射镜位于 0° 、 15° 、 -15° 视场位置时,对可见近红外系统和短波红外系统进行了点源透过率(PST)仿真分析。分析结果表明,对于所有侧摆反射镜位置,在视场外 0.5° 位置处空间视场方向和光谱视场方向的方向的PST可降低至 10^{-3} 。基于观测模式,对高光谱成像仪在轨工作时的信号源与杂光源进行分析。基于PST仿真结果,对杂光源在焦平面处产生的杂光能量进行研究,并分析了高光谱成像仪的信杂比,侧摆反射镜位于 0° 视场位置时可见近红外系统的信杂比为 0.1% ,短波红外系统的信杂比为 0.6% 。结果表明,所提的杂散光抑制措施有效,满足星载高光谱仪对杂散光的技术要求。

关键词 散射; 杂散光分析; 点源透过率; 信杂比; 干涉光谱成像仪

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1029001

Stray Light Suppression in Sweep Mirror Field-Widened Space-Borne Fourier Transform Imaging Spectrometer

Zhang Zhinan^{1,2}, Li Libo^{1*}, Zou Chunbo¹, Hao Xiongbo¹, Sun Jian^{1,2},Liu Xuebin¹, Wang Pengchong¹, Liu Jie^{1,2}¹Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xian's Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The field widening of a sweep mirror field-widened Fourier transform imaging spectrometer is achieved by adding a sweep mirror before its optical system. However, the addition of the sweep mirror causes the cross distribution of rays from different fields and different channels, which presents a difficulty in the suppression of stray light, and thus the traditional stray light suppression design is no longer valid. To solve this problem, a new design of stray light suppression is proposed. Based on the stray light suppression design, the point source transmittance (PST) stimulation and analysis of the visible and near-infrared optical system and the shortwave infrared optical system is presented for the sweep mirror at different field of view locations of 0° , 15° , and -15° . The analysis results show that as for all sweep mirror locations, the PST along the spatial direction and spectral direction at 0.5° off-field angle can be reduced to 10^{-3} . Based on the observation mode, the signal source and stray light source of the on-orbit imaging spectrometer are analyzed. In addition, based on the PST stimulation results, the stray light irradiance at the focal plane is studied and the signal-to-stray ratio is calculated. It shows that the signal-to-stray ratio of the visible and near-infrared optical system is 0.1% and that of the shortwave infrared optical system is 0.6% . The results indicate that the proposed stray light suppression method is effective and can meet the requirement of the space-borne imaging spectrometer.

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2020-11-24; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(61905275)、陕西省重点研发计划(2020SF-284)、航空科学基金(201701M9001)

* E-mail: lilibo@opt.ac.cn

Key words scattering; stray light analysis; point source transmittance; signal-to-stray ratio; Fourier imaging interferometer

OCIS codes 290.2648; 220.3620; 280.4788

1 引言

干涉光谱成像技术具有高通量^[1]、多通道的优势^[2],在环境减灾、水体监测、农业矿业资源勘探等领域有着广泛的应用^[3],该技术也被应用在环境减灾二号卫星上。该卫星上搭载了一台基于时空联合调制干涉光谱成像原理的高光谱成像仪,光谱范围覆盖可见光-近红外至短波红外(0.45~2.5 μm)波段。该高光谱成像仪将在全球目标区获取高光谱影像数据,以支持我国环境监测、防灾减灾等工作,同时为多个领域提供卫星数据资源支撑和业务化应用服务。

受限于航天探测器的阵列尺寸,干涉光谱仪的幅宽与地元分辨率存在相互制约的关系,为了同时获得较高的地元分辨率与较大的幅宽,可以在光学系统前增加摆扫反射镜,通过反射镜的侧摆实现视场扩展的功能。为了获得较大的幅宽,环境减灾二号卫星的高光谱成像仪在光学系统前设置了侧摆反射镜,但是这也给高光谱成像仪带来杂散光问题。

杂散光是被探测器接收的非成像光束^[4],它会降低光学系统成像的对比度和调制传递函数,使得干涉光谱成像仪的信噪比降低^[5]。通常情况下通过在光学系统的入口前设置紧贴着视场边缘的遮光罩来抑制杂光。但当在光学系统前增加扩视场的摆扫反射镜时,对于不同的摆镜位置,对应的光学系统视场边缘的空间位置也不同,无法采用此种方法抑制杂光。因此需要对侧摆扩视场型星载干涉光谱成像仪进行研究。

本文针对环境减灾二号卫星的高光谱成像仪进行了杂散光抑制研究,研究了杂光来源并针对一次杂光及一次散射杂光进行了消杂光设计。基于消杂光设计,当侧摆反射镜位于不同视场位置时,对可见近红外(VNIR)系统和短波红外(SWIR)系统进行了点源透过率(PST)仿真分析。基于观测模式,对高光谱成像仪在轨工作时的信号源与杂光源进行了分析。基于 PST 仿真结果,对探测器像面处的杂光能量进行了计算,并分析了高光谱成像仪的信杂比。

2 光学系统

环境减灾二号卫星高光谱成像仪的光学系统由

三部分组成:可见近红外光学系统、短波红外光学系统以及 V 型侧摆反射镜。来自地面的成像光线通过 V 型侧摆反射镜分别进入可见近红外光学系统和短波红外光学系统,同时 V 型侧摆反射镜可以在高光谱成像仪的空间视场方向进行扫描,以实现 ±30° 的视场扩展。可见近红外光学系统和短波红外光学系统采用基于 Sagnac 干涉仪的时空联合调制干涉光谱成像技术^[6],其均由 Sagnac 干涉仪和傅氏镜组成。成像光线通过 V 型侧摆反射镜进入可见近红外光学系统和短波红外光学系统后,在探测器像面得到目标的干涉图,通过对干涉图进行校正和反演即可得到目标的光谱数据。高光谱成像仪的光学系统如图 1 所示。

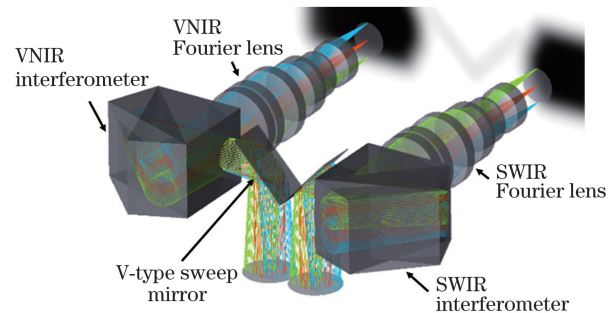


图 1 高光谱成像仪的光学系统

Fig. 1 Optical system of imaging spectrometer

3 杂散光抑制研究

为了降低探测器接收到的杂散光能量,需要对杂散光的抑制进行研究,使得来自轴外的杂散光线至少经过两次散射才能入射到探测器中^[7],从而抑制杂散辐射,提高高光谱成像仪的信噪比。

3.1 一次杂光的抑制

视场外的非成像光线可直接射入光学系统或是经过侧摆反射镜反射后进入光学系统,这会造成严重的杂散光问题,给成像带来严重的背景噪声。这类杂散光被称为一次杂光^[8],即不经过任何散射直接到达像面的光线,其是需要重点抑制的杂光类型。

遮光罩主要是用来抑制直接照射光学系统的具有大离轴角的一次杂散光线,遮光罩越长,能够直接照射到光学系统的光线的离轴角就越小^[5]。为了尽可能抑制视场外杂散光,遮光罩设计时应尽量长。但是由于空间和重量的限制,遮光罩不可

能很长,因此需要根据光学系统外可能的杂散光源和光学系统本身对杂散光抑制的要求设计遮光罩的尺寸。

高光谱成像仪的入射光线视场如图 2 所示,可见近红外光学系统和短波红外光学系统均使用 V 型侧摆反射镜引入成像光线,且侧摆反射镜可进行 $\pm 15^\circ$ 的旋转以实现视场扩展的功能,因此不同视场

不同通道的入射光线交错分布,无法利用传统杂光抑制方法在紧贴视场处设置遮光罩。为了不遮挡不同视场不同通道的成像光线,遮光罩的几何形状只能由侧摆反射镜位于 -15° 视场位置时(简称 -15° 侧摆反射镜)的可见近红外边缘视场和侧摆反射镜位于 15° 视场位置时(简称 15° 侧摆反射镜)的短波红外边缘视场确定。

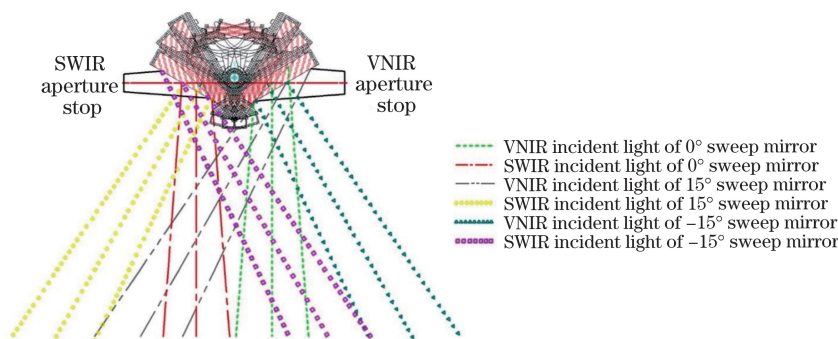


图 2 摆镜不同位置处高光谱成像仪的入射光线视场

Fig. 2 Incident field of view of imaging spectrometer at different sweep mirror locations

成像光线经过摆镜后进入可见近红外和短波红外光学系统的 Sagnac 干涉仪。经过干涉仪剪切后,光线旋转 90° ,入射至傅氏镜。为了抑制一次杂光,应使得经过遮光罩后射入入瞳位置的一次杂光经过干涉仪后无法进入傅氏镜成像。Sagnac 干涉仪在光学系统中可等效为光学平板,因此遮光罩的几何长度由干涉仪的等效模型和孔径光阑决定。遮光罩的设计要求如下:1)射入干涉仪并直接射入傅氏镜的杂散光需被遮光罩拦截;2)射入干涉仪并经过干涉仪上表面(非通光面)发生一次散射后射入傅氏镜的杂散光需被遮光罩拦截;3)对于射入干涉仪并经过干涉仪上、下表面(非通光面)发生两次散射后的杂散光线,由于能量已衰减至 10^{-4} 数量级,故此部分杂光影响微弱,可射入傅氏镜。

根据此设计要求以及干涉仪和傅氏镜的光机模

型,可计算出杂散光射入干涉仪并经过干涉仪上、下表面发生两次散射的临界角度为 35.3° 。依据此临界角度及 -15° 侧摆反射镜的可见近红外边缘视场、 15° 侧摆反射镜的短波红外边缘视场以及边缘视场光线沿光轴到孔径光阑的距离,利用正弦定理可计算出光轴到遮光罩末端的长度为 400 mm 。由于要避免让摆镜机构以及摆镜的旋转轨迹,因此遮光罩上表面到光轴需留出 80 mm 的空间,故最终确定遮光罩的长度为 320 mm 。遮光罩为两段式设计,上部较下部在光谱视场方向上的尺寸更大,以避免摆镜的旋转轨迹,遮光罩尺寸如图 3 所示。由于遮光罩的几何形状由 -15° 侧摆反射镜的可见近红外边缘视场和 15° 侧摆反射镜的短波红外边缘视场确定,因此遮光罩只对这两个摆镜位置的单一通道有比较强的杂光抑制能力,为了增加对其他视场一次杂光

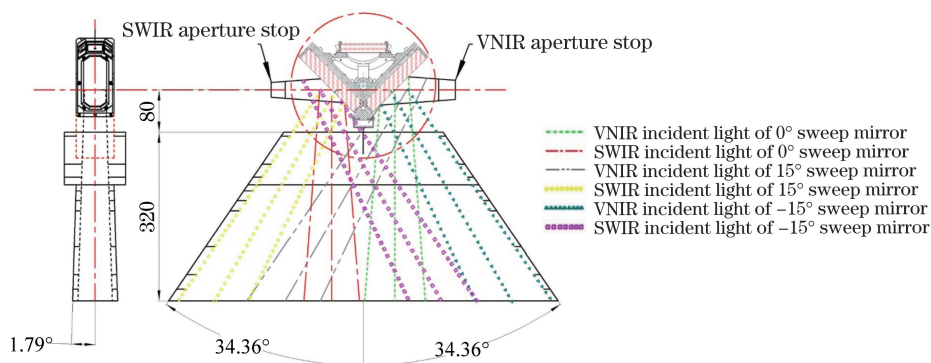


图 3 遮光罩的设计示意图

Fig. 3 Design schematic of outer baffle

的抑制能力, 还需增加其他抑制措施。

在侧摆反射镜镜座下方增加挡光板以增大一次杂光的抑制能力, 挡光板的长度可通过作图法给出。如图 4 所示, 通过孔径光阑与光学窗口的上下边缘, 可以确定挡光板的长度, 此时挡光板可以拦截直接射入孔径光阑的一次杂光与经过遮光罩散射射入孔径光阑的一次散射杂光, 但此时挡光板的长度太长,

由于不同摆镜位置不同通道的成像光线分布密集, 在摆镜旋转的情况下, 挡光板会遮挡一部分成像光线, 因此挡光板的长度需由孔径光阑的边缘与遮光罩长度确定, 此时挡光板不拦截成像光线, 长度为 50 mm, 可以抑制大部分直接射入孔径光阑的一次杂光, 并且完全拦截经过遮光罩散射射入孔径光阑的一次散射杂光。

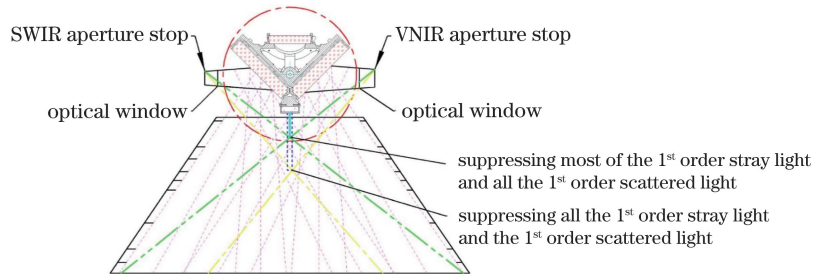


图 4 摆镜挡光板的设计示意图

Fig. 4 Design schematic of sweep mirror barrier

3.2 一次散射杂光的抑制

一次散射杂光是视场外杂光入射到光学系统后, 经过一次散射之后被探测器接收的杂光, 需要对其进行抑制^[9]。本系统中视场外杂光的一次散射路径主要有两个: 杂散光经过遮光罩散射后经摆镜反射射入光瞳; 杂散光经过遮光罩散射后直接射入光瞳位置。通过增加摆镜挡光板, 可以完全拦截经过遮光罩散射后直接射入光瞳位置的一次散射杂光, 故还需对经过遮光罩散射后经摆镜反射射入光瞳位置的一次散射杂光的抑制进行研究。

通过在遮光结构的遮光罩内壁上设置挡光环结构, 能够更加有效地抑制一次散射杂光^[10], 入射到遮光罩内壁的杂散光至少需要经两次散射才能进入光学系统^[11]。当增加挡光环设计之后, 遮光罩相对于像面或后续散射表面的几何构成因子(CGF)减小, 当大离轴角光线照射到遮光罩内时, 光线在相邻的两个挡光环之间的空间内发生多次反射和散射, 杂散光的出射能量降低, 因此挡光环的设计对一次散射杂光的抑制有着重要作用。

挡光环的设计可以通过程序计算或者采用作图法给出。根据遮光罩的几何尺寸可知, 挡光环的位置与尺寸由 -15° 侧摆反射镜的可见近红外边缘视场、 15° 侧摆反射镜的短波红外边缘视场以及可见近红外和短波红外光学系统的入瞳关于侧摆反射镜的镜像决定, 故根据作图法, 对空间视场方向和光谱视场方向的一次散射杂光进行挡光环设计, 最终遮光罩设置 10 个挡光环以抑制一次散射杂光, 挡光环的设计结果如图 5 所示。

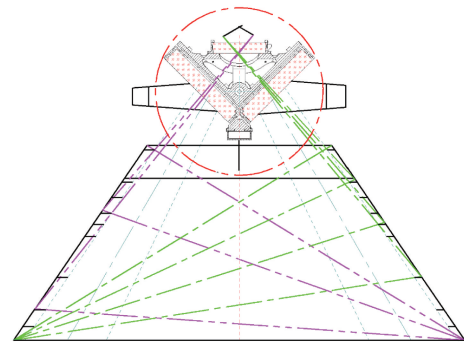


图 5 挡光环的设计

Fig. 5 Design of vanes

为了进一步抑制经过两次散射及以上的高次散射杂光, 对光学元件的非通光面、结构元件进行染黑处理, 以增大吸收率, 减小镜像反射和散射, 使得经两次散射及以上的高次散射杂光的能量衰减至 10^{-4} 以内, 提升杂光抑制性能。

4 杂散光分析

4.1 杂散光抑制效果的评价

点源透过率(PST)表征光学系统对不同入射角度下杂散光线的抑制能力^[12], 是评价一个光学系统消杂散光能力的主要指标^[13]。点源透过率与杂散光源本身的辐射强度无关, 它定义为光学系统视场外离轴角为 θ 的光源经过光学系统后在像面上产生的辐照度 $E_d(\theta)$ 与光学系统入口处的辐射照度 $E_i(\theta)$ 的比值, 其数学表达式为

$$P_s = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)}, \quad (1)$$

式中: P_s 为点源透过率。PST 越小, 光学系统对杂散光的抑制能力就越强, 光学系统的信噪比就越好。

4.2 PST 分析结果

在 Tracepro 软件中建立高光谱成像仪的光机结构三维模型, 在不影响杂光分析结果的情况下进

行了适当的简化以减少表面数量, 在孔径光阑、摆镜反射镜位置处设置重点采样以增加有效计算、缩短计算时间, 并对模型进行材料及表面设置, 如表 1 所示, 高光谱成像仪的三维模型如图 6 所示, 其中 BRDF 为二向散射系数。

表 1 仿真模型中的表面特性设置

Table 1 Surface property setting in simulation model

No.	Surface type	Transmittance / %	Absorptance / %	Specular reflectivity / %	BRDF / %	Scatter model
1	Lens surface	97.97	1	1	0.13	Lambertian
2	Reflector surface	0	5	94.87	0.13	Lambertian
3	Interferometer beam splitter	45	10	45	0.13	Lambertian
4	Transmission surface of interferometer	97.97	1	1	0.13	Lambertian
5	Blackened non-working surface	0	90	0.001	9.999	Lambertian

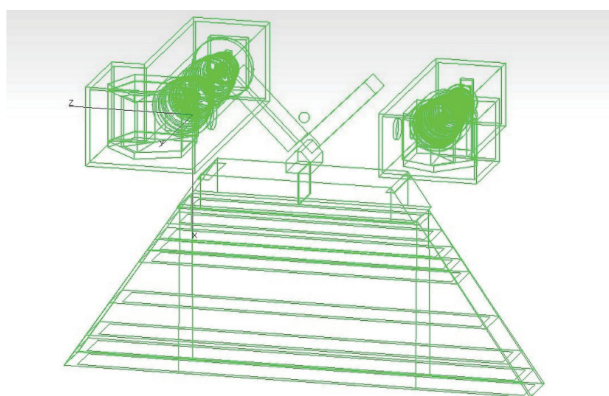


图 6 高光谱成像仪的三维模型

Fig. 6 3D model of imaging spectrometer

根据建立的光机系统的三维模型, 在 Tracepro 中设置不同视场的入射光, 使得入射光覆盖整个遮光罩的入口, 进而模拟分析像面照度及遮光罩入口处的照度。为了确保像面照度分析准确, 需要有足够多的光线到达探测器, 因此光源的光线数设置为 1500 万根, 且仿真的探测器接受能量归一化阈值设置为 10^{-6} , 即当光线能量衰减为 10^{-6} 时, 将不再对其进行追迹, 由于仿真模型中通光光学表面的散射率为 0.13%、染黑表面的散射率为 10%, 因此利用该阈值的设置, 对经过两次散射后的杂散光线进行追迹。而经过三次及以上散射的杂散光线, 由于能量已经很低, 因此不会给杂散光抑制带来影响。

当侧摆反射镜分别位于 0° 、 15° 、 -15° 位置时, 分析可见近红外和短波红外光学系统空间视场方向和光谱视场方向的像面照度和光学入口处照度, 共 237 个视场, 每个视场的像面照度仿真值与光学入口处照度仿真值的比值即为 PST 的计算结果。根据仿真结果绘制 PST 曲线, 可见近红外空间视场方

向的 PST 曲线如图 7 所示, 可见近红外光谱视场方向的 PST 曲线如图 8 所示, 短波红外空间视场方向的 PST 曲线如图 9 所示, 短波红外光谱视场方向的 PST 曲线如图 10 所示。

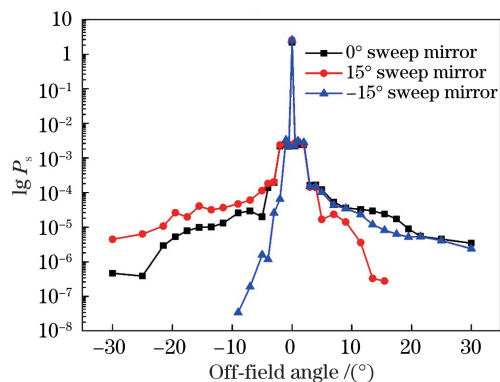


图 7 可见近红外空间视场方向的 PST 曲线

Fig. 7 PST curves along visible and near-infrared spatial direction

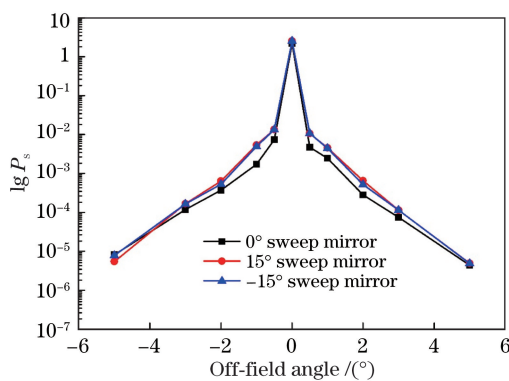


图 8 可见近红外光谱视场方向的 PST 曲线

Fig. 8 PST curves along visible and near-infrared spectral direction

由 PST 仿真结果可以看出, 本文提出的杂散光

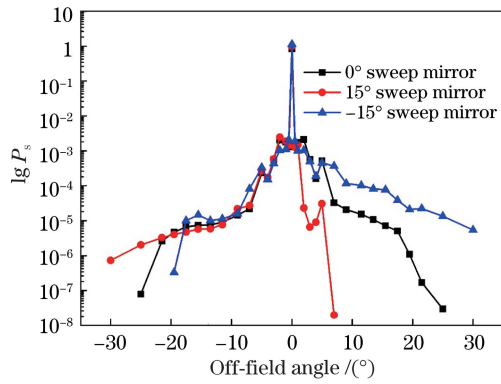


图 9 短波红外空间视场方向的 PST 曲线

Fig. 9 PST curves along shortwave infrared spatial direction

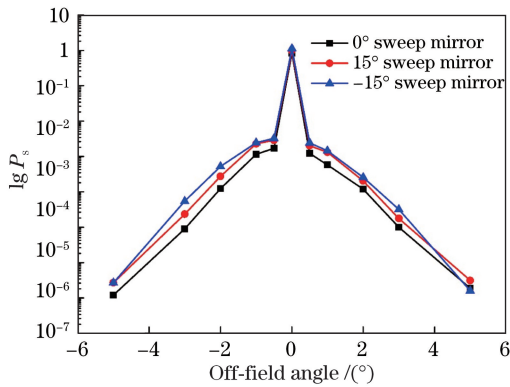


图 10 短波红外光谱视场方向的 PST 曲线

Fig. 10 PST curves along shortwave infrared spectral direction

抑制措施可以很好抑制杂光。对于 0°、15°、-15°侧摆反射镜,在视场外 0.5°位置处可见近红外与短波红外系统的 PST 均可降低到 10⁻³,对于视场外 7°的空间视场方向,PST 均可降低到 10⁻⁵。由于遮光罩紧贴 15°侧摆反射镜的短波红外边缘视场与-15°侧摆反射镜的可见近红外边缘视场,因此这两个位置处的 PST 下降极为迅速,视场外 3°位置处的 PST 可下降到 10⁻⁵,而对于其余 6 个视场,由于遮光罩边缘无法贴紧视场光线,因此杂光抑制能力有所降低。分析图 7 与图 9 的空间视场方向 PST 仿真曲线,其均与摆镜不同位置处高光谱成像仪的入射光线视场(图 2)表现出了相关性。由图 2 可以看出,当侧摆反射镜位于 0°位置时,遮光罩的左右边缘到两侧边缘视场的距离近似相同,因此 PST 曲线近似呈对称分布;而当侧摆反射镜位于±15°位置时,遮光罩的左右边缘到两侧边缘视场的距离出现差异,因此此时 PST 曲线不再表现出对称特性,距离遮光罩边缘更近的视场方向的杂光抑制能力更强,PST 曲线下降更快。

对于可见近红外与短波红外光学系统的光谱视

场方向,由 PST 仿真结果可以看出,短波红外光学系统的杂光抑制能力更强,在视场外 5°位置处可见近红外光学系统的 PST 可降至 10⁻⁶,在视场外 5°位置处短波红外光学系统的 PST 可降至 10⁻⁷。这是由于短波红外光学系统光谱视场方向的视场角是可见近红外光学系统的 2 倍,因此遮光罩在光谱视场方向的空间尺寸需紧贴短波红外视场边缘光线进行设置,进而表现出更强的短波红外抑制能力。

5 基于 PST 的杂散辐射能量分析

基于观测模式,对高光谱成像仪在轨工作时的信号源与杂光源进行分析。基于 PST 仿真结果,对杂光源在探测器像面处产生的杂光能量进行研究,并分析信号在探测器像面的能量,进而评价高光谱成像仪的杂光抑制能力。

5.1 信号源与杂光源分析

高光谱成像仪必须通过地球大气才能观察到目标,因此分析计算探测器所接收的信号的能量时必须综合考虑辐射源特性、大气的辐射传输特性、地面目标光学特性和遥感器光学系统的光谱透过率^[14]。在太阳辐射的光谱范围(0.45~2.5 μm)内,地物本身的热辐射可以忽略,可将地物简化为具有漫反射特性的朗伯体,在实际计算中由于大气辐射模型十分复杂,一般采用 MODTRAN 软件对其进行仿真。分别在 0.45~0.9 μm、0.9~2.5 μm 波段对反射率为 0.65、太阳高度角为 70°的大气模型进行仿真,得到信号源在高光谱成像仪入瞳位置处的平均光谱辐射亮度,即可见光近红外光学系统的平均光谱辐射亮度为 252.9 W·m⁻²·sr⁻¹·μm⁻¹,短波红外光学系统的平均光谱辐射亮度为 33 W·m⁻²·sr⁻¹·μm⁻¹。信号源在探测器处的辐射照度 E_{signal} 为

$$E_{\text{signal}} \cong \frac{\bar{L} \cdot \pi \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot \Delta\lambda}{4F^2}, \quad (2)$$

式中: \bar{L} 为大气辐射在仪器入瞳位置处的平均光谱辐射亮度; τ_{opt} 为光学系统的透过率; $\Delta\lambda$ 为光谱带宽; F 为光学系统的相对孔径的倒数。经过计算,可见近红外光学系统的信号源在探测器处的辐射照度为 2.59 W/m²,短波红外光学系统的信号源在探测器处的辐射照度为 0.22 W/m²。

高光谱成像仪的杂光主要来自地球反射太阳光的地气光辐射,不同地表和大气情况下地球的反射率有很大差别,简化分析可以认为地球是均匀散射的朗伯体,平均反射率为 0.35,则地球的平均辐出

度 E_e 为

$$E_e = \rho_s E_s, \quad (3)$$

式中: ρ_s 为地球地表反射率; E_s 为太阳在地球大气上的辐照度。太阳可看作是 5900 K 黑体, 在全空间内均匀辐射, 其可见近红外波段在地球大气外产生的辐照度为 797.01 W/m^2 , 短波红外波段在地球大气外产生的辐照度为 440.75 W/m^2 。因此, 可计算出可见近红外波段地气杂光辐射照度为 278.95 W/m^2 , 短波红外波段地气杂光辐射照度为 154.26 W/m^2 。

5.2 基于 PST 的杂散辐射能量计算

在高光谱成像仪对地观测时, 地球的地气光辐射只有一部分会被相机接收, 其形状为球冠, 球冠大小由卫星轨道高度决定, 如图 11 所示。

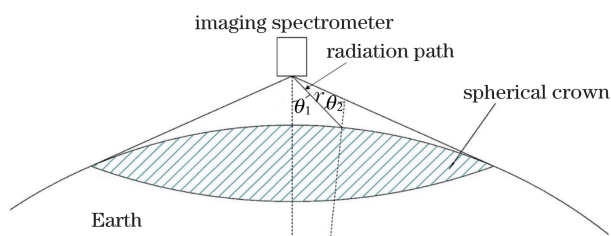


图 11 地气光辐射模型

Fig. 11 Radiation model of earth atmospheric light

球冠上一微元 dS 在高光谱成像仪入口处产生的

辐射照度 dE_m 为

$$dE_m = \frac{E_{s1} \cos \theta_1 \cos \theta_2 dS}{\pi r^2}, \quad (4)$$

式中: E_{s1} 为地球的地气光辐射出射度; θ_1 为球冠微元到仪器入口处的传输方向与光谱仪光轴的夹角; θ_2 为球冠微元的法线与传输方向的夹角; r 为球冠微元到仪器入口处的距离。则根据 PST 的定义式, 可计算出探测器像面上杂散辐射的辐射照度 dE_b 为

$$dE_b = P_s(\theta_1) \frac{E_{s1} \cos \theta_1 \cos \theta_2 dS}{\pi r^2}. \quad (5)$$

对整个球冠积分, 则探测器接收到的所有离轴角的杂散辐射照度为

$$E_b = \int P_s(\theta_1) \frac{E_{s1} \cos \theta_1 \cos \theta_2 dS}{\pi r^2}. \quad (6)$$

根据(6)式和 PST 的仿真结果, 通过在 Matlab 软件中编程计算, 对整个球冠进行积分, 计算出不同位置摆镜下可见近红外和短波红外光学系统的杂散光辐射照度, 并根据计算结果以及 5.1 节中计算的信号源在探测器处的辐射照度, 计算了不同位置摆镜下可见近红外和短波红外光学系统的信杂比, 计算结果如表 2 所示。

表 2 不同摆镜位置下杂光辐射照度与信杂比的计算结果

Table 2 Irradiance and signal-to-stray ratio at different sweep mirror locations

Parameter	0° sweep mirror		15° sweep mirror		-15° sweep mirror	
	VNIR	SWIR	VNIR	SWIR	VNIR	SWIR
Irradiance of stray light ($10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)	2.7	1.35	5.6	2.7	4.9	3.7
Signal-to-stray ratio / %	0.1	0.6	0.2	1.2	0.2	1.7

分析计算结果, 可以看出, 摆镜位于 0° 位置处时可见近红外与短波红外光学系统的信杂比均不到 1%, 摆镜位于 $\pm 15^\circ$ 位置处时可见近红外与短波红外光学系统的信杂比均不到 2%, 杂光得到很好抑制。由于大气的辐射传输特性, 大气在短波红外波段的透过率较可见近红外波段更低, 因此, 短波红外光学系统的信号源能量更低, 进而短波红外光学系统的信杂比高于可见近红外光学系统。而摆镜在不同角度下的信杂比差异来源于观测模式。由图 11 可知, θ_1 越小时, 杂光源的能量越大, 当摆镜位于 0° 位置处时, 光轴位置即为 $\theta_1 = 0$ 处, 当摆镜位于 $\pm 15^\circ$ 位置处时, 光轴位置为 $\theta_1 = \pm 30^\circ$ 处, 故当摆镜位于 $\pm 15^\circ$ 位置处时, 与摆镜位于 0° 位置处相比, $-30^\circ \leq \theta_1 \leq 30^\circ$ 区间内的杂光源产生的杂光能量更

大, 进而造成信杂比的差异。

6 结 论

对环境减灾二号卫星的侧摆扩视场型干涉光谱成像仪进行了杂散光抑制研究。对于此类型的光学系统, 提出了针对一次杂光与一次散射杂光的消杂光设计, 包括遮光罩、侧摆反射镜挡光板以及遮光罩挡光环。当侧摆反射镜位于 0° 、 15° 、 -15° 视场位置时, 基于消杂光设计, 对可见近红外和短波红外光学系统两个视场方向共 237 个视场进行了 PST 仿真分析, 分析结果表明, 对于所有摆镜位置, 视场外 0.5° 位置处空间视场方向和光谱视场方向的 PST 可降低至 10^{-3} 。基于观测模式, 对高光谱成像仪在轨工作时的信号源与杂光源进行了分析。基于

PST 仿真结果,对杂光源在探测器像面处产生的杂光能量进行了研究,并分析了高光谱成像仪的信杂比,摆镜位于 0° 位置处时可见近红外光学系统的信杂比为 0.1% ,短波红外光学系统的信杂比为 0.6% 。结果表明,所提杂散光抑制措施是有效的,满足星载高光谱对杂散光抑制的技术要求。

参 考 文 献

- [1] Green R O. Lessons and key results from 30 years of imaging spectroscopy [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9222: 92220B.
- [2] Fellgett P B. The multiplex advantage [D]. UK, Cambridge: University of Cambridge, 1951.
- [3] Zhang Z N, Li L B, Hu B L, et al. Study of Fourier transform imaging spectrometer with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0130001. 张智南, 李立波, 胡炳樾, 等. 宽视场干涉光谱成像仪技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0130001.
- [4] Shao M Q, Zhang L, Wei L, et al. Optimal design of stray light suppression structure for ultra-light space camera [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (11): 1122002. 邵梦旗, 张雷, 魏磊, 等. 超轻空间相机杂散光抑制结构的优化设计[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1122002.
- [5] Li K, Wang Y Y, Chang J L, et al. Stray light suppression of space off-axis reflective CCD camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57 (3): 032902. 李可, 王媛媛, 常君磊, 等. 空间离轴反射式 CCD 相机杂散光抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57 (3): 032902.
- [6] Zhang Z N. Research on the Fourier transform imaging spectrometer of wide swath for the ocean spectrum[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 21-22. 张智南. 用于海洋遥感的宽覆盖干涉光谱成像技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 21-22.
- [7] Wu Z M, Wang X. Stray light correction for medium wave infrared focal plane array-based compressive imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(13): 19097-19112.
- [8] Chen X, Hu C H, Yan C X, et al. Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. Chinese Optics, 2019, 12 (3): 678-685. 陈醒, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 678-685.
- [9] Huang Z, Bai J, Lu T X, et al. Stray light analysis and suppression of panoramic annular lens[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10810-10820.
- [10] Xue P, He H, Wang H M, et al. Error correction algorithm for optical measurement system based on radial basis function network[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0212004. 薛萍, 何海, 王宏民, 等. 基于径向基函数网络的光学测量系统误差修正算法[J]. 光学学报, 2020, 40 (2): 0212004.
- [11] Pei L L, Xiang L B, Lü Q B, et al. Research on the stray light suppression for super-resolution optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46 (11): 1122002. 裴琳琳, 相里斌, 吕群波, 等. 超分辨率卫星载荷光学系统杂散光抑制[J]. 光子学报, 2017, 46 (11): 1122002.
- [12] Li Y Y, Liu L, Peng Q Q, et al. Stray radiation analysis of Cassegrain system[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(8): 987-991. 栗洋洋, 刘琳, 彭晴晴, 等. 卡塞格林系统的杂散辐射分析[J]. 激光与红外, 2019, 49(8): 987-991.
- [13] Jiang S W, Xia Z T, Sun Y X, et al. Optical design and stray-light analysis of urban night-light remote sensing imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 012201. 姜守望, 夏振涛, 孙永雪, 等. 城市夜光遥感成像系统设计及杂散光分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 012201.
- [14] Wang S. Research on the signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectrometer[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 38-40. 王爽. 大孔径静态干涉光谱成像仪信噪比研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013: 38-40.