

天基电离层气辉成像仿真分析研究

李政^{1, 2, 3}, 涂翠^{1, 2, 3*}, 吴小成^{1, 2, 3}, 胡雄^{1, 3}

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院空间环境态势感知重点实验室, 北京 100190

摘要 通过气辉成像仪对电离层气辉进行探测, 能够反映电离层中电子总含量、等离子体泡分布等特性, 是有效的电离层探测方式之一。电离层的原子分子在白天吸收太阳辐射激发到较高能态, 在夜间以气辉的形式将能量辐射出去, 辐射强度与所参与反应的电离层成分密度等密切相关, 因此气辉是用来观测电离层很好的示踪物。天基气辉成像方法具有全球范围观测的巨大优势, 为了推动天基成像仪的设计研制和参数优化, 丰富和扩展电离层探测手段, 需要对全球气辉强度进行成像仿真分析。该研究主要工作: (1) 分析了电离层夜间 630 nm 光化反应过程, 设计了一种气辉成像仿真分析方法, 该方法对 630 nm 辐射强度进行计算, 分别获得了太阳活动高年和低年内四个不同季节的气辉单光谱信号源强度分布, 为设定探测指标提供理论依据; (2) 开展了 630 nm 气辉天底成像仿真研究, 包括成像链路分析、信噪比分析, 并使用一个时间延时积分成像的典型成像仪参数, 开展结合卫星运行轨道的扫描成像仿真。本文主要结论: (1) 夜间 630 nm 单光谱气辉强度与日间太阳辐射强度关系密切, 太阳活动高年夜半球平均辐射强度为 115 Rayleigh, 太阳活动低年夜半球平均辐射强度为 50 Rayleigh, 辐射大小和分布符合卫星载荷 GLO-1 和国际空间站 IMAP 任务的实际观测结果; (2) 典型参数成像仪天底观测幅宽达到 245 km, 气辉水平分辨率达到 1 km, 对强度大于 50 Rayleigh 气辉成像的信噪比优于 10, 在太阳活动高年能够清晰观测电离层气辉全球尺度结构, 在太阳活动低年能够观测低纬地区电离层气辉结构。该研究结果可为天基电离层气辉成像探测提供理论依据, 也可可为其他辐射波段的气辉观测和成像仪参数设计优化提供参考。

关键词 天基成像仪; 电离层; 气辉; 成像仿真

中图分类号: P356

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)03-0828-07

引言

电离层环境是日地空间环境的重要组成部分, 电离层气辉是分布于全球全时段的信号源, 通过天基成像仪对电离层环境中的气辉进行观测, 能够反映电离层特性如电子总含量、重力波和等离子体泡分布等, 是有效的电离层探测方式^[1-2]。天基观测的特点决定了它具有全球范围观测的优势, 且收到的信号几乎不被地球大气吸收。

国外对电离层气辉的天基观测方式早已开展, 如 2002 年搭载于 TIMED 卫星上的 GUVI 通过对电离层 135.6 nm 临边单光谱辐射的探测反演夜间电子浓度剖面^[3]。2004 年 Formosat-2 卫星上的 ISUAL 成像仪为研究 F 层电离层的物

理过程, 首次对 630 nm 气辉进行临边成像观测^[4]。2012 年在国际空间站上实施的 ISS-IMAP 任务利用两个独立的光谱仪 VISI 和 EUVI, 分别用来观测可见近红外气辉和极紫外气辉^[5], 获得的数据用来研究等离子体泡等电离层扰动现象。我国对电离层气辉探测也进行了研究, 搭载于 FY-3(04) 卫星上的电离层光度计是我国第一台天基电离层光学遥感载荷, 该光度计通过对电离层 135.6 nm 和 N₂ LBH 带辐射强度的探测, 获得了星下点电离层电子密度 TEC、N_mF2 以及氧氮比等信息^[6]。目前国外天基气辉观测多使用光谱仪, 光谱仪设计复杂、成本高昂, 而国内天基电离层光度计难以获得空间二维信息。开展天基气辉成像仪的研究, 实现电离层的二维成像观测, 将为电离层探测研究提供更全面的资料, 具有重大科学和应用价值。电离层气辉有 135.6 和 630 nm

收稿日期: 2021-02-01, **修订日期**: 2021-04-23

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA17010301)和国家自然科学基金项目(41204137)资助

作者简介: 李政, 1996年生, 中国科学院国家空间科学中心硕士研究生 e-mail: lizheng182@mails.ucas.ac.cn

* 通讯作者 e-mail: tucui@nssc.ac.cn

两个主要观测波段，其中 630 nm OI 气辉是中纬度夜间最强的可见光气辉波段之一，该波段辐射强度变化与电离层 F2 层高度的电子密度和中性成分变化密切相关，选择对该波段气辉进行分析，并给出了结合成像仪和轨道参数的气辉天底成像仿真，仿真结果有利于推动天基成像仪的设计研制和参数优化，有利于丰富和扩展电离层探测手段。

1 天基电离层气辉成像原理

在卫星上开展电离层气辉成像观测时，如图 1 所示，成像仪在气辉距离 H 处上方以相对速度 v 运动，并以视场角 θ 对幅宽为 w 的气辉进行扫描成像，单个像元对应的气辉水平宽度为水平分辨率 a ，成像仪光学系统内部带有滤光片，只让特定波段的光通过以滤除杂光。气辉信号(光子数)通过镜头聚焦于焦平面上的 CCD(charge-coupled device)，CCD 将光子数转换为电信号，从而记录气辉的二维信息。由于卫星的高速运动，在卫星上开展对地成像观测，必然会引起成像模糊，降低成像分辨率。只有尽可能缩短曝光时间，才能提高成像分辨率。但缩短曝光时间，又会导致相机收集到的信号强度减弱，降低信噪比。为解决这一难题，需采用时间延时积分成像方式 TDI(time delay and integration)，该成像方式可以极大提高信噪比。

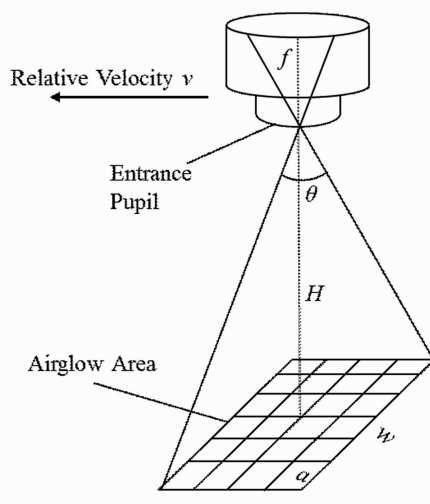


图 1 天气气辉成像仪成像示意图

Fig. 1 Imaging diagram of space borne airglow imager

根据上述原理，开展电离层气辉成像仪成像仿真，需进行以下分析：(1) 计算电离层气辉辐射强度；(2) 分析成像仪光学系统的信号收集能力；(3) 分析成像仪的电子学性能。综合以上分析，给出电离层气辉成像仪的设备参数优化和性能评估。

2 气辉辐射强度仿真分析

2.1 气辉辐射强度计算理论

630 nm 辐射源于电离层氧原子¹D 态至³P 的辐射跃迁，

¹D 态氧原子有两个来源：(1) 主要来源为夜间电离层中 O_2^+ 的解离性复合^[7]： $O_2^+ + e \rightarrow O(^1D, ^1S) + O(^3P)$ ；(2) 在 NO^+ 的解离性复合中也会产生少量 $O(^1D)$ ，反应为： $NO^+ + e^- \rightarrow N(^2D) + O$ ， $N(^2D) + O_2 \rightarrow NO + O(^1D)$ 。主要分布在 150~350 km 高度，峰值高度在 250 km 附近。

电离层中 630 nm 波段气辉辐射是各向同性的，使用体辐射率(volume emission rate, $V(h)$)来表示电离层中单位体积的气辉辐射大小，单位为 $\text{photons} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。使用辐射强度(radiation intensity, I)表示单位面积的气辉辐射大小，单位为 Rayleigh^[8]，1 Rayleigh = $10^6 \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。卫星对气辉进行天底观测，观测到的气辉强度 I 是对体辐射率 $V(h)$ 的垂直路径积分效应，气辉强度 I 仍然具有各向同性性质。以 Rayleigh 为单位表示， I 可由式(1)得出， h_{SAT} 为卫星海拔高度

$$I = 10^{-6} \int_0^{h_{SAT}} V(h) dh \quad (1)$$

对于气辉体辐射率的计算，我们利用 Vlasov 等提出的体辐射率公式^[9]，该公式综合考虑了电离层分子离子的影响

$$V(h) = \frac{A_{1D} \left\{ \mu_D \alpha_{O_2^+} [O_2^+] n_e + \frac{\beta_{NO^+} [NO^+] n_e \gamma_D [O_2]}{\gamma_D [O_2] + \gamma_O [O]} \right\}}{k_1 [N_2] + k_2 [O_2] + k_3 [O] + A_{1D} + A_{2D}} \quad (2)$$

式中括号代表括号内分子离子的数密度。公式中涉及到的参数列于表 1^[9]。

表 1 体辐射率公式参数数值

Table 1 Parameters value

参数	数值
跃迁系数 A_{1D}	$7.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
跃迁系数 A_{2D}	$2.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
量子产率 μ_D	1.3
收率 $\beta^{[10]}$	$76\% \pm 6\%$
反应系数 k_1	$2 \times 10^{-11} \exp(107.8/T_n) \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
反应系数 k_2	$2.9 \times 10^{-11} \exp(67.5/T_n) \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
反应系数 k_3	$(3.730 + 0.11965T_n^{0.5} - 6.5898 \times 10^{-4} T_n) \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
速率系数 $\gamma_D^{[11]}$	$6 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
速率系数 $\gamma_O^{[11]}$	$5 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
速率系数 $\alpha_{O_2^+}$	$1.95 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
速率系数 α_{NO^+}	$3.5 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.69} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

反应系数 k 与速率系数 α 的计算涉及到中性物质温度 T_n 、电子温度 T_e ，体辐射率式(2)涉及到电子数密度 n_e 、分子和离子数密度，这些参数会随时间和空间不断变化。利用国际电离层经验标准模型 IRI2016 计算得到两种温度、电子、氮离子、氧离子和氧原子离子数密度，利用大气模型 NRLMSISE-00 计算得到氧气、氮气和氧原子数密度。为直观显示使用上述方法计算出的气辉辐射特性，验证模型计算方法的正确性，计算了典型气辉体辐射率随高度的廓线(太阳活动高年 2014 年和活动低年 2018 年 3 月 21 日 12:00 UT, 180°E, 0°N)，如图 2 所示，纵坐标为海拔高度 h ，横坐标为体辐射率 $V(h)$ 。不同年份的气辉体辐射率均在海拔 250

km 附近达到最大值,且体辐射率大小与太阳活动强度有关,符合预期。

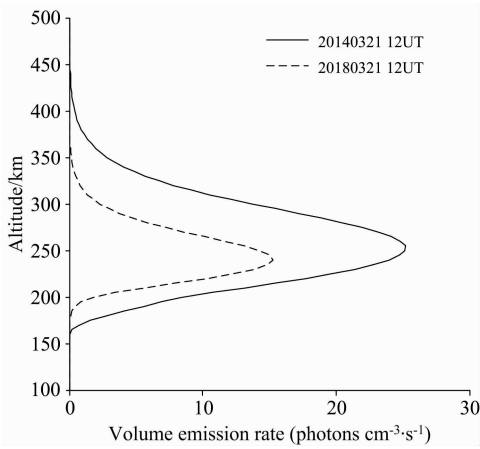


图 2 典型 630 nm 气辉体辐射率廓线

Fig. 2 Typical 630 nm airglow volume emission rate profile

2.2 气辉辐射强度仿真结果与分析

上述气辉辐射模型符合夜间计算,并且天基电离层气辉成像仪通常在夜间工作,因此本文只对夜半球气辉情况进行仿真。根据以上分析,使用 IRI2016 和 NRLMSISE-00 模型获得太阳活动高年 2014 年和活动低年 2018 年的电离层参数,将全球按照经度 \times 纬度为 $5^\circ \times 5^\circ$ 划分网格,由于高纬度地区极光的影响更为复杂,这里仅计算全球纬度 70° 以下地区的气辉强度分布。分别选择太阳活动高年 2014 年和活动低年 2018 年中的四个具有特殊太阳直射角的时间:春分、夏

至、秋分和冬至日,分别去除日落后和日出前 1.5 h 内仍受太阳直射的曙暮气辉数据,仿真在这四个时间气辉所能达到的强度和分布,用以分析成像仪在各种情况下的成像效果。

经过统计,图 3 和图 4 对应的太阳活动高年夜半球平均辐射强度为 115 Rayleigh,为太阳活动低年夜半球平均辐射强度 50 Rayleigh 的两倍多。在春分和秋分日,赤道地区的气辉辐射强度要大于中高纬度地区,最强可达 530 Rayleigh。在冬至日,太阳直射点在南半球,导致夜间气辉强度南半球大于北半球。夏至日则相反,此时太阳直射点在北半球,夜间气辉强度北半球要大于南半球。仿真结果表明 630 nm 的气辉辐射强度分布与太阳直射点有着密不可分的关系。辐射强度仿真结果的大小和分布符合卫星载荷 GLO-1^[12]和国际空间站 IMAP 任务^[13]对 630 nm 气辉的实际观测结果。该仿真结果提供了气辉强度的分布和极值情况,为成像仪指标的设定提供理论依据。

3 天基成像链路与仿真分析

3.1 天基成像仿真分析方法

3.1.1 光学系统链路分析

对电离层气辉进行天底观测时,气辉信号成像于光学系统焦平面上,焦平面中心与 CCD 中心重合,如图 5 所示,进入 CCD 灰色区域的光子数即为有效光子数。设电离层气辉成像仪光学系统视场角为 θ ,立体角为 Ω ,立体角与视场角的转换关系为式(3)

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (3)$$

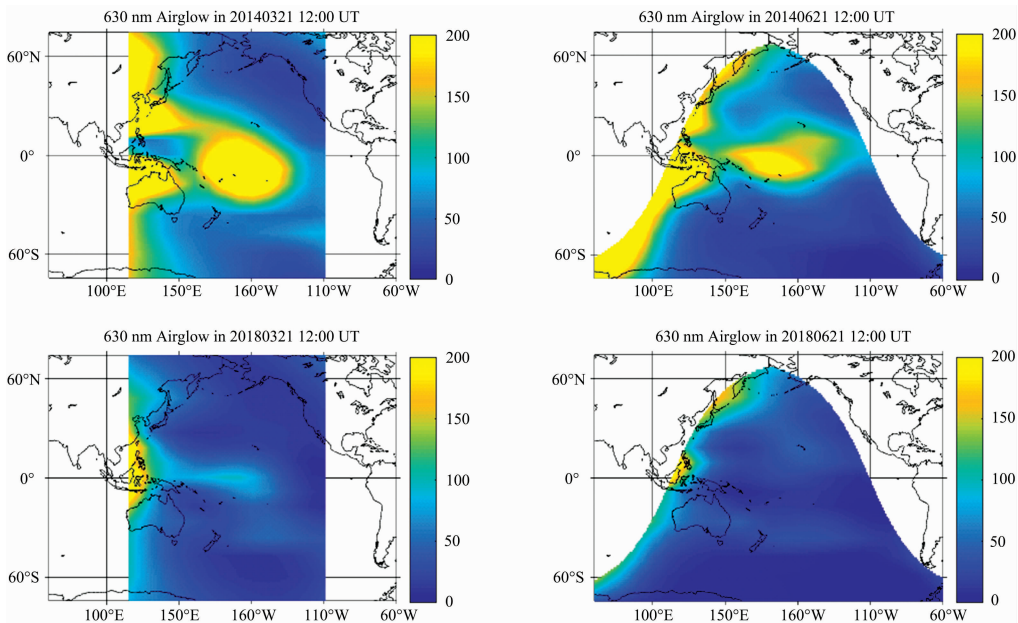


图 3 太阳活动高年(上)和低年(下)的春分日(左)、夏至日(右)夜气辉辐射强度分布(Rayleigh)

Fig. 3 Airglow intensity distribution of spring equinox and summer solstice with high and low solar activity (in Rayleigh)

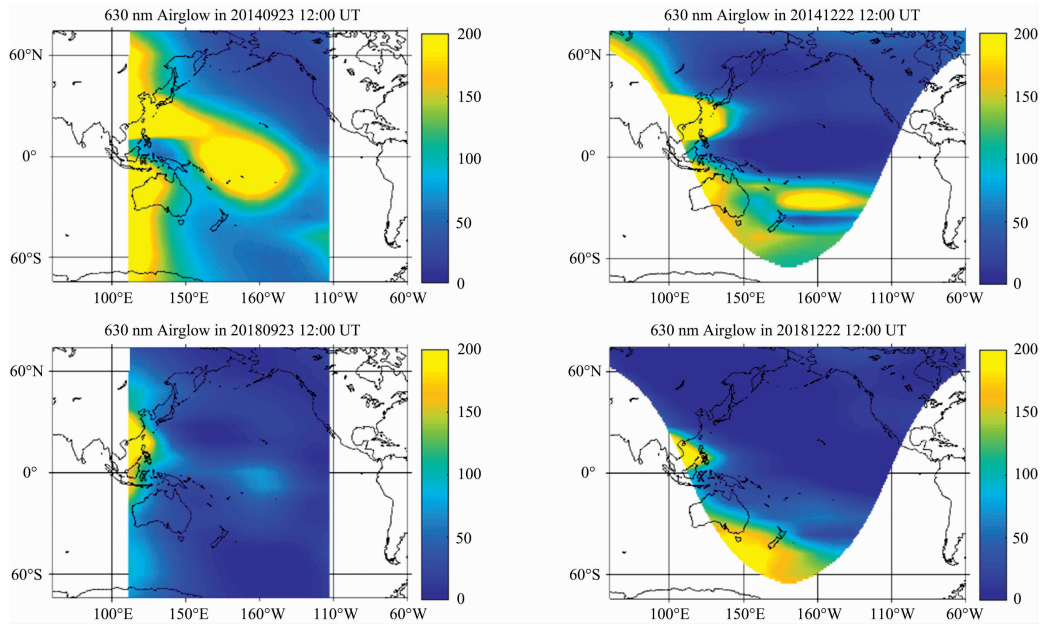


图 4 太阳活动高年(上)和低年(下)的秋分日(左)、冬至日(右)夜气辉辐射强度分布(Rayleigh)

Fig. 4 Airglow intensity distribution of autumnal equinox and winter solstice with high and low solar activity (in Rayleigh)

这样，单位时间内到达光学系统焦平面上的光子数 N_p 与气辉强度 I 、立体角 Ω 、入瞳直径 D 和光学系统透过率 τ 的关系为

$$N_p = 10^6 I \frac{\Omega}{4\pi} \times \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \tau \quad (4)$$

气辉信号在焦平面所成像的圆面积为 S_0 ，长条形 CCD 截取其中的灰色面积 S 作为积分区域，如图 5 所示，CCD 的宽为 l ，区域 S 半长为 d ，所成像的像高即圆 S_0 的半径 r 为

$$r = f \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

通过 r, l 能够求出 d ，从而进一步求出 S 和 S_0 的面积。根据 CCD 像元尺寸，计算得到 S 区域内的像元个数 n ，则单位时间内每个像元收集的光子数为

$$N_{ps} = \frac{N_p S}{n S_0} \quad (6)$$

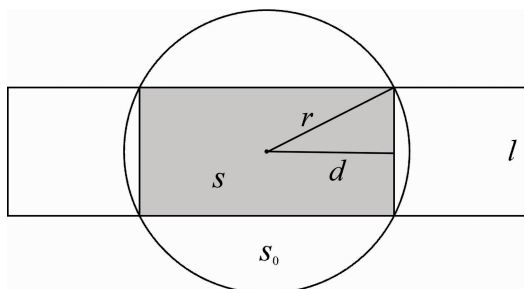


图 5 焦平面成像示意图

Fig. 5 Focal plane imaging diagram

3.1.2 光电转换链路分析

电离层气辉成像仪的光电转换部分采取了 TDI 成像技术，其成像过程为：成像仪跟随卫星运动时，对天底气辉进行长时曝光成像。在 t_0 时刻，气辉在 CCD 的第一行成像，产

生电荷信号。经 t_1 秒后，由于卫星运动，同一信号移至第二行成像，第二行再次对该信号进行累积，同时时钟信号驱动第一行上产生的电荷转移到第二行，此时第二行像元就包含了 t_0 和 t_1 两个时刻曝光产生的电荷，使得电荷量增加了一倍。以此类推，若 CCD 级数为 M ，则输出信号将增至原来的 M 倍。设 f 为光学系统等效焦距， v 为星下点速度， v_p 为图像在焦平面上的运动速度， H 为镜头与气辉的距离^[14]，由几何光学成像关系得到 $v_p = v_f/H$ 。设 α 为像元尺寸，则单个像元曝光时间为 α/v_p 。CCD 曝光时间为

$$t = M \frac{\alpha H}{f v} \quad (7)$$

式(7)表明曝光时间和级数 M 、像元尺寸 α 成正比，和焦距 f 成反比。考虑到 CCD 量子效率 Q 的影响，经过曝光时间 t 累积，输出像元中的电子数为

$$N_s = N_{ps} t Q \quad (8)$$

3.1.3 信噪比分析

成像仪的噪声可分为输入噪声、读出噪声、像元区噪声。输入噪声主要为光子噪声 N_{np} ，是入射光子数的平方根值，读出噪声 N_r 为 CCD 读出电路引入噪声。像元区噪声主要为暗噪声 N_m ，其等效电子数为暗电流电子数的平方根。总噪声 N_n 和信噪比 SNR 分别为

$$N_n = \sqrt{N_{np}^2 + N_m^2 + N_r^2} \quad (9)$$

$$SNR = \frac{N_s}{N_n} \quad (10)$$

3.1.4 气辉观测幅宽和分辨率

成像仪在进行天底观测时，气辉幅宽 w 和单个像元对应成像分辨率 a 分别为

$$w = H \frac{2d}{f} \quad (11)$$

$$a = H \frac{\alpha}{f} \tag{12}$$

3.2 典型成像仪设备参数观测仿真

为分析成像仪的最终成像效果，选取某一典型参数进行成像仿真。CCD 芯片规格列于表 2。轨道设计参数和光学参数列于表 3。

表 2 CCD 芯片规格参数
Table 2 CCD Specifications

参数	数值
像元数 n	1 024×256
像元尺寸 α	26 μm ×26 μm
成像区域尺寸 S_1	26.6 mm×6.7 mm
量子效率 Q (@630 nm)	0.85
读出噪声 N_r	rms 6 e^- /pixel
暗电流(@213 K)	0.07 e^- /pixel·s ⁻¹
灵敏度	1.5 $\mu\text{V}/e^-$
峰值信号	5×10 ⁵ e^- ·pixel ⁻¹
动态范围	83 000 : 1

表 3 天基成像仪参数

Table 3 Parameters of the Imager

轨道参数	数值	光学参数	数值
卫星轨道高度	700 km	镜头视场角 θ	34°
星下观测高度	250 km	镜头焦距	24 mm
星下点速度 v	7 031 m·s ⁻¹	光学系统透过率 τ	0.52
轨道倾角	70°	镜头 F 数	2.2
		入瞳直径 D	1.1 cm

光学系统透过率 τ 为镜头透过率 0.8 与滤光片透过率 0.65 的乘积。为进一步提高信噪比，我们采用了 binning2×2 技术使像元合并 2×2 输出，级数 M 设定为 128。根据式 (7) 得到该 CCD 的延时积分时间为 17.75 s。根据式 (11) 和式 (12) 同时考虑 binning2×2 技术，得到 CCD 成像分辨率为 128×250，气辉水平分辨率 1 km，气辉扫描宽度 w 为 245

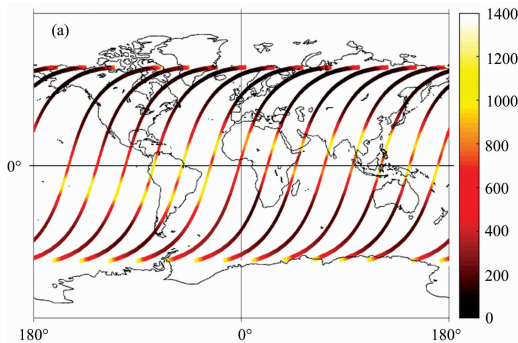


图 7 太阳活动高年成像仪成像信号 (a, 单位为电子数) 和信噪比 (b) 仿真

Fig. 7 The simulation of imaging signal (a) and SNR (b) for high solar activity

在此 14 个周期内，较强的信号源主要集中在中纬和低纬地区，信噪比可以达到 10 以上。气辉全球尺度结构能够被清晰观测，如图 7 中能够观察到电离层“赤道异常”而引起的

km。由 3.1 节的分析画出图 6 气辉辐射强度对应的成像仪观测信噪比。在对太阳活动高年夜半球平均 115 Rayleigh 辐射的成像可以实现信噪比 16.2，太阳活动低年夜半球平均 50 Rayleigh 的辐射成像可实现信噪比为 10。最大辐射强度可达 530 Rayleigh，此时单个像元产生的 1.8×10^3 个光生电子低于 CCD 的峰值信号，不会使电子溢出。综上所述，此成像仪的设计参数在多数情况下都能够实现很好的成像观测。

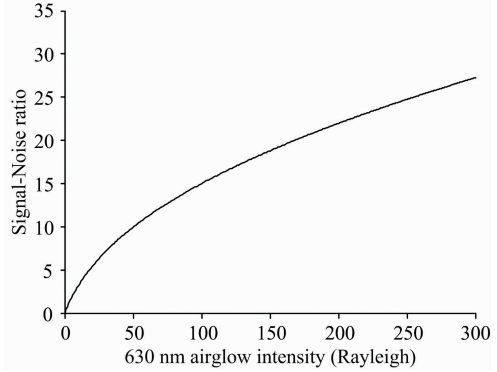
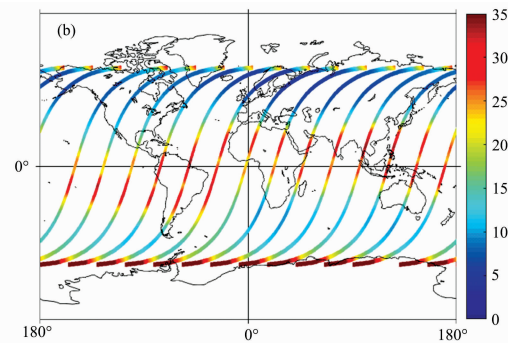


图 6 气辉辐射强度与成像信噪比的关系

Fig. 6 Relationship between airglow intensity and SNR

为实现该成像仪在太阳活动高年夜间的扫描成像仿真，设在 2014 年 3 月 21 日 12:00 UT，卫星从 70°S, 170°E 上空 700 km 处开始向东进行扫描观测，卫星轨道为圆形轨道，由于卫星只在夜间观测，因此在每个周期内只仿真夜半球的成像，总计运行 14 个周期。每个周期内卫星星下点的电离层数据时间，使用该卫星在此周期经过赤道上空的时间，从全球时来看跨度为 2014 年 3 月 21 日 12:00 UT 至 3 月 22 日 9:20 UT。综合气辉幅宽和水平分辨率计算结果，并在成像信号中加入呈正态分布的读出噪声、呈泊松分布的光子噪声与暗噪声，正态分布数学期望设为 $\mu=6$ ，标准偏差设为 $\sigma=3$ 。使用表 3 的轨道参数和卫星星下点轨迹计算分析方法^[15]，获得了卫星在此时间段内运行的扫描成像信号和信噪比仿真。



气辉双峰结构。

为分析该成像仪在太阳活动低年夜间的成像效果，将观测时间设为从 2018 年 3 月 21 日 12:00 UT 开始，仿真结果

显示太阳活动低年时进行的成像效果弱于在太阳活动高年时的成像效果, 较强的信号源主要集中在低纬地区, 因此只能

对低纬地区的气辉进行探测, 图 8 能够观测到位于赤道附近的尺度结构, 比如气辉强度峰值分布与地理赤道的偏离。

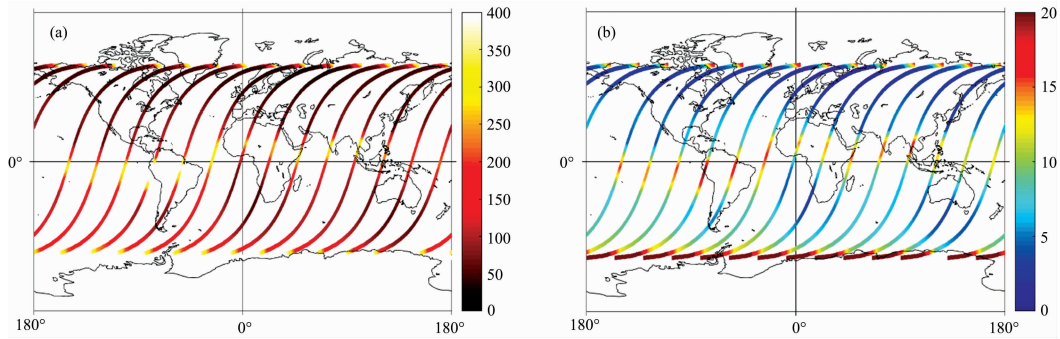


图 8 太阳活动低年成像仪成像信号 (a, 单位为电子数) 和信噪比 (b) 仿真

Fig. 8 The simulation imaging signal (a) and SNR (b) for low solar activity

4 结 论

系统地研究了电离层中由氧原子 1D 态至 3P 的辐射跃迁所产生 630 nm 气辉辐射的计算和仿真方法, 并且得到了太阳活动高年 2014 年和太阳活动低年 2018 年不同时节的全天气辉辐射强度分布, 气辉强度分布整体趋势与理论预期相符。通过详细分析, 在太阳活动高年夜间, 630 nm 气辉辐射强度平均值达到了 115 Rayleigh, 是太阳活动低年 50 Rayleigh 的两倍多。赤道地区的气辉辐射强度大于中高纬度

地区。

本文完整地分析了电离层气辉成像仪的整个成像链路和信噪比。以一个典型成像仪参数, 首次给出了结合轨道参数的 630 nm 气辉天底成像仿真, 结果表明该成像仪在太阳活动高年能够清晰观测到电离层气辉全球尺度结构; 在太阳活动低年能够观测到气辉低纬地区尺度结构。对于成像的分析, 本文没有考虑地面光污染的影响, 为进行更加完备的观测仿真, 推动电离层气辉成像仪参数的进一步优化, 下一步的工作将进一步分析地面光污染对气辉成像造成的影响。

References

- [1] Xu J, Li Q, Yue J, et al. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(21): 11058.
- [2] JIANG Fang, FU Li-ping, WANG Yong-mei(江 芳, 付利平, 王咏梅). Chinese Journal of Space Science(空间科学学报), 2018, 38(1): 58.
- [3] Kamalabadi F, Comberiate J M, Taylor M J, et al. Annales Geophysicae, 2009, 27(6): 2439.
- [4] Rajesh P K, Chen C H, Lin C H, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2014, 119(6): 4894.
- [5] Sakanoi T, Akiya Y, Yamazaki A, et al. IEEJ Transactions on Fundamentals & Materials, 2011, 131(12): 983.
- [6] ZHU Ai-jun, HU Xiu-qing, LIN Man-yun, et al(朱爱军, 胡秀清, 林曼筠, 等). Journal of Marine Meteorology(海洋气象学报), 2018, 38(3): 1.
- [7] Dang T, Lei J, Dou X, et al. Earth and Planetary Physics, 2017, 1(1): 44.
- [8] Hunten D M, Roach F E, Chamberlain J W. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1956, 8(6): 345.
- [9] Vlasov M N, Nicolls M J, et al. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110: A07303.
- [10] Kley D, Lawrence G M, Stone E J. The Journal of Chemical Physics, 1977, 66(9): 4157.
- [11] Rusch D W, Gérard J C, Sharp W E. Geophysical Research Letters, 1978, 5(12): 1043.
- [12] Broadfoot A L, Bellaire P J. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1999, 104(A8): 17127.
- [13] Hiroyuki N, Akira T, Toshiaki T, et al. Progress in Earth and Planetary Science, 2018, 5: 66.
- [14] QIAN Hao-jun, HU Xiong, TU Cui(钱浩俊, 胡 雄, 涂 翠). Chinese Journal of Space Science(空间科学学报), 2012, 32(3): 362.
- [15] PENG Cheng-rong(彭成荣). The System Design of Spacecraft(航天器总体设计). Beijing: Science and Technology of China Press(北京: 中国科学技术出版社), 2011. 258.

Simulation of Space Borne Ionospheric Airglow Imaging

LI Zheng^{1, 2, 3}, TU Cui^{1, 2, 3*}, WU Xiao-cheng^{1, 2, 3}, HU Xiong^{1, 3}

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

Abstract The ionospheric characteristics such as total electron content and plasma bubble parameters can be retrieved by observing the ionospheric airglow with spaceborne imager. Atoms and molecules absorb solar radiation and excite to higher energy states in the daytime. At night, they radiate the energy in the form of airglow. The radiation intensity is related to the density of ionospheric components. Therefore, airglow is an excellent tracer for observing the ionosphere. In order to promote and optimize the design of space-borne imager and enrich the ionospheric detection methods, it is necessary to conduct imaging simulation analysis of global airglow. The main works of this paper are as follows: (1) the photochemical reaction process of 630 nm radiation at night is analyzed, and a simulation analysis method of airglow imaging is designed. The intensity distributions of airglow in four different seasons with high and low solar activity are obtained, which provide a theoretical basis for setting detection index; (2) the simulation research of space-borne imaging is carried out, including imaging chain and signal-to-noise ratio analysis. A typical imager parameter with a time-delay integral imaging method is used to carry out the simulation combined with the satellite orbit. The main conclusions are as follows: (1) the intensity of 630 nm at night is closely related to the solar radiation intensity in the daytime. The average night radiation intensity with high solar activity is 115 Rayleigh, and that with low solar activity is 50 Rayleigh, the radiation intensity and distribution are consistent with the actual observation results of GLO-1 and ISS-IMAP; (2) the observation width and horizontal resolution of typical parameter imager reach 245 km and 1 km. The signal-to-noise ratio is more significant than 10 for the intensity greater than 50 Rayleigh, it means the typical parameter imager can observe the global structure of ionospheric airglow with high solar activity. The research results in this paper provide a theoretical basis for space-borne ionospheric airglow detection and provide a reference for observing other wavelengths.

Keywords Space borne imager; Ionosphere; Airglow; Imaging simulation

(Received Feb. 1, 2021; accepted Apr. 23, 2021)

* Corresponding author