

引用格式: LI Junjie, SUN Jian, ZHAO Hengxiang, et al. Stray Light Characteristics and Suppression in Space-borne Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11): 1130002

李俊杰, 孙剑, 赵珩翔, 等. 星载多普勒差分干涉仪杂散光特性与抑制[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 1130002

星载多普勒差分干涉仪杂散光特性与抑制

李俊杰^{1,2}, 孙剑¹, 赵珩翔¹, 畅晨光^{1,2}, 傅頔^{1,2}, 赵昊¹, 白璐³, 冯玉涛¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

摘 要:星载多普勒差分干涉仪通过探测气辉光谱测量中高层大气风场, 为降低低层大气背景辐射的影响, 需要设计杂散光抑制结构。以基于 500 km 轨道高度的卫星平台对 60~90 km 高度的中层大气风场探测为例, 选取典型气辉辐射强度与大气背景辐射, 依据不同高度下大气背景辐射强度变化, 结合光学系统参数设计遮光罩。仿真分析多普勒差分干涉仪系统内部产生杂散光的关键面, 设计杂光抑制结构, 并评估干涉仪非工作级次能量对成像造成的影响。点源透过率分析和像面照度仿真结果表明: 水平方向和对角线方向上, 视场外 0.2° 处点源透过率下降到 10^{-5} 以下, 竖直方向上, 视场外 0.04° 处点源透过率下降到 10^{-5} 以下; 大气背景辐射和鬼像占像面总能量的 1.35%。所提杂散光抑制方法满足星载多普勒差分干涉仪对杂散光抑制的技术要求。

关键词:应用光学; 杂散光抑制; 遮光罩设计; 多普勒差分干涉仪; 大气背景辐射

中图分类号: TH744

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225111.1130002

0 引言

中高层大气风场探测是表征大气环境及大气动力学特征的重要手段, 对于精准天气预报、航空航天任务的顺利进行都具有重要意义^[1]。卫星遥感探测大气风场不受地理条件和天气限制, 可进行全球尺度全天候遥感观测, 更重要的是采用临边观测模式能提供全球尺度水平风场和温度随高度分布的长周期观测结果, 这是研究大尺度、长期性空间天气或气候所必需的^[2-3]。多普勒差分干涉仪具有高灵敏度、高光谱分辨率、大光通量、加工装调精度要求低的特点^[4-5], 可极大提高系统性能, 非常适合中高层大气风场的探测活动。

风速是风场信息中最重要的参数, 星载多普勒差分干涉仪以气辉为探测目标, 通过测量干涉图的多普勒相位, 反演得到风速信息。多普勒差分干涉仪要达到实用测风精度 (≤ 10 m/s), 需要测量相当于波长 3.3×10^{-8} 级别的频移^[6]。而杂散光会降低原始干涉图的对比度和有效信噪比, 影响相位测量的准确性和精度。星载多普勒差分干涉仪杂散光可分为两类: 视场外大气背景辐射和视场内成像杂散光。大气背景辐射由大气成分对太阳光的散射形成, 低层大气背景辐射比观测气辉强度高出至少一个数量级, 测风干涉仪采用临边观测模式, 低层大气背景辐射靠近观测视场, 容易进入光学系统; 视场内成像杂散光由成像光线经非正常光路到达探测器形成, 多普勒差分干涉仪闪耀光栅非工作级次衍射光与工作级次光线夹角较小, 易随工作级次光线到达像面。

目前成功应用的测风干涉仪载荷系统都对杂散光做了相应的抑制设计。高分辨率多普勒成像仪 (High-Resolution Doppler Imager, HRDI) 和热层能量探测卫星多普勒干涉仪 (Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics Doppler Interferometer, TIDI) 依靠瞬时视场沿临边高度方向一维扫描

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41005019), 中国科学院西部青年学者 (No. XAB 2016A07), 陕西省自然科学基金基础研究计划 (No. 2019JQ-931), 中国科学院西部之光交叉团队 (No. E1294301)

第一作者: 李俊杰 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向杂散光分析与抑制。Email: lij804419@126.com

导师 (通讯作者): 冯玉涛 (1980—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光谱成像技术。Email: fytciom@126.com

收稿日期: 2022-03-14; **录用日期:** 2022-04-25

<http://www.photon.ac.cn>

实现整个高度方位的观测覆盖,垂直方向视场很小(约 0.05°),一个简易的遮光罩即可满足低层杂散辐射抑制要求^[7-11]。风场成像干涉仪(Wind Imaging Interferometer on NASA's Upper Atmosphere Research Satellite, WINDII)和全球高分辨率热层成像迈克尔逊干涉仪(Michelson Interferometer for Global High-resolution imaging of the Thermosphere and Ionosphere, MIGHTI)均具备临边高度方向一维成像能力,垂直视场较大(约 6°),容易受到低层杂散光的影响。WINDII采用相互垂直的双视场观测,探测范围为80~300 km,地球边缘仅在观测视场外 2° 。为抑制低层杂散辐射,WINDII确定20 km高度以下的大气背景辐射为主要抑制对象并设计遮光罩,根据白天和夜晚的不同观测环境使用了可变光阑^[12-13]。MIGHTI采用单视场观测,探测高度90~300 km,使用与WINDII类似的遮光罩和可变光阑,仿真结果表明鬼像和大气散射杂散光仅占成像能量的1.2%^[14-15]。上述载荷探测范围为高层大气,面向中层大气风场探测(60~90 km)将对低层杂光抑制提出更高的要求。

本文针对在典型轨道上进行中层大气风场探测的近红外多普勒差分干涉仪系统的杂散光特性进行研究,并提出抑制方法。对于视场外非成像杂散光,依据不同高度大气背景辐射和气辉强度变化,结合光学系统参数设计遮光罩;对于视场内成像杂散光,仿真分析光学系统鬼像及非工作级次能量对成像的影响,设计相应的杂光抑制结构。为了评价杂散光抑制效果,对星载多普勒差分干涉仪进行点源透过率(Point Source Transmittance, PST)和像面照度的仿真分析。

1 星载中层大气风场探测观测几何及载荷光学方案

星载多普勒差分干涉仪采用临边观测模式,将探测器的视线以一定角度掠过地表的方式进行大气探测,视线路径距离地表最近时的高度被称为切线高度,如图1所示。轨道高度500 km处的卫星平台通过升高或降低切线高度来对60~90 km范围内大气进行切片式探测,具有高空间覆盖率高垂直分辨率的优点^[16]。卫星轨道参数及系统参数如表1所示。

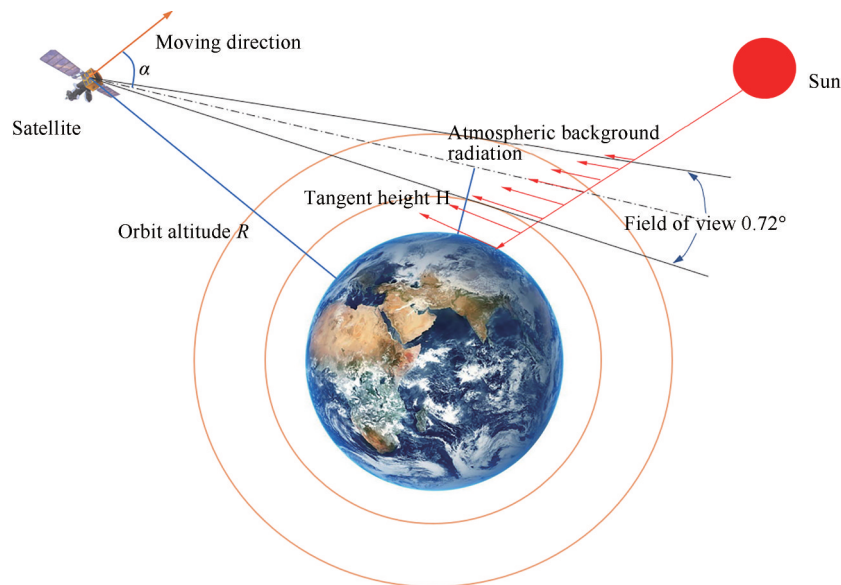


图1 临边观测示意图

Fig.1 Schematic diagram of limb viewing

中层大气风场探测多普勒差分干涉仪光学系统组成如图2所示,其干涉光路中用两块闪耀光栅代替传统迈克尔逊干涉仪的反射镜,使用两块厚度不相等的扩视场棱镜,来增大光程差,以满足测风的精度要求。气辉发射线经准直镜准直后,在分束镜处分为强度相等的两束光线,分别经由扩视场棱镜 P_1 、 P_2 到达闪耀光栅 G_1 、 G_2 处,发生衍射效应后,再返回分束镜,两束光干涉形成干涉条纹,经成像系统成像在探测器上^[17]。

表1 轨道参数及系统参数
Table 1 Orbit parameters and system parameters

Parameter index	Parameter value
Orbit altitude	500 km
Orbit inclination	58°
Eccentricity	0
Right ascension of ascending node	10°
Argument of perigee	0
Range of observation	60~90 km
Field of view	0.72°×3.6°
Characteristic wavelength	865~869 nm

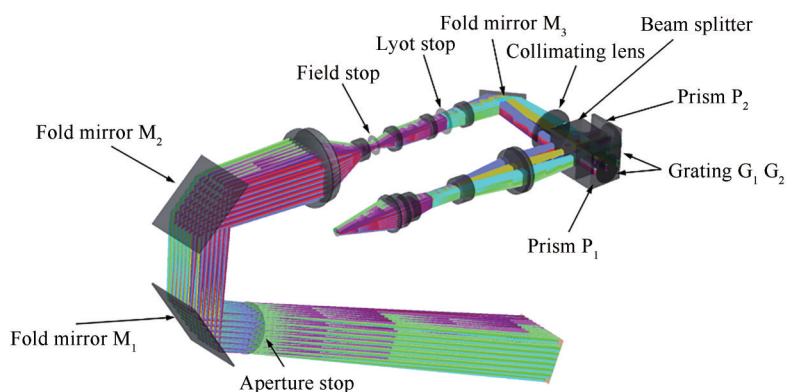


图2 多普勒差分干涉仪光学系统

Fig.2 Optical system of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

2 系统杂散光特性及抑制方法研究

本仪器中的杂散光按照来源可以分为视场外非成像杂散光和视场内成像杂散光。视场外非成像杂散光主要是低层大气背景辐射,根据其能量随高度的变化设计遮光罩来抑制。视场内成像杂散光包括鬼像和闪耀光栅非工作级次的衍射能量,根据其杂光路径分析来设计抑制结构。

2.1 视场外非成像光抑制

星载多普勒差分干涉仪对60~90 km中层大气风场探测时,将受到视场外大气背景辐射的影响,尤其是低层大气的杂散辐射,这部分到达像面形成光噪声的杂散光,即为视场外非成像杂散光^[18]。

基于观测模式选取典型大气环境,使用Modtran分别在春分、夏至、秋分、冬至四个时段计算大气背景辐射,结果如图3所示。

图3中切线高度为负值表示观测方向与地球相交,可以看出,在高度100 km以内,气辉强度随高度降低

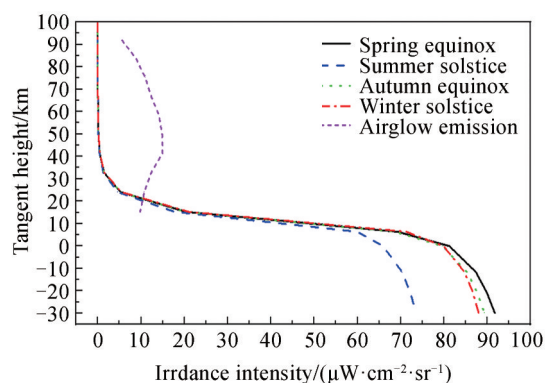


图3 大气背景辐射强度与气辉强度

Fig.3 Atmospheric background radiation intensity and airglow intensity

先增强后减弱,观测范围60~90 km内气辉平均辐亮度 $L = 10.367 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$;大气背景辐射强度随观测高度降低持续增强,20 km以下大气背景辐射强度将达到观测范围内气辉平均辐亮度的1~8倍,故需要防止20 km以下低层大气背景辐射直接射入仪器入瞳。

为抑制低层杂散光,在光学系统入瞳外添加遮光罩。遮光罩取不同长度时到达入瞳的大气背景辐射强度与目标气辉强度如图4所示,遮光罩越长,大气背景辐射抑制效果越好,但遮光罩长度大于800 mm后,由于较高层大气背景辐射较弱,抑制效果增强并不明显。结合图3,选择20 km为抑制的云顶高度,观测视场下边界与卫星运动方向夹角 $\alpha_1 = 20.61^\circ$,仪器观测20 km云顶高度与卫星运动方向夹角 $\alpha_2 = 21.54^\circ$,遮光罩杂散光抑制角 $\theta = \alpha_2 - \alpha_1 + 0.36^\circ = 1.28^\circ$,图5(a)为一级遮光罩几何结构。

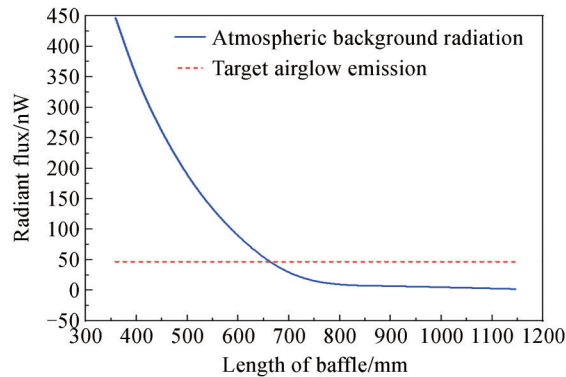


图4 到达入瞳的大气背景辐射强度

Fig.4 Atmospheric background radiation reaching the entrance pupil

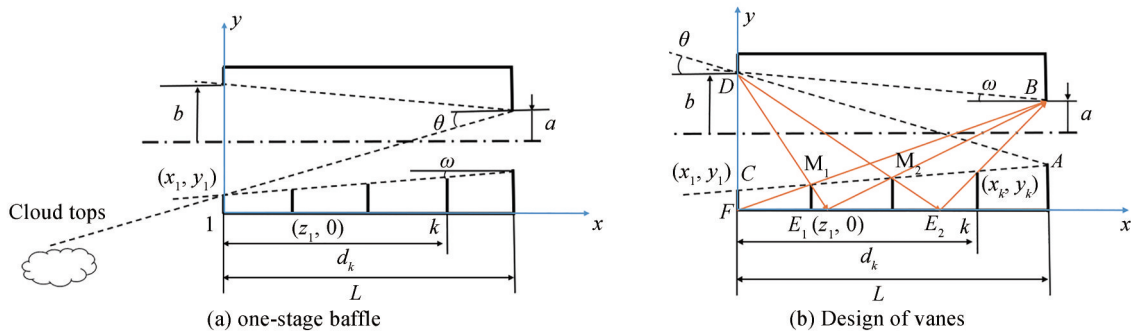


图5 遮光罩设计原理

Fig.5 Design principle of the baffle

图5中, a 为光学系统孔径光阑半径, ω 为光学系统视场角, θ 为杂散光抑制角, L 为遮光罩总长,它们之间关系为

$$L = \frac{2a}{\tan \theta - \tan \omega} \quad (1)$$

$$b = a + L \tan \omega \quad (2)$$

为提高遮光罩的抑制效果,在遮光罩内壁上设置挡光环结构以拦截经遮光罩内壁散射进入光瞳的一次散射杂光。设置挡光环能保证当大离轴角光线照射到遮光罩内时,至少需要经过两次散射才能进入光学系统,如图5(b)所示。在遮光罩内添加9个挡光环,设计结果如图6所示。

在此基础上为进一步抑制两次及以上散射光,对遮光罩和挡光环内壁进行染黑处理,以增大吸收率,降低散射和反射的能量,提升杂散光抑制性能。

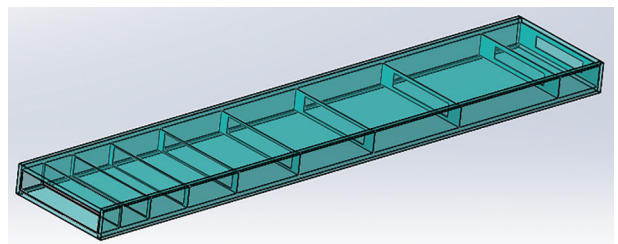


图6 遮光罩设计结构

Fig.6 Baffle geometry

2.2 视场内成像杂散光抑制

星载多普勒差分干涉仪中,由于光学元件表面的反射导致部分成像光线在光学系统内部以非正常光路到达像面,形成光噪声的杂散光,即为视场内成像杂散光,星载多普勒差分干涉仪中的视场内成像杂散光主要有两种:1) 系统内关键面反射和散射的光线形成的鬼像;2) 闪耀光栅非工作级次能量。

在遮光罩和挡光环设计的基础上,建立多普勒差分干涉仪三维模型,进行适当简化以减少表面数量,并对模型进行材料和表面参数设置,如表2所示,多普勒差分干涉仪三维模型如图7所示。

表2 仿真模型中的表面参数设置
Table 2 Surface property setting in simulation mode

Surface type	Transmittance/%	Absorptance/%	Specular reflectivity/%	BRDF/%	Scatter model
Lens surface	98.37	1	0.05	0.13	Lambertian
Reflector surface	0	5	94.87	0.13	Lambertian
Interferometer beam splitter	45	10	45	0.13	Lambertian
+1 grating efficiency	0	25	75	0.13	Lambertian
Blackened non-working surface	0	90	0.001	9.999	Lambertian

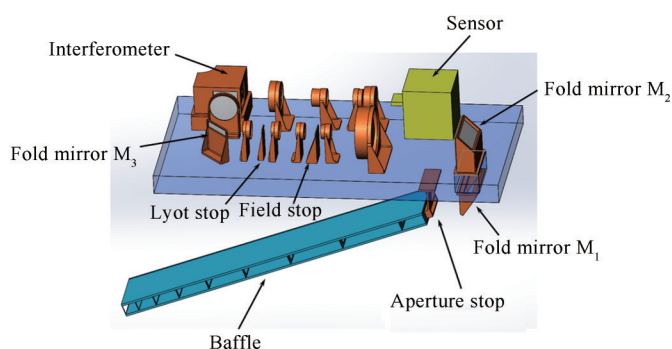


图7 多普勒差分干涉仪三维模型

Fig.7 3D model of Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

为分析系统内可能产生的鬼像,根据建立的三维模型,在不同视场下建立光源,使每个光源入射光都能覆盖整个遮光罩入口。尽量增加单个光源光线数量并降低光线追迹阈值数值,使探测器能够接收到足够数量的光线以确保分析的准确性。经过分析杂散光光路,发现系统内产生成像杂散光的关键面为透镜3表面 and 视场光阑的机械表面,光路图如图8所示。

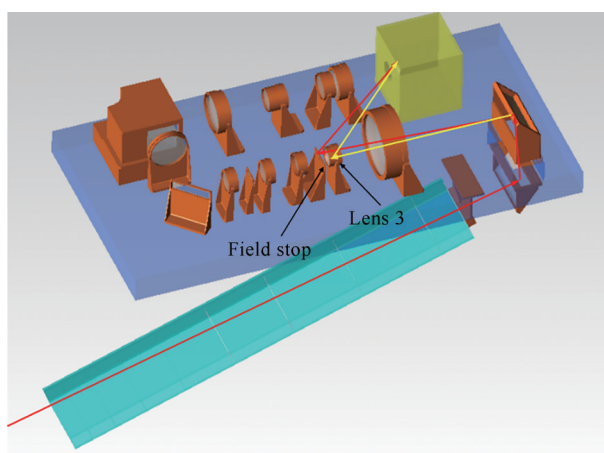


图8 系统内关键面产生杂散光光路

Fig.8 Stray light caused by the key surfaces

成像光经透镜3和视场光阑散射直接到达探测器,为抑制这部分杂散光,在不遮挡成像光线的前提下,在探测器外壳添加遮光罩,并将遮光罩内表面加工成锯齿形,且锯齿面朝外,如图9所示。

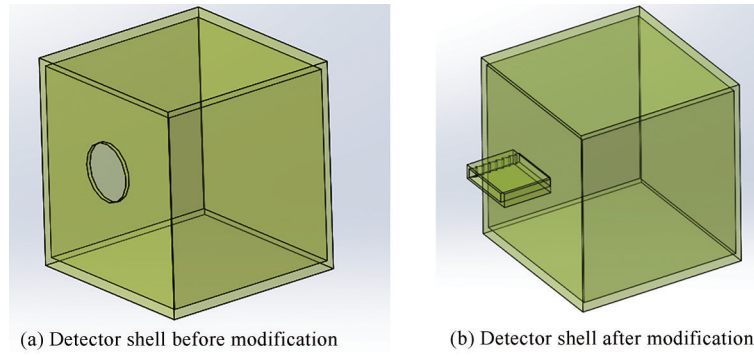


图9 探测器外壳
Fig.9 Detector shell

由于闪耀光栅的工作特性,非工作级次能量也会以一定夹角随工作级次能量返回光路,需要使用光阑遮挡,如图10所示。初步确定光阑位置和宽度,为计算方便,不考虑扩视场棱镜的折射。

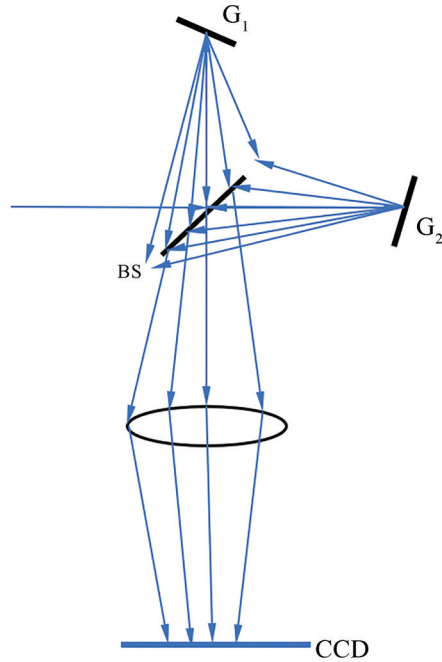


图10 光栅多级衍射
Fig.10 Multistage diffraction of grating

入射光线以 Littrow 角入射闪耀光栅,波数为 σ 的光线的出射角 γ 由光栅方程决定,在 0 视场下,根据光栅方程可计算出级次衍射 m 的光线与工作级次光线的夹角 γ ,即

$$\gamma = \delta - \arcsin\left(\frac{m}{d\sigma} - \sin\delta\right) \quad (3)$$

式中, d 为光栅刻线宽度, Littrow 角 δ 为光栅倾斜角。

光源半径为 D , 要在与光栅距离为 L 处设置光阑遮挡非工作级次能量, 则光阑宽度应为^[19]

$$2R = 2D + 2L \tan|r| \quad (4)$$

在视场 ω 下, 用 $\omega + \delta$ 代替 δ , 在与光栅距离为 L 处设置的光阑宽度为

$$R' = \frac{D}{\cos\omega} + L \tan r' = \frac{D}{\cos\omega} + L \tan \left\{ \delta + \omega - \arcsin \left[\frac{m}{d\sigma} - \sin(\omega + \delta) \right] \right\} \quad (5)$$

用 400 lp/mm 闪耀光栅研究多普勒差分干涉仪, 工作级次为 +1 级, 首先对 0 视场下光源进行仿真, 光路如图 11 所示, 像面照度如图 12 所示。

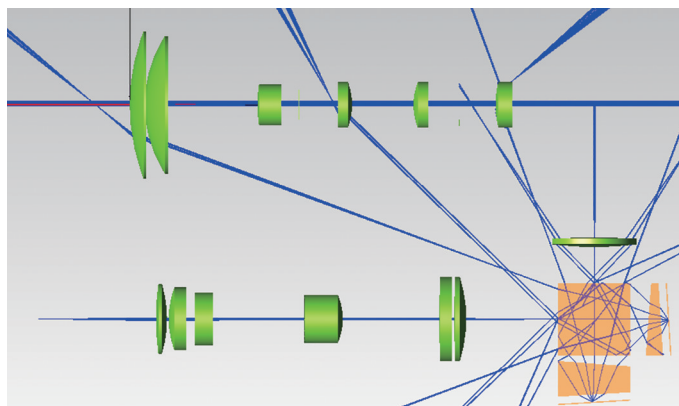


图 11 多普勒差分干涉仪 0 视场衍射光路

Fig.11 Diffraction light of the Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer on axis field

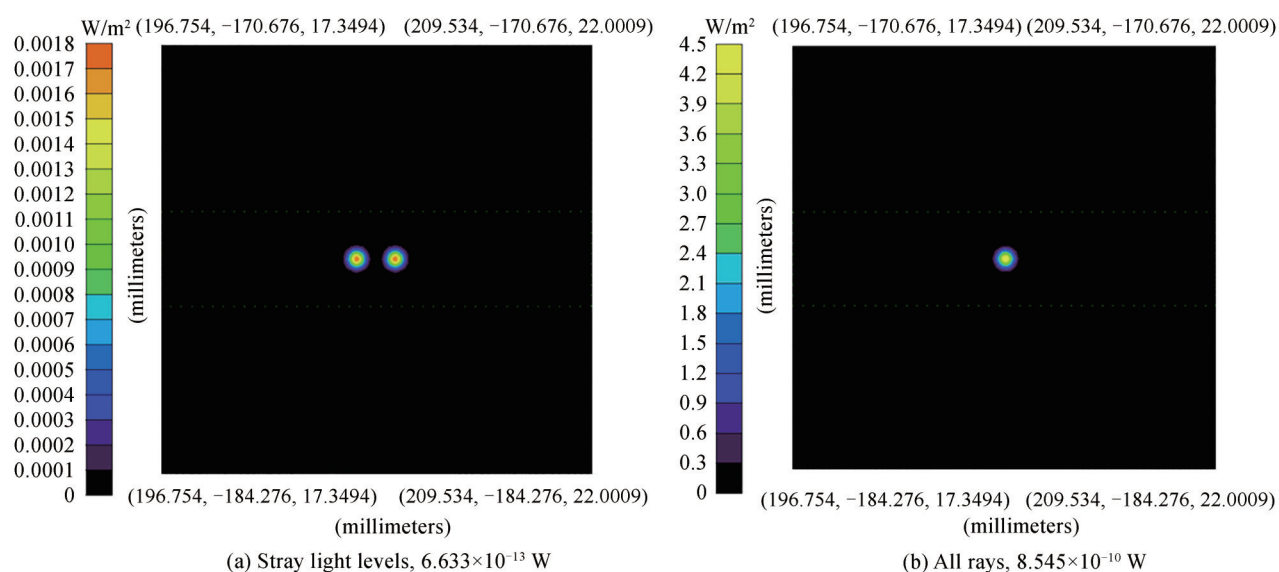


图 12 0 视场仿真像面照度

Fig.12 Simulated irradiance map of sensor on axis field

结果表明,0 视场下该干涉仪非工作级次能量不能直接到达像面,非工作级次能量经反射或散射后达到像面的能量占像面总能量的 0.08%,仿真其他视场也没有出现非工作级次能量直接到达探测器的情况。经分析,该闪耀光栅工作级次为 +1 级,工作级次较低,非工作级次光线与工作级次光线夹角 γ 较大,不能随成像光直接到达像面,没有对成像产生明显影响。

3 杂散光抑制效果仿真分析

对视场外非成像杂散光,计算 PST 来评价抑制效果。PST 表征光学系统对不同入射角度下杂散光线的抑制能力,是评价一个光学系统消视场外杂散光能力的主要指标。PST 与杂散光源本身的辐射强度无关,它是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。PST 越小,光学系统视场外非成像杂散光抑制能力越强。

用仿真像面照度图来评价视场内成像杂散光抑制效果。视场内成像杂散光包括视场内大气背景辐射和其他成像杂散光,计算多普勒差分干涉仪观测范围内气辉和大气背景辐射强度,在分析软件中建立模拟光源,仿真工作状态下像面照度和无背景辐射无鬼像时的像面照度,通过像面能量中杂散光占比评价视场内成像杂散光抑制效果。

3.1 视场外非成像杂散光抑制效果

本文消除视场外杂散光的手段为遮光罩和视场光阑,使用PST评价这两个结构的抑制效果。由于孔径光阑为方形,为得到较全面的PST数值,对三个方向的视场角进行了PST仿真,参考坐标如图13所示, φ 为 XOY 平面内相对于光轴(Z 轴)转过的方位角。PST分析方向为水平方向($\varphi=0^\circ$),竖直方向($\varphi=90^\circ$)和孔径光阑对角线方向($\varphi=11.31^\circ$)。

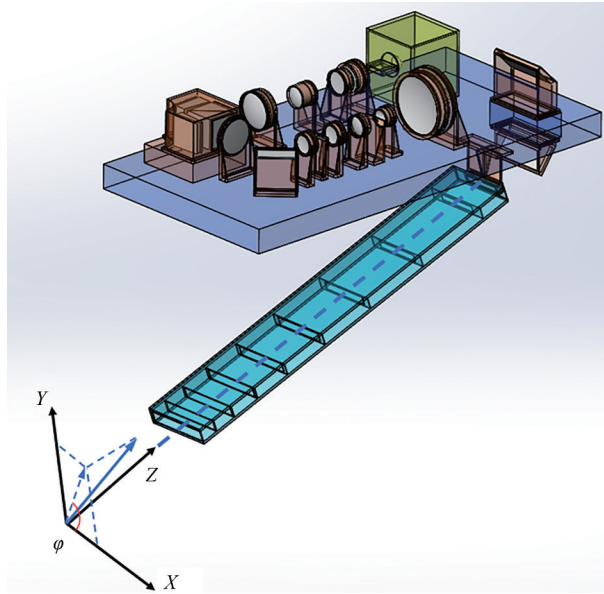


图13 多普勒差分干涉仪参考坐标系

Fig.13 Reference frame of the Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

每个视场像面照度仿真值与光学入口照度仿真值的比值即为该视场下的PST,在 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=11.31^\circ$ 两个方向每隔 0.1° 取一个视场,各取81个视场,分布范围为 $-4^\circ\sim 4^\circ$,在 $\varphi=90^\circ$ 方向上每隔 0.05° 取一个视场,共取61个视场,分布范围为 $-1.5^\circ\sim 1.5^\circ$,根据仿真结果绘制PST曲线,如图14所示。

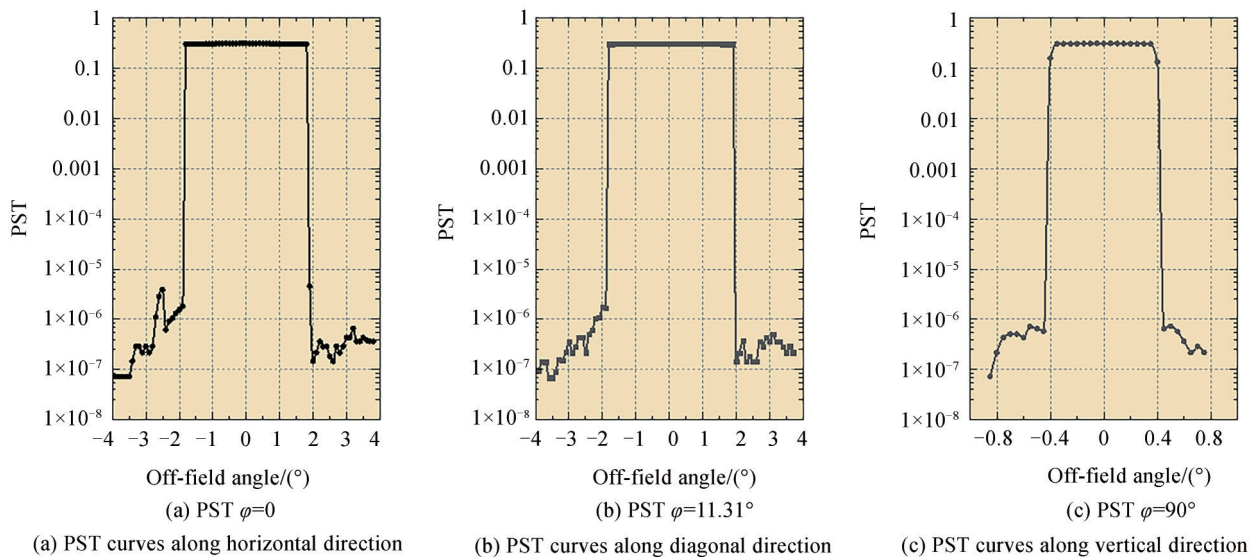


图14 多普勒差分干涉仪PST曲线

Fig.14 PST curves of the Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer

由 PST 仿真结果可知, $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 11.31^\circ$ 两个方向, 视场外 0.2° 处, 多普勒差分干涉仪 PST 下降到 10^{-5} 以下; $\varphi = 90^\circ$ 方向, 视场外 0.04° 处, 多普勒差分干涉仪 PST 下降到 10^{-5} 以下, 视场内 PST 均稳定在 0.3 左右。结果表明, 设计的遮光罩和视场光阑配合表现出很好的视场外杂散光抑制能力, 且没有遮挡成像光线。

3.2 全视场杂散光抑制效果

在辐射传输模型中计算得到的大气背景辐射和气辉强度均为孔径光阑接收到的辐亮度值。辐亮度为离开或到达某一表面, 单位立体角和单位投影面积内的辐通量, 即

$$L_e = \frac{d\Phi_e}{\cos\vartheta dA d\Omega} \quad (6)$$

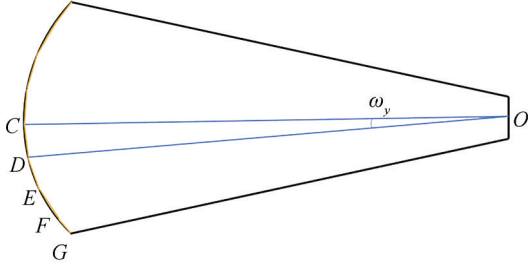


图 15 观测范围分区示意图
Fig.15 Division of observation area

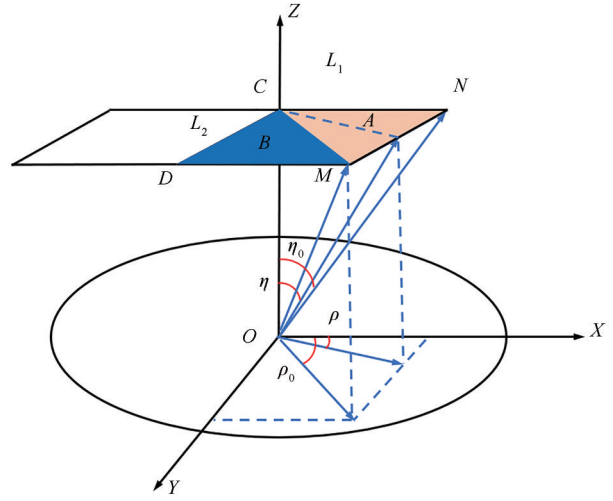


图 16 CD 段对 O 点立体角计算示意图
Fig.16 Solid angle of CD for O

式中, $d\Phi_e$ 为元立体角 $d\Omega$ 内接收的辐通量, dA 为接收面积, ϑ 为接收面积表面法线和辐射传输方向的夹角。

大气背景辐射和气辉强度在竖直方向上变化较大, 在水平方向近似不变。为方便仿真, 将气辉光源在竖直方向上按视场角 $-0.36^\circ \sim -0.3^\circ$ 、 $-0.3^\circ \sim -0.2^\circ$ 、 $-0.2^\circ \sim -0.1^\circ$ 、 $-0.1^\circ \sim 0^\circ$ 、 $0^\circ \sim 0.1^\circ$ 、 $0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ 、 $0.2^\circ \sim 0.3^\circ$ 、 $0.3^\circ \sim 0.36^\circ$, 分为 8 个区域, 如图 15 所示。将大气背景辐射在竖直射场 $-2.4^\circ \sim 0.6^\circ$ 等分为 30 个区域。各部分分别求取对孔径光阑的立体角, 孔径光阑上 O 点对视场 CD 的立体角计算如图 16 所示。

MNCD 为 O 点在视场 ω_y 内的一半观测区域, 将 MNCD 沿对角线分为 A、B 两部分, A 部分对 O 点立体角表示为

$$L_1 = OC \tan \omega_x \quad (7)$$

$$\tan \eta = \frac{L_1}{\cos \rho \times OC} \quad (8)$$

$$\Omega_A = \int_0^{\rho_0} \int_0^{\eta} \sin \eta d\eta d\rho = \int_0^{\rho_0} \left[1 - \cos \arctan \left(\frac{\tan \omega_x}{\cos \rho} \right) \right] d\rho \quad (9)$$

式中, ω_x 为 O 点对 CD 区域的水平视场角, L_1 为 CM 长度, η 为 CD 面在方位坐标系中的范围, ρ 为 CD 面在仰角坐标系内的范围, Ω_A 为 A 部分对应 O 点的立体角。

B 部分对 O 点立体角为

$$\Omega_B = \int_{\rho_0}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\eta} \sin \eta d\eta d\rho = \int_0^{\rho_0} \left[1 - \cos \arctan \frac{\tan \omega_y}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - \rho \right)} \right] d\rho \quad (10)$$

式中, ω_y 为 O 点对 CD 区域的水平视场角和竖直射场角, Ω_B 为 B 部分对应 O 点的立体角。

O 点对视场 CD 的立体角为

$$\Omega = 2\Omega_A + 2\Omega_B \quad (11)$$

星载多普勒差分干涉仪在竖直方向上视场角为 0.72° , CD 段视场角为 0.1° , 孔径光阑上各点对应 CD 区域的立体角近似相同, 带入式(6)即可计算 CD 区域光源强度。

计算各区域大气背景辐射和气辉的光源强度后, 像面照度仿真结果如图17所示。

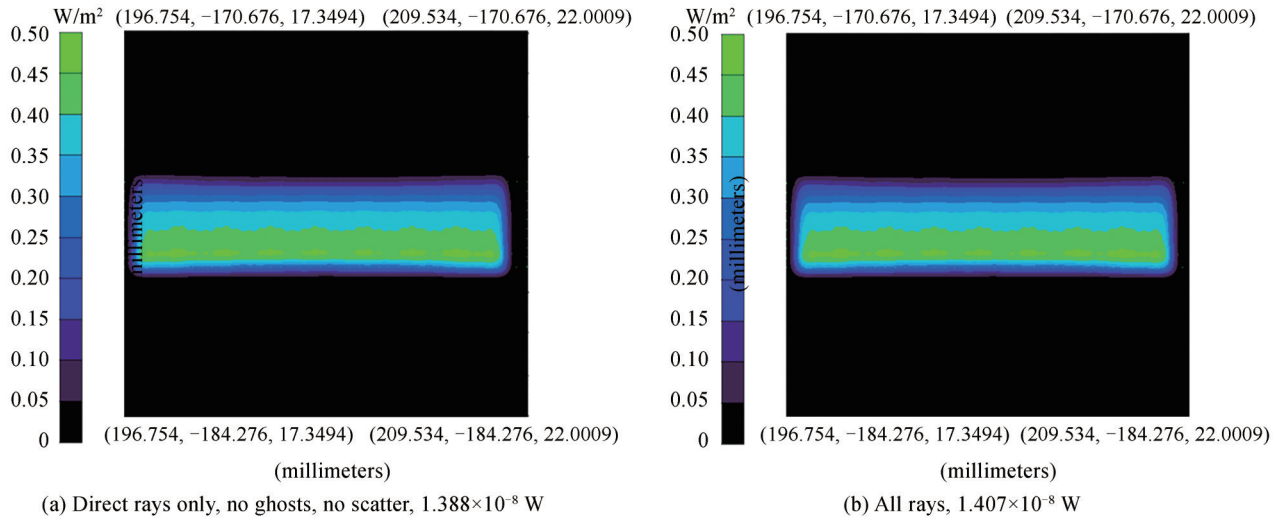


图17 仿真像面照度

Fig.17 Simulated irradiance map of sensor

由仿真结果可知, 像面总能量为 $1.407 \times 10^{-8} \text{ W}$, 气辉成像光通量为 $1.388 \times 10^{-8} \text{ W}$, 大气背景辐射和鬼像仅占像面总能量的1.35%, 杂散光抑制效果很好。

PST分析和像面照度仿真结果表明, 本文建立了正确的杂散光分析模型, 在此基础上提出了有效的杂散光抑制措施, 满足星载多普勒差分干涉仪对杂散光抑制的技术要求。

4 结论

本文以典型卫星轨道的用于中层大气风场探测的近红外多普勒差分干涉仪系统为研究目标, 分析了其杂散光来源及特性。针对视场外非成像杂散光, 设计了遮光罩和挡光环加以抑制。针对成像杂散光, 分析了光学系统内产生杂散光的关键面, 修改探测器外壳结构; 仿真结果表明, 闪耀光栅非工作级次能量无法直接到达探测器。PST曲线表明, 在水平方向和对角线方向的视场外 0.2° 处, 以及竖直方向的视场外 0.04° 处, 多普勒差分干涉仪PST下降到 10^{-5} 以下。像面照度图表明大气背景辐射和鬼像能量占像面能量的1.35%。所提杂散光抑制措施有效, 能够满足星载多普勒差分干涉仪对杂散光抑制的技术要求, 可为此类仪器的杂散光设计提供思路。

参考文献

- [1] FENG Yutao, WU Kuijun, FU Di, et al. Feasibility of satellite-borne wind observation of stratosphere and mesosphere based on emission line $O_{19}P_{18}$ of $O_2(a^1\Delta_g)$ [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(2): 0201001.
冯玉涛, 武魁军, 傅頔, 等. 基于氧分子 $O_2(a^1\Delta_g)$ $O_{19}P_{18}$ 发射谱线的平流层、中间层大气风场探测可行性探讨[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 0201001.
- [2] JIANG Tong, SHI Hailiang, SHEN Jing, et al. Experimental study on wind field simulation of asymmetric spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(7): 0701001.
姜通, 施海亮, 沈静, 等. 非对称空间外差光谱仪风场模拟探测实验研究[J]. 光子学报, 2018, 47(7): 0701001.
- [3] HANG Guangming, YU Jiancheng, FANG Zhonghua, et al. Pixel-quantization and its influence for remote sensing image [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(11): 2172-2176.
张光明, 俞建成, 方中华, 等. 卫星遥感图像的量化等级确定及影响因素分析[J]. 光子学报, 2007, 36(11): 2172-2176.
- [4] WU Jun, LI Na, YUE Chunyu, et al. Method for in-orbit optical axis pointing calibration of micro-nano remote sensing camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9): 0912001.

- 吴俊,李娜,岳春宇,等.微纳遥感相机在轨光轴指向标定方法[J].光子学报,2019,48(9):0912001.
- [5] FENG Yutao, LI Juan, ZHAO Zengliang, et al. Development of interferometric spectroscopy for atmosphere wind observation based on satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(3):14-26.
冯玉涛,李娟,赵增亮,等.大气风场探测星载干涉光谱技术进展综述[J].上海航天,2017,34(3):14-26.
- [6] ENGLERT C R, HARLANDER J M, BABCOCK D D, et al. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): an innovative concept for measuring winds in planetary atmospheres[C]. SPIE, 2006, 6303: 63030T.
- [7] MCLANDRESS C, SHERPHERD G G, SOLHEIM B H, et al. Combined mesosphere thermosphere winds using WINDII and HRDI data from the upper atmosphere research satellite[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D6): 10441-10453.
- [8] HAYS P B, KAFKALIDIS J F, SKINNER W R, et al. A global view of the molecular oxygen night airglow[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D20): 4646.
- [9] KILLEEN T L, WU Q, SOLOMON S C, et al. TIMED Doppler interferometer: overview and recent results[J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 2006, 111(A10): 1-19.
- [10] PAUL B H, VINCENT J A, MICHAEL E D, et al. The high-resolution doppler imager on the upper atmosphere research satellite[J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 1993, 98(D6): 10713-10723.
- [11] CHRISTOPHER R B, LEE E, ARWYN O J, et al. Thermal imager for dismounted infantry[C]. SPIE, 2004, 5612: 159-171.
- [12] CHRISTOPHER R B, LEE E, ARWYN O J, et al. VIPIR and VIPIR-S: next generation infantry thermal sights[C]. SPIE, 2005, 5783: 863-874.
- [13] GAULT W A, BRUN J F, DESAULNIERS D L, et al. Design and on-orbit performance of the WINDII baffle system [C]. SPIE, 1992, 1753: 189-195.
- [14] CHRISTOPH R E, HARLANDER J M, BROWN C M, et al. Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): instrument design and calibration[J]. Space Science Reviews, 2017, 212(1/2): 553-584.
- [15] HARDING B J, MAKELA J J, ENGLERT C R, et al. The MIGHTI wind retrieval algorithm: description and verification[J]. Space Science Reviews, 2017, 212: 585-600.
- [16] ZHANG Jing, WANG Shurong, HUANG Yu, et al. Status and development of limb imaging spectrometers[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 692-700.
张晶,王淑荣,黄煜,等.临边成像光谱仪的发展现状与进展[J].中国光学,2013,6(5):692-700.
- [17] FENG Yutao, SUN Jian, LI Yong, et al. Broad-band spatial heterodyne interferometer spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 48-55.
冯玉涛,孙剑,李勇,等.宽谱段空间外差干涉光谱仪[J].光学精密工程,2015,23(1):48-55.
- [18] MEI Chao. The study of stray light analysis and suppressing technology in large pupil multi-spectral zoom optical system [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2014.
梅超.大口径多光谱变焦光学系统杂散光分析与抑制技术研究[D].北京:中国科学院大学,2014.
- [19] LI Yuanhe, YANG Chao, XUE Xichang. Stray light analysis and control of grating multistage diffraction in HRS[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 391-398.
李员赫,杨超,薛常喜.空间外差拉曼光谱仪的光栅多级衍射杂散光分析与抑制方法[J].光学学报,2019,39(6): 391-398.

Stray Light Characteristics and Suppression in Space-borne Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer

LI Junjie^{1,2}, SUN Jian¹, ZHAO Hengxiang¹, CHANG Chenguang^{1,2}, FU Di^{1,2}, ZHAO Hao¹,
BAI Lu³, FENG Yutao¹

(1 Xi'an Institute of Optics Precision Mechanic of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Wind detection in middle and upper atmosphere is an important way to characterize atmospheric environment and atmospheric dynamics, which is significant for accurate weather forecast and smooth operation of aerospace missions. Satellite remote sensing of the atmospheric wind field is not limited by

weather and geographical conditions, and can be used for global all-weather remote sensing observation. More importantly, using limb viewing geometry can provide long-term observation results of the global horizontal wind field and temperature distribution, which is necessary for studying large-scale and long-term space climate. Compared with Michelson interferometer and Fabry-Perot interferometer, the Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer has higher sensitivity, no moving parts and lower processing accuracy requirements. These advantages can greatly improve the performance of the system, and are very suitable for wind field detection activities in the middle and upper atmosphere. The space-borne wind interferometer is designed to detect the weak airglow emissions employing limb viewing geometry, which can be easily affected by background radiation from the lower atmosphere. The earth's atmosphere is composed of a variety of gases and aerosol particles. These components enable the atmosphere to absorb and scatter the incident solar radiation, which constitutes the atmospheric background radiation. The stray light will degrade the quality of the original interferogram data, decreasing the contrast and effective signal-to-noise ratio. This paper uses a satellite based on 500 km orbital altitude to measure the winds in the middle atmosphere at the height of 60~90 km, and the typical atmospheric background radiation and airglow radiation intensity are selected. The detection range of the above loads is in the upper atmosphere, and the observation of wind field in the middle atmosphere (60~90 km) will put forward higher requirements for the suppression of stray light. In addition, the multistage diffraction energy of Doppler interferometer should be analyzed. According to the atmospheric background radiation intensity at different altitudes, combined with the optical system parameters, the baffle is designed. The primary purpose of the baffle is the suppression of signal that originates from angles outside the field of view since the illuminated earth's disk and the sun represent light sources that are many orders of magnitude brighter than the targeted airglow emissions, and during the day, the bright earth is always close to the fields of view. The adopted criterion is that the entrance aperture in front of the first lens should not receive light directly from the sunlit cloud tops, which is assumed to be 20 km altitude. In order to suppress the stray light in the field of view, the optical system is simulated to find the key surfaces which can cause the ghost image in the interferometer and the suppression structure is made. For the stray light of the interferometer multistage diffraction, simulation of rays tracing is taken to evaluate the influence on imaging. In order to evaluate the stray light suppression effect, point source transmittance analysis and illumination simulation are taken. The point source transmittance is the ratio of the illuminance at the image surface to the illuminance at the entrance pupil. The image surface illuminance map is obtained by simulating the airglow light source and the atmospheric background radiation light source. Through point source transmittance analysis and illumination simulation, the following conclusions are obtained. First, in the horizontal and diagonal directions, the point source transmittance drops below 10^{-5} at 0.2° outside the field of view, and in the vertical direction, the point source transmittance drops below 10^{-5} at 0.04° outside the field of view. Second, the atmospheric background radiation and ghost image account for 1.35% of the total energy of the image. The results show that the proposed stray light suppression method is effective and meets the requirements of the satellite-borne Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer.

Key words: Applied optics; Stray light suppression; Baffle design; Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer; Atmospheric background radiation

OCIS Codes: 290.2648; 290.2745; 290.1310