

狭缝匀光器对遥感光谱仪探测精度的研究

郭宝泽^{1,2,3,4}, 石恩涛^{1,2,3*}, 王咏梅^{1,2,3,4}, 武志昆^{1,2,3,4}¹中国科学院国家空间科学中心环境探测室, 北京 100190;²天基环境探测北京重点实验室, 北京 100190;³中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190;⁴中国科学院大学, 北京 100190

摘要 对星载仪器的回传数据进行分析,发现空间场景不均匀现象会造成光谱响应函数(ISRF)的“漂移”,从而影响探测数据精度。提出通过光学元件平衡了ISRF“漂移”的问题——狭缝匀光器。概述了光线在狭缝匀光器中的传播过程,建立了合理的光学模型,利用近场衍射原理解释其传播过程并分析了狭缝匀光器的光学特性。整个狭缝模型由数学软件和光学软件进行仿真模拟及数理分析,得到狭缝匀光器匀光效果的具象表示。通过光学模型表示了入瞳场景与狭缝匀光器匀光效果之间关联,研究不同入瞳场景中痕量气体排放点位置和覆盖面积的不同对狭缝匀光器提升探测精度的影响,量化了不同入瞳场景下光谱仪系统ISRF的变化,并提出一种提高探测精度的方法。

关键词 成像光谱仪; 光学仿真; 狭缝匀光器; 傅里叶光学

中图分类号 O439

文献标志码

DOI: 10.3788/AOS222099

1 引言

常见的星载推扫式光谱探测仪探测原理^[1],望远系统将地面的像成在狭缝上,经色散元件分光,最终成像在面探测器上,一维表示光谱信息,另一维表示空间信息。光谱与空间信息一起被用来定量分析大气组成成分的变化。在光谱仪系统中,望远系统将探测场景的像呈到狭缝处,通过色散元件进行分光,最终由成像系统在焦平面阵列(FPA)上重新成像,在FPA上产生的沿光谱方向的强度模式称为仪器光谱响应函数(ISRF)。一方面,大气层及下方(云、气溶胶层、地面高度)的改变使地面反照率随之变化;另一方面,污染气体排放点的变化使探测场景信息随之改变,这都可能会导致望远系统在狭缝处的像空间亮度不均匀,非均匀亮度将造成ISRF的失真,使探测数据出现偏差,从而影响探测大气成分的精度^[2]。

随着科技的发展,星载仪器探测的分辨率显著提升^[3-7],但仪器分辨率越高受这种“漂移”的影响越明显^[2]。德兰格拉夫等^[8]估计由非均匀照明引起的CO产品数据的误差约为2%,诺埃尔等^[9]模拟量化了由仪器狭缝不均匀照明导致的Sentinel-4UVN成像光谱仪测量对流层臭氧、二氧化氮、二氧化硫和甲醛的误差。其中,二氧化氮的误差最大,平均误差为5%,标准误

差约为8%。虽然可以通过算法等计算机手段进行矫正误差,但矫正效果并不理想。近些年,随着对大气环境探索监控的要求不断提高,在哨兵5研发过程中提出了狭缝匀光器的概念,狭缝匀光器可以降低由空间不均匀性带来的误差^[1,10]。

目前,从几何光学和近场衍射^[11-13]出发,建立狭缝匀光器的传播模型,几何光学虽表述简单易懂但不够全面,理想情况忽略衍射效应;衍射模型虽具体但结构公式复杂。另一方面对狭缝匀光器的分析并不全面,除自身参数外,望远系统的入瞳场景对匀光效果也有影响。本文的主要工作为分析狭缝匀光器的工作原理,结合几何模型与衍射分析,建立了从望远系统到狭缝匀光器的模型结构,介绍了狭缝匀光器工作原理及影响因素,提出平行光的等效模拟,建立更为简洁的光学传播模型,在保留准确性的基础上减少不必要的计算过程。

根据所提的光学模型结构,先简要论证所建立模型的合理性,再从入瞳场景出发综合评价了狭缝匀光器的作用效果,分析痕量气体强排放点的位置和覆盖面积的不同对狭缝匀光器均匀效果的影响,量化在不同入瞳场景下光谱仪系统ISRF的变化,最后基于前期理论提出了提升目前探测精度的设想方案。

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-01-29; 录用日期: 2023-02-24; 网络首发日期: 2023-03-04

基金项目: 紫外臭氧探测仪原理样机集成、测试及试验验证(E2C04002)

通信作者: *set@nssc.ac.cn

2 狭缝匀光器

狭缝匀光器利用 2 个延长镜如图 1 所示,使入射狭缝的光线在狭缝内部多次反射,达到狭缝出射口处亮度均匀,降低不均匀照明的影响。狭缝匀光器作用于沿狭缝宽度方向(光谱维)使其照度均匀,保证沿狭缝长度方向(空间维)照度不变以保留跨轨方向全部图像信息,要求光学系统必须具有一定的像散如图 2 所示。在沿狭缝方向上,望远系统的像面位于狭缝匀光器输入平面处,狭缝匀光器输出平面为准直系统的物面。因此,望远系统的像面与准直系统的物面之间的间隔用来均匀化照明,其也是狭缝匀光器的深度。在跨狭

缝方向上,望远系统的像面和准直系统的物面重合,狭缝匀光器等同于普通片状狭缝。狭缝匀光器长为 l 、深度为 W 、狭缝宽度为 b ,该匀光器由 2 个延长镜构成^[13]。

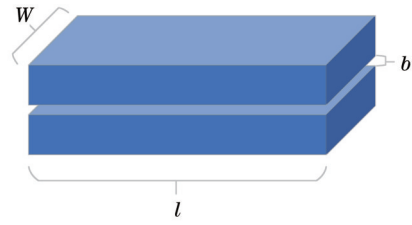


图 1 狭缝匀光器结构

Fig. 1 Slit homogenizer structure

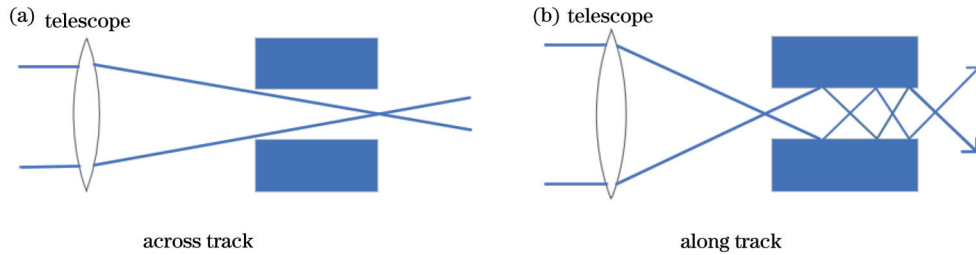


图 2 狭缝匀光器工作原理。(a)空间维成像;(b)光谱维成像

Fig. 2 Principle of slit homogenizer. (a) Spatial imaging; (b) spectral imaging

3 建立光学模型

狭缝匀光器主要作用为提升数据反演精度。该方案用一对平行的延长镜代替经典的狭缝来降低探测场景沿轨方向的对比度。系统入瞳为矩形光瞳,光线垂直入射狭缝,入射角角度由望远系统决定,狭缝匀光器在空间维方向(跨轨方向)没有影响。由此,狭缝匀光器的分析分为 3 步:

2) 望远系统的像面位于狭缝匀光器输入平面上,光线经多次镜面反射达到输出平面。

3) 狭缝匀光器后,输出平面的图像为准直系统的物面,经系统成像到探测器上。

3.1 几何模型

如图 3 所示,从几何光学角度出发,假设远心光束入射,光通过望远系统垂直成像到狭缝匀光器的输入平面,该输入平面的光束在狭缝匀光器内部经过多次反射光线折叠,使其到达狭缝匀光器出射平面的光瞳光束强度均匀。该输入平面任何位置的光束,到达输出平面上总是均匀光强分布。

1) 狭缝匀光器前,忽略系统像差,望远镜系统将光源发出的波经望远系统在狭缝匀光器的入射口处汇聚成理想的点。

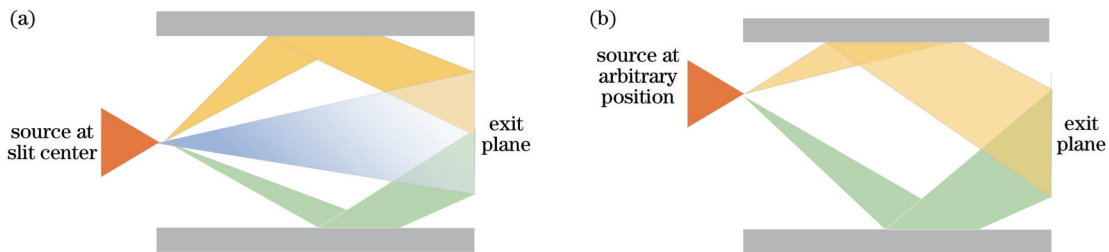


图 3 基于纯几何原理的狭缝匀光器工作原理。(a)光源位于中心;(b)光源位于边缘

Fig. 3 Slit homogenization principle based on a purely geometrical concept. (a) Source at slit center; (b) source at arbitrary position

如果将入射狭缝的光源看作多角度的平行光共同作用的结果,如图 4 所示,以其中一个平行光分量为例,位于狭缝匀光器输入平面边缘的平行光以某一角度入射,任何以小角度向上的光线都会立即向下反射,并在只有一次反射的情况下通过狭缝匀光器。这意味

着对应小的正光瞳坐标的部分被镜像(x 被替换为 $-x$)。如果光线以较大的角度出射,则在光线离开狭缝匀光器之前,将被反射两次。通过两次反射,将恢复其初始方向,输入平面的光瞳坐标位置和输出平面光瞳坐标位置一一对应,狭缝匀光器仅改变了输入和

输出平面的光瞳位置。在光强相同情况下,狭缝匀光器出射狭缝面的光强分布可以看作入射狭缝面的光线发散角 α 内多角度平行光叠加的结果,具体可表示为

$$I_{\text{out}}(y) = \int_{-\alpha}^{\alpha} I_{\alpha}(y) d\alpha, \quad (1)$$

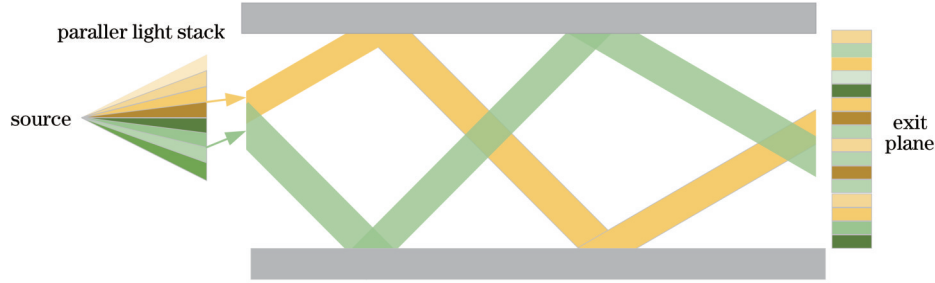


图 4 狭缝匀光器光线传输
Fig. 4 Slit homogenization principle

3.2 衍射模型

首先建立狭缝匀光器与望远镜系统联系,望远镜系统看作衍射限制系统,光在望远系统的入射光瞳和出射光瞳之间传播。衍射效应看作在出射光瞳到像处,像的复振幅 U_1 可表示为

$$U_1(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(u, v; u_0, v_0) U_0(u_0, v_0) du_0 dv_0, \quad (2)$$

式中: U_0 为物体所投射的复振幅分布; h 为脉冲响应函数; u_0, v_0 为入射光瞳上位置坐标; u, v 为出射光瞳上位置坐标。

在整个系统中,狭缝匀光器处复振幅的分布情况与入瞳场景 U_0 密切相关, U_0 可表示为

$$U_0(u_0, v_0) = A_0(u_0, v_0) \exp[ikz(u_0, v_0)], \quad (3)$$

式中: A 为振幅与入瞳景象的位置有关; $z(u_0, v_0)$ 为位置坐标; k 为 $2\pi/\lambda$ 。

望远系统光线传播并不是工作的重点。为方便后续计算,可以假设一个简洁的复振幅形式对应望远系统的点扩散函数(PSF)下的像面复振幅分布。为表示与入瞳场景的关联,狭缝匀光器处的复振幅为

$$u_{\theta}(\xi, \eta) = \tau A_0 \times \exp[ikz(\xi, \eta)], \quad (4)$$

式中: τ 为转换因子,其表示与入瞳振幅之间的对应关系; (ξ, η) 为狭缝入射面的位置坐标。

其次,基于几何光学讨论可以将狭缝匀光器处的球面波替换为平面波形式,平面波是简单的传播形式,假设在狭缝入射口的复振幅由数个平面波组成,不同的 θ 对应不同平面波, θ 的最大值为 $D/(2f)$, 即望远系统 F 数倒数的 2 倍,对应几何光中像点发散形成的光锥。以狭缝匀光器输入平面的中点为坐标原点, x 轴

式中: $I_{\text{out}}(y)$ 为狭缝匀光器出射面的光强分布; $I_{\alpha}(y)$ 为入射角 α 的光束达到狭缝匀光器出射面的光强分布。

划分的角度越细光瞳匀光效果越好,在狭缝匀光器达到匀光效果的同时,狭缝输出平面看到光瞳照明将发生显著的变化,并将由“条纹”组成^[2]。

为狭缝匀光器宽 W 方向, y 轴为狭缝宽度 b 方向上, $b = \frac{l\theta}{2n}$ (n 为反射次数)。其中,狭缝匀光器入射平面一个分量可表示为

$$u_{\theta}(\xi, \eta) = A \times \exp[ik(\xi \cos \theta + \eta \sin \theta)], \quad (5)$$

式中: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; θ 为复平面与 y 轴夹角; A 为振幅, $A = \tau A_0$, 不同函数的振幅表示也可表明入射口处不均匀照明的分布。

经过狭缝,等同一个矩形口径其振幅透射比 t_A 为

$$t_A = \text{rect}\left(\frac{\xi}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{b}\right), \quad (6)$$

式中: b 为狭缝的宽; W 为狭缝长度。

根据式(1)复振幅表示为

$$u_{\theta}(\xi, \eta) = \text{rect}\left(\frac{\xi}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{b}\right) \times A \times \exp[ik(\xi \cos \theta + \eta \sin \theta)], \quad (7)$$

光线在狭缝匀光器中进行多次反射到达出射口,每次反射可用 $\exp(i\pi)$ 表示相位的一次改变。在狭缝匀光器的出射口的复振幅分布,可看作在入口处多个反射镜像的像在出射口处的叠加的效果如图 6 所示,此时狭缝入口的复振幅为

$$U_{\theta}(\xi, \eta) = \sum_{n=1}^N \exp(in\pi) R^{|n|} u_{\theta,n}(\xi, \eta), \quad (8)$$

式中: R 为反射率; ξ 取值范围为 $\left[-\frac{b}{2} + nb, \frac{b}{2} + nb\right]$ 。

根据惠更斯-菲涅耳近场衍射原理,在距离狭缝入口为 l 处的出射口的复振幅分布为

$$\begin{aligned}
U_\theta(x, y) &= \frac{\exp(ikl)}{i\lambda l} \iint U(\xi, \eta) \exp\left\{i\frac{k}{2z}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\} d\xi d\eta = \\
&= \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \iint \sum \exp(in\pi) R^{|n|} u_n(\xi, \eta) \exp\left\{i\frac{k}{2z}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\} d\xi d\eta = \\
&= \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \iint \sum \exp(in\pi) R^{|n|} A \times \exp[ik(\xi \cos\theta + \eta \sin\theta)] \exp\left\{i\frac{k}{2z}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\} d\xi d\eta = \\
&= \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \int \exp(in\pi) \sum R^{|n|} \exp(ik\eta \sin\theta) \exp\left[i\frac{k}{2z}(y-\eta)^2\right] d\eta \times \int A \times \exp(ik\xi \cos\theta) \exp\left[i\frac{k}{2z}(x-\xi)^2\right] d\xi, \quad (9)
\end{aligned}$$

令 $C = A \times h(x) = A \times \int \exp(ik\xi \cos\theta) \exp\left[i\frac{k}{2z}(x-\xi)^2\right] d\xi$, 则复振幅表示为

$$\begin{aligned}
U_\theta(x, y) &= \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} C \int \sum \exp(in\pi) R^{|n|} \exp(ik\eta \sin\theta) \exp\left[i\frac{k}{2z}(y-\eta)^2\right] d\eta = \\
A \times h(x) &= \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(i\frac{k}{2z}y^2\right) \int \sum \exp(in\pi) R^{|n|} \exp\left(ik\eta \sin\theta + i\frac{k}{2z}\eta^2\right) \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda z}y\eta\right) d\eta, \quad (10)
\end{aligned}$$

式中: $y \in [-b/2, b/2]$ 。

狭缝匀光器仅作用于 y 轴方向。在 x 轴任意某处 $x = x_1$ 时, y 轴以某一入射角度分量对应的光强分布为

$$I_\theta(y) = I_\theta(x, y) = |U_\theta(x_1, y)|^2. \quad (11)$$

根据几何模型, 入射光源等效为多个不同角度的平面波分量组成, 将式(11)代入式(1)中, 则出射口的光强分布可表示为

$$I(y) = \int_{-\theta}^{\theta} I_\theta(x, y) d\theta. \quad (12)$$

在光谱仪部分狭缝匀光器出射平面的像分布作为光谱仪准直系统的入射光源。在成像过程中, ISRF 与狭缝照度分布、光谱仪的点扩散函数 (PSF) 和探测器像素特性密切相关。可以得到系统的光谱响应函数:

$$\text{ISFP}(\lambda - \lambda_0) = I(y) \otimes \text{PSF}(y) \otimes r_{\text{detector}}(y), \quad (13)$$

式中: $r_{\text{detector}}(y)$ 为 y 在 $[-p/2, p/2]$ 内为 1, 其余值为 0, p 为探测器像元; \otimes 为卷积符号。忽略光谱仪系统的畸变, 像平面坐标与物平面坐标线性相关, 不同光谱仪的光谱维放大倍率不同, 对应光谱响应函数可表示为

$$\text{ISFP}(\lambda - \lambda_0) = I(y/m) \otimes \text{PSF}(y) \otimes r_{\text{detector}}(y), \quad (14)$$

式中: m 为光谱仪光谱维放大倍率。

通过计算光谱响应函数, 可以确定谱线的偏移情况。在上述建立的数学模型中, ISFP 由狭缝出射面光强分布、光谱仪的点扩散函数 (PSF) 和探测器像素特性决定。而狭缝出射面光强分布与立体狭缝本身参数和系统入瞳有关, 立体狭缝本身参数 b 由望远镜决定, 光学系统中望远镜参数确定后, 立体狭缝相应参数也随之确定。影响光谱响应函数的因素可以概括为前方望远镜头的入瞳图像和光谱仪系统。其中, 不同系统的物像关系会影响 PSF, ISRF 也会产生相应的影响。另一方面, 入瞳平面的图像直接影响立体狭缝出射面的光强分布, 狭缝匀光器的匀光效果极大地依赖于入瞳场景。入瞳场景中云雨位置的差异、排放点位置的

不同和覆盖面积的大小都将影响狭缝匀光器的匀光效果, 从而影响狭缝匀光器提高探测数据精度、降低误差的能力。以下将从仿真、实验角度论证所建立模型合理性及影响 ISRF 的系统因素和外部原因。

4 仿真实验

4.1 非均匀入射

在天基探测过程中, 地球上不同位置对比度被大气所柔和, 但当卫星飞行速度为 7 km/s 时, 仍有非均匀照明的情况^[11], 狭缝输入平面被不均匀的照亮, 狭缝输入平面的强度分布如图 5(a) 所示。根据上文给出的数学模型, 经过狭缝匀光器后, 整个输出平面的光强分布如图 5(b) 所示。狭缝匀光器出射平面光强分布曲线如图 6(a) 所示, 其具有良好的均匀效果。利用光学仿真软件拟合出在跨狭缝方向的光强分布拟合曲线如图 6(b) 所示。

光谱仪将狭缝匀光器均匀化后的图像映射到像素长度为 p 的焦平面上, 得到的光谱响应曲线如图 7 所示。

当普通片状狭缝的入射平面的强度分布不均匀时, 片状狭缝的光谱响应曲线如图 8 虚线所示, 对比同条件下立体狭缝的光谱响应曲线, 片状狭缝所在系统出现了较大的“漂移”。用狭缝匀光器替代普通片状狭缝将降低不均匀照明带来的探测误差。

为进一步验证立体狭缝的效果, 基于上文的理论推导和仿真模拟过程, 搭建相应光路。狭缝匀光器宽度为 0.22 mm, 为模拟照明位置, 可以通过望远镜系统进行调控, CCD 紧贴狭缝匀光器出口进行探测, 实验原理图如图 9 所示, 狭缝匀光器实物如图 10 所示。

实验测试中, 对狭缝入口部分照明狭缝匀光器后接镜头模拟光谱在像面上的响应曲线, 成像的结果如图 11 所示, 在非均匀光照明情况下, 用 ISRF 的失真程度^[11-12]来表示狭缝的匀光效果:

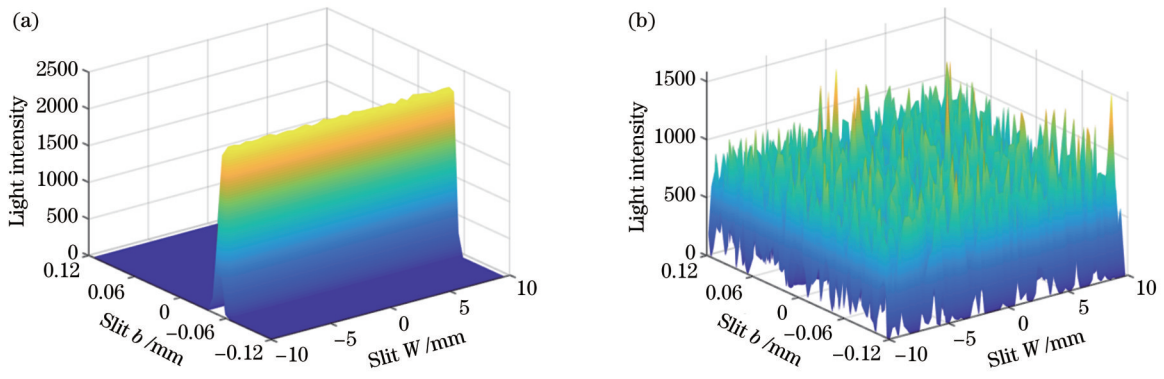


图 5 狭缝匀光器光强分布拟合曲线。(a)输入平面光强分布;(b)输出平面光强分布

Fig. 5 Fitting curve of light intensity distribution of slit homogenizer. (a) Input intensity; (b) exit intensity

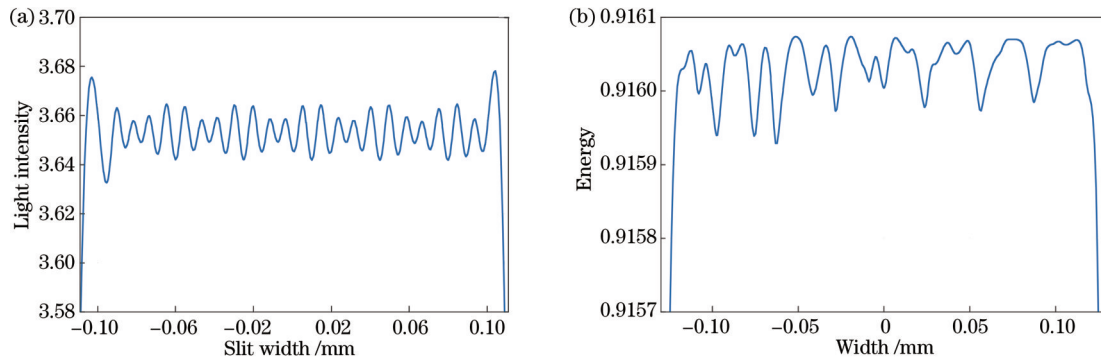


图 6 狭缝匀光器输出平面能量分布。(a) $I(y)$; (b) TracePro 仿真拟合

Fig. 6 Intensity distribution at slit homogenizer exit. (a) $I(y)$; (b) TracePro simulation

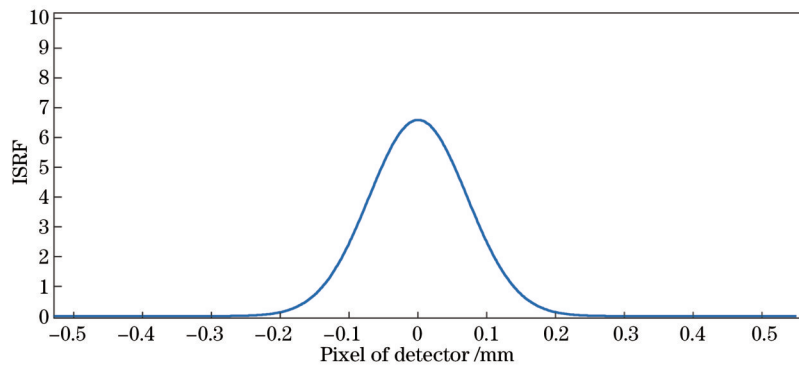


图 7 在波长为 500 nm 处光谱响应曲线

Fig. 7 ISRF at $\lambda=500$ nm

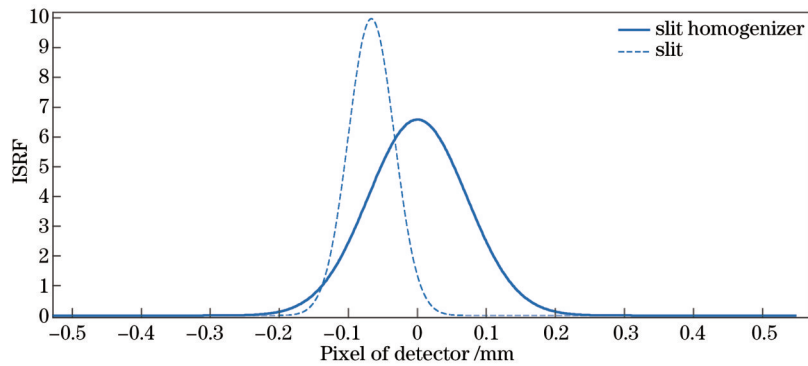


图 8 非均匀场景下狭缝匀光器、片式狭缝光谱响应曲线

Fig. 8 ISRF with slit homogenizer/slit for heterogeneous calibration scene

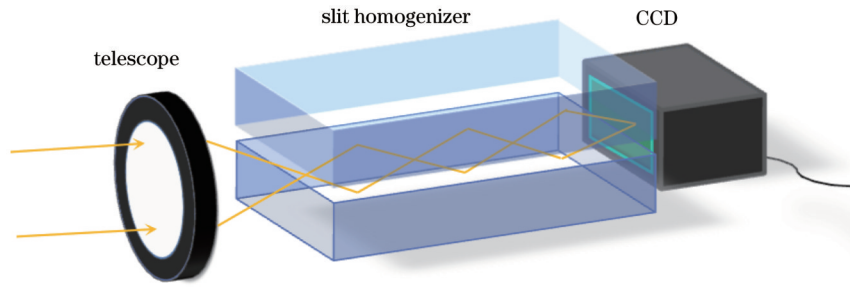


图 9 实验原理图

Fig. 9 System principle diagram

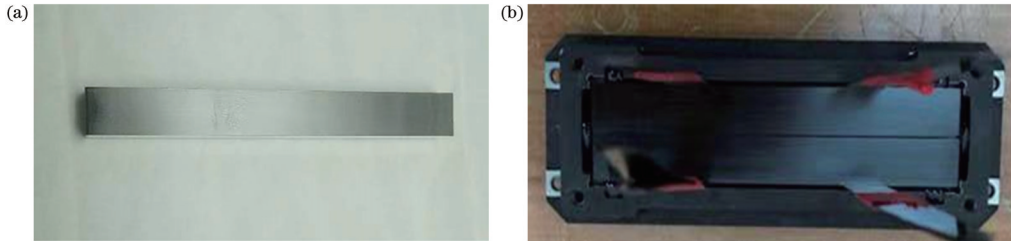


图 10 狭缝匀光器实物图。(a)狭缝匀光器原件;(b)狭缝匀光器包含结构件

Fig. 10 Physical image of slit homogenizer. (a) Slit homogenizer; (b) structural components included in the slit homogenizer

$$ISRF_DIFF(y) = \frac{\max[ISRF_{CTL}(y) - ISRF(y)]}{\max[ISRF(y)]}, \quad (15)$$

式中: $ISRF_{CTL}(y)$ 为非均匀照明的狭缝匀光器的

$ISRF$; $ISRF(y)$ 为均匀照明的狭缝匀光器的 $ISRF$ 。由式(15)可知, $ISRF$ 的失真数值为 0.98%, 参考哨兵 5 要求偏移的数据小于 2%, 通过实验证明前期理论假设的合理性, 狭缝匀光器有较好的匀光效果。狭缝匀光器可以较好地平衡亮度不均匀引起的光谱响应曲线偏移。

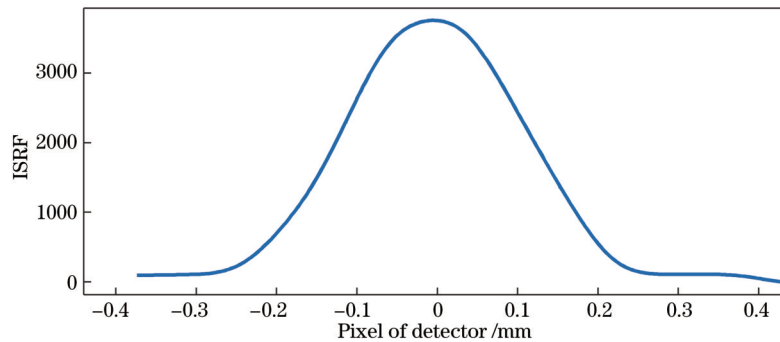


图 11 光谱响应曲线

Fig. 11 ISRF curve

4.2 不同光谱仪系统影响

除立体狭缝自身外, 根据第 3 节建立的数学模型, 不同光谱仪系统所对应的 $ISRF$ 也不同。在入瞳照明为 75% 时, 光谱仪系统放大倍率分别取 1/3, 1/2, 1, 2。根据式(15)得到的对应结果如表 1 所示。对比不同放大倍率下 $ISRF$ 的失真数据, 整体变化趋势较为平缓, 数据之间差值较小, 放大倍率越小系统 $ISRF$ 的失真程度相对较小。对同样要求的系统, 光谱仪系统放大倍率较小时, 狭缝匀光器能发挥出较好效果。

4.3 不同入瞳景象影响

在狭缝匀光器工作原理的讨论中, 可以很明显的

表 1 不同放大倍率对应 $ISRF$ 的失真程度

Table 1 Different magnification corresponds to the offset error of $ISRF$

Magnification	Distortion level of $ISRF$ / %
1/3	0.92
1/2	1.02
1	1.21
2	1.92

发现狭缝匀光器匀光效果与入瞳场景有关, 不同入瞳场景对应不同的输出曲线。有研究表明 $ISRF$ 的稳定性是测量反演数据准确的基础^[15], 以 ESA 提供的

Sentinel-5/UVNS 任务真实参考地球场景为参考数据, ISRF 误差预算 $< 2\%$, 近红外(NIR)的质心误差为 0.02 nm 。ESA 提供的 Sentinel-5/UVNS 代表地球辐射强度和固定的高对比度的测试场景^[12], 入瞳场景中排放点位置的不同和覆盖面积的大小在系统中体现为狭缝匀光器入射面的强度对比度不同, 其中痕量气体

强排放点位置变化对应狭缝匀光器入口照明 25% 的不同位置, 覆盖面积不同对应着狭缝匀光器入口照明面积的不同。在光谱仪放大倍率为 1 时, 狭缝常见场景下的照明和极端场景 25% 照明不同位置下狭缝匀光器的匀光效果, 图 12 中 a-25%、b-25%、c-25% 的曲线分别对应着从边缘到中心的 25% 照明的曲线。

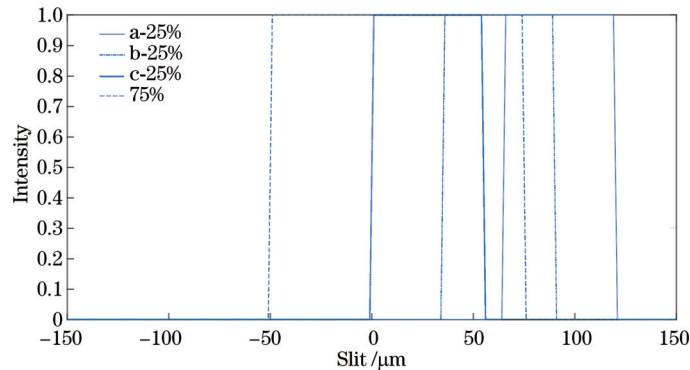


图 12 入瞳场景对应的狭缝照明范围

Fig. 12 Applied input Earth scenes corresponding to the slit illumination

望远镜的入瞳场景将影响匀光效果, 通过光线追踪模拟预测不同入瞳场景的 ISRF 曲线, 对狭缝匀光器 75% 照明场景和从边缘到中心的 25% 照明场景进行仿真模拟。图 13 为不同入瞳场景下狭缝出射面的光强分

布。由图 13 可知, 和前期讨论一致不同入瞳场景的光强会影响狭缝匀光器的匀光效果, 直观看出 75% 照明比 25% 照明的匀光效果要好, 25% 照明不同位置对狭缝匀光器匀光效果可以通过计算进一步讨论。

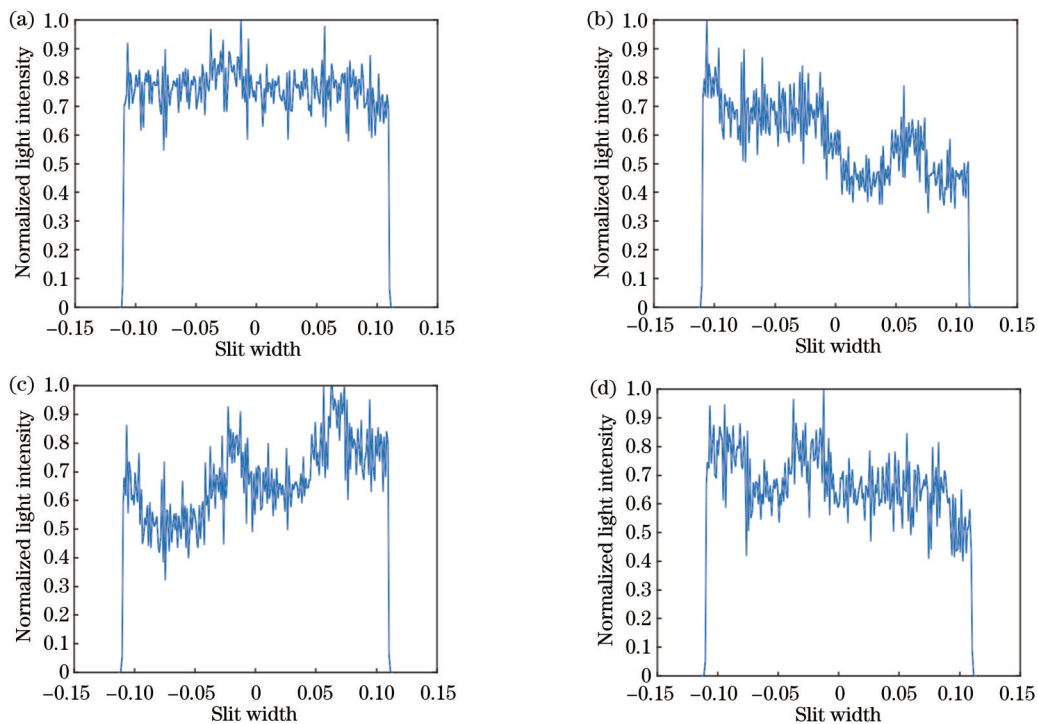


图 13 不同入瞳场景下狭缝匀光器出射面的光强。(a) 75%; (b) a-25%; (c) b-25%; (d) c-25%

Fig. 13 Applied input Earth scenes corresponding to the power in slit output. (a) 75%; (b) a-25%; (c) b-25%; (d) c-25%

成像光谱仪的 ISRF 由狭缝照明函数、FPA 的响应和光谱仪的光学 PSF 的卷积给出, 简化模型中由正态分布的曲线表示光谱系统的 PSF, 狭缝出射面的光

强分布由式(12)得出。另一方面, 通过 ISRF 曲线对称中心与像素尺寸中心的偏移情况 $f_{\text{ISRF_CENTER}}$ 来评价 ISRF 的偏移:

$$f_{\text{ISRF_CENTER}} = \frac{\int \text{ISRF}(y) y dy}{\int \text{ISRF}(y)} \quad (16)$$

根据 ISRF 的偏移[式(15)]和 ISRF 的质心偏移[式(16)],狭缝匀光器针对不同入瞳场景的效果如表 2 所示。

表 2 光谱响应曲线的偏移误差

Table 2 Offset error of ISRF

Target	ISRF DIFF /%	ISRF center /nm
a-25%	15.60	1.08×10^{-2}
b-25%	12.31	9.79×10^{-3}
c-25%	10.41	6.89×10^{-3}
75%	1.21	1.72×10^{-3}

由上述可知,入瞳场景对匀光效果有影响,随着照明范围的减少,系统的 ISRF 的失真程度也会随之上升,入瞳场景 75% 照明狭缝匀光器尚能满足测量需求,ISRF 误差值小于 2%。在入瞳场景对比度确定时,25% 亮度出现的位置对 ISRF 也有影响,靠近中心的 25% 亮度对应的 ISRF 的偏移比远离中心的 25% 亮度对应的 ISRF 的偏移要小,且逐步降低。虽与片状狭缝相比狭缝匀光器的匀光效果较为突出,通过对入瞳场景 25% 亮度出现的位置讨论,狭缝匀光器降低高对比度场景所对应的 ISRF 能力有限,尤其是出现 25% 探测范围大量痕量气体排放时,其 ISRF 产生的较大误差将会影响数据反演的精度。在实际应用中,仍需要提升算法对部分数据的反演精度。

5 讨 论

分别讨论了狭缝匀光器的作用效果和不同入瞳场景对狭缝匀光器作用效果的影响,通过提出的光学模型证实狭缝匀光器的匀光能力极大依赖于入瞳场景。一般场景下狭缝匀光器可以达到数据反演精度要求,但狭缝匀光器校准入瞳场景对比度的能力稍显不足。狭缝匀光器将调制入瞳场景 Y 向的强度分布,这点在狭缝匀光器出射面的分布图中也有证实^[10]。根据式(9),狭缝匀光器延光轴对称分布的延长镜对一定角度入射的发散光具有相同的作用效果,使狭缝匀光器对入瞳场景强度的调制呈对称分布,目前,提出一种设想倾斜狭缝匀光器中一面延长镜打破对称平衡存在,对狭缝入射面 25% 照明而言,照明曲线如图 12 的 a-25% 曲线,具体倾斜狭缝出射面实验仿真数据如下:

通过对比图 14 和图 13,倾斜的狭缝明显具有更好的匀光效果,进一步计算量化误差,ISRF 的误差为 1.07%,ISRF 的偏心为 1.32×10^{-3} nm,与原本狭缝匀光器进行对比,倾斜的延长镜降低入瞳场景对比度的能力更强。在此设想下,计算出的光谱响应函数稳定性满足反演数据的要求,理论上可以进一步保证探测精度。

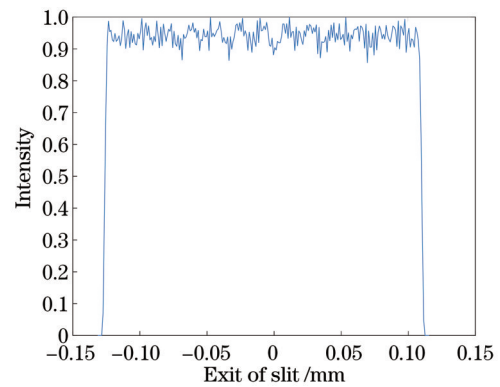


图 14 狭缝出射面强度分布

Fig. 14 Power of slit output

6 总 结

由于新一代光谱仪器在空间分辨率和辐射精度方面都有了更高的要求,对地球观测成像光谱仪中狭缝匀光器的运用很好地降低了探测数据的误差。总结了狭缝匀光器的需求和优势,概述了狭缝匀光器的工作原理。根据其性能建立了简洁合理的光学模型,利用近场衍射的原理阐述了狭缝匀光器的工作过程,并给出了更简洁且可计算的数学模型,模拟仿真了狭缝匀光器的匀光效果,与片状狭缝相比体现了其优越的匀光能力。讨论影响光谱响应函数的系统因素和外部原因,其中,讨论排放点位置的不同和覆盖面积的大小变化时狭缝匀光器匀光能力,发现狭缝匀光器降低高对比度场景所对应的 ISRF 能力有限,其误差可能会影响数据反演精度。最后,提出了一种可调整狭缝匀光器下方延长镜的倾角的解决方法,填补狭缝匀光器降低绝对度场景能力的不足,未来将尝试在仪器设备中验证此设想的可行性。

参 考 文 献

- [1] Irizar J, Melf M, Bartsch P, et al. Sentinel-5/UVNS[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 1118004.
- [2] Hummel T, Meister C, Keim C, et al. Slit homogenizer introduced performance gain analysis based on the Sentinel-5/UVNS spectrometer[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2021, 14(8): 5459-5472.
- [3] 丁宁, 于博, 颜昌翔, 等. 星载气溶胶被动光学遥感仪器: 进展与未来展望[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 1701002.
Ding N, Yu B, Yan C X, et al. Spaceborne aerosol passive optical remote sensing instruments: progress and future prospects [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 1701002.
- [4] 贾文波, 秦天翔, 黄蕴涵, 等. 红外双波段成像光谱仪光学系统的设计与分析[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2311002.
Jia W B, Qin T X, Huang Y H, et al. Design and analysis of optical system of an infrared dual-band imaging spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2311002.
- [5] 陈凡胜, 胡璋悦, 李潇雁, 等. 宽幅高分辨热红外遥感成像技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1210002.
Chen F S, Hu Z Y, Li X Y, et al. Research on wide-range and high-resolution thermal infrared remote sensing imaging technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1210002.

- [6] 武志昆, 石恩涛, 王咏梅, 等. 狭缝离轴校正透射式光谱仪谱线弯曲[J]. 光学学报, 2022, 42(24): 2423001.
Wu Z K, Shi E T, Wang Y M, et al. Correction of spectral line curvature of transmission spectrometers by off-axis slit[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(24): 2423001.
- [7] 薛庆生, 王楠, 杨柏. 基于 PGP 型自校正成像光谱仪系统设计与研究[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2322001.
Xue Q S, Wang N, Yang B. Design and research of self-correcting imaging spectrometer system based on PGP[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2322001.
- [8] Landgraf J, de Brugh J A, Scheepmaker R, et al. Carbon monoxide total column retrievals from TROPOMI shortwave infrared measurements[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(10): 4955-4975.
- [9] Noël S, Bramstedt K, Bovensmann H, et al. Quantification and mitigation of the impact of scene inhomogeneity on Sentinel-4 UVN UV-VIS retrievals[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(6): 1319-1331.
- [10] Amann S, Duong-Ederer Q, Haist T, et al. Characterization of fiber-based slit homogenizer devices in the NIR and SWIR[J]. Proceedings of SPIE, 11180: 111806C.
- [11] Caron J, Sierk B, Loescher A, et al. The CarbonSat candidate mission: radiometric and spectral performances over spatially heterogeneous scenes[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10563: 105633J.
- [12] Caron J, Kruizinga B, Vink R. Slit homogenizers for Earth observation spectrometers: overview on performance, present and future designs[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 1118012.
- [13] Graziosi C, Pasqui C, Brandani F, et al. First test results on SWIR subsystem optical breadboards: optical mounting characterization, first slit homogenizer, and immersed grating for space applications[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11115: 1111507.
- [14] Meister C, Keim C, Irizar J, et al. Sentinel-5/UVNS instrument: the principle ability of a slit homogenizer to reduce scene contrast for earth observation spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10423: 104231E.
- [15] Hu H L, Hasekamp O, Butz A, et al. The operational methane retrieval algorithm for TROPOMI[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(11): 5423-5440.

Exploring the Detection Accuracy of Remote Sensing Spectrometer with Slit Homogenizer

Guo Baoze^{1,2,3,4}, Shi Entao^{1,2,3*}, Wang Yongmei^{1,2,3,4}, Wu Zhikun^{1,2,3,4}

¹National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China;

³Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract

Objective In a satellite-based spectroscopic instrument, the telescope system forms the ground-based image on the slit, which is divided by a dispersive element and finally imaged on a surface detector, with the spectral information represented in one dimension and the spatial information in the other. The spectral and spatial information together is used to quantify the changes in the composition of the atmosphere. In the spectrometer system, the telescope system forms the image of the detection section at the slit, which is spectroscopically separated by the dispersive elements and finally re-imaged by the imaging system on the focal plane array (FPA). The intensity pattern in the spectral direction produced is called the instrumental spectral response function (ISRF). However, changes in the atmosphere and below (clouds, aerosol layer, and ground height) can cause changes in ground albedo or a large number of measured gas emission points. Such changes may lead to inhomogeneous illumination at the slit, which will cause the ISRF distortion and then the detection data deviation. As a result, the detection accuracy of content in atmospheric composition is affected. With the increasing requirements for atmospheric exploration and monitoring, the spectral accuracy of high-resolution spectrometers for Earth observation has increased significantly, but detection data deviation is more obvious when the spectral resolution of the instrument is higher. The concept of slit homogenizer is proposed during the Sentinel-5/UVNS imaging spectrometer development, and it can reduce the date error brought by the spectral signal distortion in the heterogeneous calibration scene.

Methods The main work of this study is to analyze and study the principle of slit homogenizers and the systematic factors and external causes influencing ISRF. In addition, a geometric model and near-field diffraction principle are combined to establish the model structure from the telescope system to the slit homogenizer and from the slit homogenizer to the detector image plane. The equivalent simulation of parallel light is proposed to establish a more concise optical model, which reduces unnecessary calculations while retaining accuracy. Firstly, the rationality of the established model is briefly

demonstrated. Based on the optical model, this paper analyzes the optical properties of the slit homogenizer. Through mathematical software and optical software simulation and mathematical analysis, the paper made concrete representations of the homogenizing effect of the slit homogenizer and the influence of the parameters of the slit homogenizer in a homogeneous incoherent scene and makes clearer the working principle and influencing factors of slit homogenizers. Then, the effect of the slit homogenizer is comprehensively evaluated from the entrance pupil scene: Analysis is made on the location of the strong emission point of trace gas and the influence of the coverage area on the ability of the slit homogenizer to maintain ISRF stability. The homogenization effect of the slit homogenizer is studied in different scenes under 25% illumination. The influence of different scenes on the spectrometer system ISRF is quantified. Finally, a method is proposed to improve detection accuracy.

Results and Discussions The rationality of the optical model of the slit homogenizer and the ability of the slit homogenizer to calibrate the contrast of different scene cases are demonstrated from the simulation and experimental points of view (Figs. 8 and 11). In the mathematical model, the factors influencing ISRF can be summarized as the spectrograph pupil intensity distribution and the spectrometer system. On the one hand, the object-image relationship of different systems influences the point spread function (PSF), which also has a corresponding effect on the final result of ISRF (Table 1). On the other hand, the spectrograph pupil intensity distribution influences slit illumination, and the homogenization effect of the slit homogenizer based on the established optical model greatly depends on the entrance pupil scene. The difference in cloud and rain positions, the difference in the emission point position, and the size of the coverage area in the entrance pupil scene will affect the ISRF stability (Fig. 13), thus affecting the ability of the slit homogenizer to improve data detection accuracy (Table 2). To improve the ability of the slit homogenizer to calibrate the contrast of the different scene cases, this paper proposes a solution of adjusting the tilt angle of the extension mirror below the slit homogenizer (Fig. 14).

Conclusions As the new generation of spectroscopic instruments have higher requirements in terms of spatial resolution and radiation accuracy, slit homogenizers are employed to reduce the errors of measurement data from the imaging spectrometers for Earth observation. In this paper, the principle of the slit homogenizer is elaborated using the principle of near-field diffraction. In addition, a simple and reasonable optical model is established, and a more concise and calculable mathematical expression is given. The systematic factors and external causes influencing ISRF are discussed. The ability of the slit homogenizer to keep ISRF stability is found to be limited in the investigation with different positions of emission points and changes in the size of the coverage area, and the error of ISRF may affect data inversion accuracy. Finally, this paper proposes a solution of adjusting the tilt angle of the extension mirror below the slit homogenizer to make up for the deficiency of the slit homogenizer in reducing the influence of extreme scene cases.

Key words imaging spectrometer; optical simulation; slit homogenizer; Fourier optics