0254-6124/2012/32(3)-362–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Qian Haojun, Hu Xiong, Tu Cui. Research on space-based global atmospheric wave imager. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(3): 362-367

星载全球大气波动成像仪研究 *

钱浩俊[1,2] 胡 雄[1] 涂 翠[1,2]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 在卫星上对中间层顶区域的气辉辐射成像观测, 对于全球大气波动的监测和研究具有重要的意义. 利用 TDICCD 对 O_2A (0-0) 气辉进行成像观测, 计算了曝光积分时间、信噪比和能达到的最高空间分辨率, 分析了地球自转对空间分辨率的影响, 在此基础上提出一种星载全球大气波动成像仪方案, 该方案可以观测垂直波长大于 10 km 的大气波动, 最高水平分辨率可以达到 0.33 km.

关键词 O_2A (0-0) 气辉, 全球大气波动成像仪, 中间层顶区域, 大气重力波

中图法分类号 P 353

Research on Space-based Global Atmospheric Wave Imager

QIAN Haojun[1,2] HU Xiong[1] TU Cui[1,2]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Space-based airglow imaging observation is significant for monitoring global atmospheric waves in the mesopause region. The Time Delay and Integration Charge Coupled Device (TDICCD) is used to capture images of O_2A (0-0) airglow. The required exposure time and the signal-to-noise ratio are calculated, and the latitude-dependent space resolutions are analyzed with a modulation transfer function. Due to the Earth's rotation, for a circular orbit with a height of 700 km and an incline angle of 73°, the spatial resolution increases with in creasing latitudes, which is 5.7 km near the equator. Based on the above analysis, the instrument's block diagram is also given. Results indicate that the space-based airglow imager can observe atmospheric waves with a vertical wavelength of approximately 10 km or longer and with the best horizontal spatial resolution of 0.33 km.

Key words O_2 airglow, Global atmospheric waves imager, Mesopause, Atmospheric gravity waves

* 中国科学院创新方向性项目资助 (Y02135A38S)

2011-02-17 收到原稿, 2011-10-28 收到修定稿

E-mail: xhu@cssar.ac.cn

0 引言

大气重力波是中高层大气中的动力学现象之一, 其对中高层大气动量通量和粒子成分输运、热平衡起着重要的作用, 开展大气重力波的监测和研究具有重要的科学意义. 利用在中间层和低热层大气的 (日/夜) 气辉作为示踪物 [1−3], 可以开展大气重力波监测研究.

在中间层顶区域, 大气分子 (如 OH, O_2) 和原子 (如 O) 通过复杂的化学反应, 将吸收的太阳能量以辉光的形式辐射出去, 这种辐射称为气辉. 气辉的体发射率与参加反应的粒子数密度及三体碰撞复合概率等系数有关. 大气重力波在中间层顶区域传播的过程中会引起大气温度与密度发生波动, 从而引起气辉的体发射率改变, 使气辉的亮度发生变化. Liu 等 [4] 采用模式计算得到扰动幅度为 1% 的重力波会引起气辉亮度发生 3%∼5% 的波动变化, 说明气辉是一种用来观测重力波的很好的示踪物.

基于 CCD (Charge-Coupled Device) 的地基气辉成像仪观测, 可以直接获得大气重力波的全天空二维信息, 包括水平波长、观测周期、水平传播方向等, 如果与大气风场探测数据结合还可以获得大气重力波的本征参数以及垂直波长等信息. 目前地基气辉成像仪在全球的应用非常广泛 [1−3]. 中国科学院空间科学与应用研究中心研制了一台大气重力波成像仪, 并在廊坊开展了中国首次中间层夜气辉的成像观测, 分析得到了大气重力波水平波长、观测周期和水平传播方向等结果 [1].

地基观测范围是有限的, 但如果利用星载气辉成像观测设备就能够实现对全球范围的观测, 不仅可估计大气重力波的相速度等特征, 还有助于弄清大气重力波源的全球分布和季节性特征, 对于中高层大气研究具有重要意义. 目前国际上还没有在轨运行的此种设备. 在卫星上开展气辉成像观测, 与地基观测有很大不同, 对观测设备提出了较高要求, 为了获得较多的全球分布的较高水平分辨率图像, 需要卫星低轨道运行. 夜气辉的辐射较弱, 为了使图像信噪比超过一定阈值, 需要较长时间曝光成像, 低轨卫星的速度较快, 长时间曝光会带来较大像移. 普通 CCD 不能同时满足长时间曝光和高分辨率的要求, 许多星载相机采用 TDICCD (时间延迟积分 CCD). 如何利用 TDICCD 来解决气辉成像观测问题, 需要细致分析.

本文在地基大气重力波成像仪研究的基础上, 计算了在卫星上观测夜气辉的信噪比和所需要的曝光时间, 分析了地球自转对成像质量的影响, 提出了一种基于 TDICCD 的全球波动成像仪技术方案, 并得到了可监测的大气波动指标.

1 观测气辉的选择

在卫星上对地观测夜气辉, 不仅所观测气辉需要具有较强的辐射强度, 还要考虑地球背景光噪声等问题. 这里, 选择对 O_2A(0-0) 夜气辉进行观测, 该气辉带中心高度 93 km, 其发射谱线在 762 nm 处. 星载成像设备选取该气辉带观测具有如下优势.

(1) O_2A(0-0) 夜气辉带发射相对较强, 强度为 2000∼10 000 Ra[5].

(2) 60 km 以下大气中的 O_2 对 O_2A (0-0) 带气辉大量吸收, 低层大气可以很好地滤去地球对日月光的重散射, 减小了这部分背景干扰, 有利于星载观测 [6].

2 TDICCD 观测大气波动特性分析

TDICCD (Time Delay and Integration Charge Coupled Device) 在星载相机上已有广泛应用. TDICCD 对于同一目标多次曝光, 多行像元信号累积成像. 其成像原理为, 当沿着 TDICCD 级数方向推扫成像时, 在同一列内, 第一行像元在第一个曝光积分周期内收集信号与第二行像元在第二个积分周期内收集到的电荷相加, 相加后的电荷移向下一行, 逐行累加后, 从最后一行移到输出寄存器中, 按线阵 CCD 器件的输出方式进行读出. 假设 TDICCD 级数为 M, 则曝光时间变为 M 倍, 信号的增加量远远高于噪声的增加量, 可以显著提高信噪比 [7], 而且不降低分辨率, 所以 TDICCD 被广泛用于星载相机, 以同时满足长时间曝光和高分辨率的需求.

TDICCD 观测方式如图 1 所示. 像元尺寸 α 对应的目标尺寸为 $S=\alpha\dfrac{H}{f}$, 这里 H 为镜头到气辉带中心的垂直距离, f 为镜头焦距. 一般定义 S 为成像的分辨率. 为了消除卫星速度的影响, 保持成像的高分辨率, TDICCD 像元行的积分时间需要与卫星的速高比相匹配. 速高比定义为成像过程中相对于星下点的景物速度与成像高度之比. 速高比与光生电荷转移速度不匹配, 是导致像移及影响分辨率的原因之

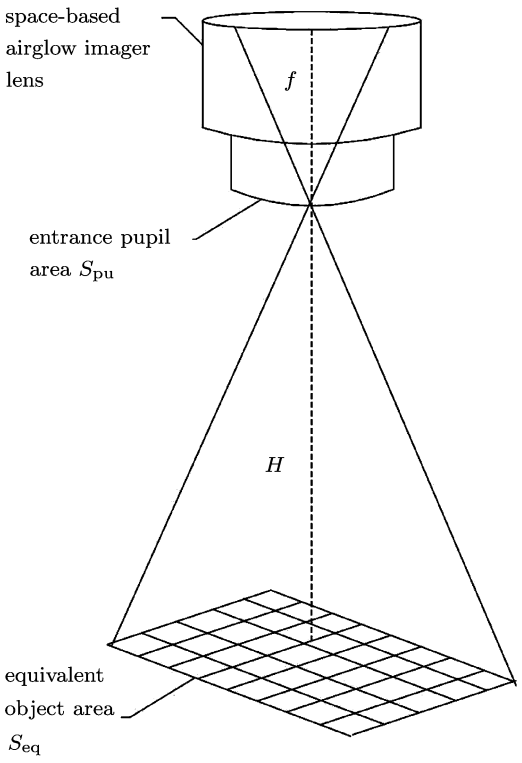

图 1 成像仪观测夜气辉带方式

Fig. 1 Imager's observation on nightglow

一. 成像目标的光信号在焦平面移动速度为 $\boldsymbol{v}_{\rm p}=f\dfrac{v}{H}$, 其是卫星速高比的函数, v 为星下点速度. 当卫星轨道为近圆轨道时, H 不变, 设推扫方向与 v 相同, 则只要将像元行的积分时间设置为 $\dfrac{\alpha}{v_{\rm p}}$, 不仅提高了信号的信噪比, 而且 TDICCD 的分辨率也不会受到影响.

2.1 曝光时间与信噪比分析

综上所述可知, M 级 TDICCD 可提供的最大曝光积分时间 $t_{\rm int}=M\dfrac{\alpha}{v_{\rm p1}}$. 其中, $v_{\rm p1}$ 为 $\boldsymbol{v}_{\rm p}$ 在推扫方向的分量, 由轨道参数确定. 因推扫方向不一定与 v 同向, 在计算信噪比的时候, 可以将气辉带近似为面源目标. 由于光学镜头垂直于气辉带观测, 即入瞳法线平行于探测物面法线, 因此, 单个像元对应的等效探测物面积与光学系统入瞳构成光柱的光通量为

$$\Phi=\frac{L_{\rm n}S_{\rm eq}S_{\rm pu}}{H^2}. \tag{1}$$

其中, $L_{\rm n}$ 为气辉带辐射强度; $S_{\rm eq}$ 为等效探测物面积, $S_{\rm pu}$ 为系统入瞳面积. 成像比例尺为 f/H, 因此有 $\dfrac{S_{\rm eq}}{\alpha^2}=\left(\dfrac{H}{f}\right)^2$, 且有 $\dfrac{S_{\rm pu}}{f^2}=\dfrac{\pi}{4F^2}$. 这里 F 表示光学镜头焦径比, 代入式 (1) 有

$$\Phi=L_{\rm n}\alpha^2\frac{\pi}{4F^2}, \tag{2}$$

则单个像元产生的信号 $N_{\rm s}=\Phi t_{\rm int}\tau R_{\rm q}$. 这里 $t_{\rm int}$ 为总积分时间, τ 为大气和光学系统总透过率, $R_{\rm q}$ 为光谱量化效率. 单个像元电信号

$$N_{\rm s}=L_{\rm n}\tau\frac{\pi}{4F^2}M\frac{\alpha^3}{v_{\rm p1}}R_{\rm q}. \tag{3}$$

可以看出, 观测气辉带时在光学系统和轨道确定, 并且在大气透过率变化不大的情况下, TDICCD 单个像元产生的电信号强度与 $M\alpha^3R_{\rm q}$ 成正比.

根据噪声源不同, TDICCD 中的噪声可以分为输入噪声、像元区噪声、输出噪声. 输入噪声主要有光子噪声, 其为入射平均光子数的均方根值, 噪声电荷 $N_{\rm np}=\sqrt{N_{\rm s}}$; 像元区噪声主要有转移噪声、俘获噪声、暗电流噪声等, 与级数 M 有关, 若每级像元引入的噪声为 $N_{\rm ni}$, 则 M 级像元累加后的噪声为 $\sqrt{M}N_{\rm ni}$; 输出噪声与级数 M 无关, 为 $N_{\rm nr}$, 各噪声相互独立, 因而可求得总噪声 [7−8]

$$N_{\rm n}=\sqrt{N_{\rm s}+MN_{\rm ni}^2+N_{\rm nr}^2}\,. \tag{4}$$

TDICCD 观测气辉带信噪比为

$$R_{\rm SN}=\frac{L_{\rm n}\tau\dfrac{\pi}{4F^2}M\dfrac{\alpha^3}{v_{\rm p1}}R_{\rm q}}{\sqrt{L_{\rm n}\tau\dfrac{\pi}{4F^2}M\dfrac{\alpha^3}{v_{\rm p1}}R_{\rm q}+MN_{\rm ni}^2+N_{\rm nr}^2}}\,. \tag{5}$$

在观测较强的 $O_2A(0\text{-}0)$ 气辉时, 光子噪声成为主要噪声, 增加信号可以提高信噪比, 即意味着 $M\alpha^3R_{\rm q}$ 越大, 信噪比越大. 由于三次方的关系, 像元大小 α 对于信噪比的贡献更为显著, 因此, $M\alpha^3R_{\rm q}$ 可以作为 TDICCD 信噪比的一个表征. 曝光积分时间 $t_{\rm int}$ 与 $M\alpha$ 成正比, 在成像过程中信噪比满足的情况下, $t_{\rm int}$ 越小越好. 结合以上分析, 在信噪比满足时, 大像元、高光谱量化效率, 较小级数的 TDICCD 进行气辉成像是较合适的.

选取 E2V 公司生产的 CCD30-11 进行观测 $O_2A(0\text{-}0)$ 气辉信噪比和曝光时间的估算. 其规格参数列于表 1.

设卫星轨道近圆形, 高度 700 km, 轨道倾角 73°. 93 km 以上的大气十分稀薄, 由于散射和吸收造成的

表 1　TDICCD 芯片规格参数

Table 1　TDICCD chip parameters

参数	数值
像元数 ($H \times V$)	1024×256
像元尺寸	26 μm×26 μm
动态范围	83 000
光谱量化效率 (253 K, IR COATED, $\lambda = 762.5$ nm)	0.85
暗电流 (293 K)	1000 $e^-/(pixel^{-1}\cdot s^{-1})$
灵敏度	1.5 $\mu V/e^-$
峰值信号	5×10^5 e^-/pixel
读出噪声 (233 K, 20 kHz)	rms 6 e^-/pixel

损失可以忽略, 因此可以认为气辉到达 700 km 高度的大气透过率近似为 1.　采用的光学系统焦距为 48 mm, 焦径比 F 为 2.8, 透过率为 0.8.

大气重力波研究需要气辉图像信噪比大于 30. 在单个像元信噪比为 30 时, 由式 (5) 计算得到需要级数为 178, 曝光时间为 8.7 s (O_2 气辉强度为 6000 Ra 时). 该 TDICCD 级数为 256, 计算得到单个像元可提供最大的曝光时间约为 12 s, 相应的 SNR 约为 42.9, 满足对该气辉辐射成像的观测要求.

小尺度的大气重力波频率是小于大气浮力频率的, 93 km 高度处的大气浮力频率约为 0.02 Hz, 已观测到的大气重力波周期通常为几分钟到几小时, 可知上述 12 s 的曝光时间远小于大气重力波周期, 适合于大气重力波的观测.

在具体设计中, 还可以使用像元合并的方式来提高信噪比.

2.2　地球自转对水平分辨率的影响

对于 TDICCD 来说, 要达到最高分辨率, 行转移频率与速度严格匹配才不至于产生像移. 地球自转会引起偏流角, 如果 TDICCD 的推扫方向没有相应的调整, 则将不可避免地产生像移而降低分辨率. 下面分析偏流角引起的像移对成像水平分辨率的影响.

如图 2 所示, 地球自转速度 v_e 与星下点速度 v_s 合成再投影得到星下点沿航速度 v_1 和穿航速度 v_2, CCD 焦平面对应速度分别为 v_{p1} 和 v_{p2}. 这里假设 TDICCD 推扫方向与沿航方向一致, v_{p1} 若与 CCD 行转移频率不匹配会产生沿航方向的像移, 而 v_{p2} 引起穿航方向的像移. 有如下关系存在:

$$v_{p1,2} = \frac{f}{H} v_{1,2}. \tag{6}$$

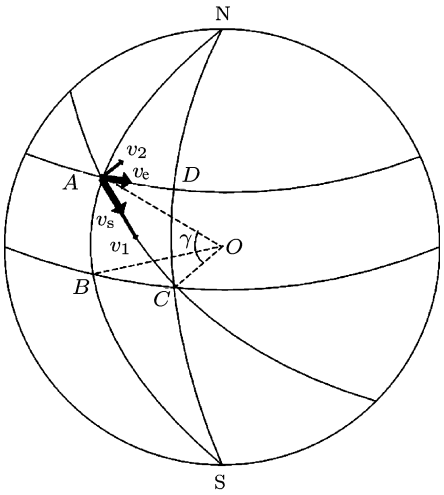

图 2　卫星运行速度矢量

Fig. 2　Resolution of satellite's velocity vectors

假设卫星星下点在点 A, CCD 平面中心与地心连线垂直于 CCD 平面, 地球自转与卫星角速度分别为 ω, Ω, 卫星轨道倾角 i_0, 所处纬度为 λ, 卫星到地心连线与轨道面和赤道交线形成角度为 γ, 并有关系 $\gamma = \arcsin(\sin\lambda/\sin i_0)$.

显然 $\angle BAC + \angle CAD = 90°$, 由球面三角形正余弦定理, 将速度进行矢量分解得到

$$\begin{aligned} v_{p1} =& \frac{f}{H}[\Omega(R+H) - \omega(R+h)\cos\angle AOB\cos\angle CAD] \\ =& \frac{f}{H}[\Omega(R+h) - \omega(R+h)\cos i_0], \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} v_{p2} =& -\frac{f}{H}[\omega(R+h)\cos\angle AOB\sin\angle CAD] \\ =& -\frac{f}{H}[\omega(R+h)\sin i_0\cos\gamma]. \end{aligned} \tag{8}$$

式 (7) 和式 (8) 为仅计算 TDICCD 中心点的情况, 与文献 [9] 中坐标矩阵转换方法得到的结果是一致的. 由式 (7) 和式 (8) 可以看出, 在圆轨道、i_0 一定的情况下, 沿航速度 v_{p1} 不变, v_{p2} 只与纬度有关. 在设计中可以令 TDICCD 的行转移频率与 v_{p1} 匹配, 则在沿航方向刚好不存在像移, 该方向水平分辨率不受影响. 由 CCD 的参数可得, 沿航方向的水平分辨率为 0.33 km.

分析 v_{p2} 带来的像移对穿航方向水平分辨率的影响.　在曝光积分时间内地球自转引起焦平面上穿航方向的像移 $x = \dfrac{Mt_{int}fv_2}{H}$, 相当于像元数 $d = \dfrac{x}{\alpha} = M\dfrac{v_2}{v_1} = M\dfrac{v_{p2}}{v_{p1}}$, 对于成像系统常用 MTF 函数来分析成像质量. 对于 M 级 TDICCD, 像移影响

用 MTF 函数可以表示为 [10]:

$$\mathrm{MTF}(f_\mathrm{c}) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{f_\mathrm{c}}{f_\mathrm{n}}d\right)}{M\sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{f_\mathrm{c}}{f_\mathrm{n}}\frac{d}{M}\right)}. \tag{9}$$

其中, f_n 为奈奎斯特频率, f_c 为空间频率. 若要求 MTF> 0.64, 则 MTF=0.64 时按照成像比例关系, f_c 对应的距离 $\frac{f_\mathrm{n}}{2f_\mathrm{c}}\alpha\frac{H}{f}$ 即为空间分辨率, 可知空间分辨率与 $\frac{\alpha}{f_\mathrm{c}}$ 成正比.

采用上述轨道假设, 用 CCD30-11 计算, 由式 (9) 可以得到如图 3 所示的结果. 为了直观, 直接将横坐标表示为距离. 可以看出, 纬度越高, MTF 函数值越大, 表明像质越高. 这是由于地球自转线速度随着纬度增加而减小, 造成穿航方向速度分量变小, 像移也减小的结果. 在低纬度下 ($\gamma < 30°$, 即 $\lambda < 28.6°$), 穿航方向能达到 5.7 km 的空间分辨率. 在较高纬度 ($\lambda > 67.5°$), 能达到 1.5 km.

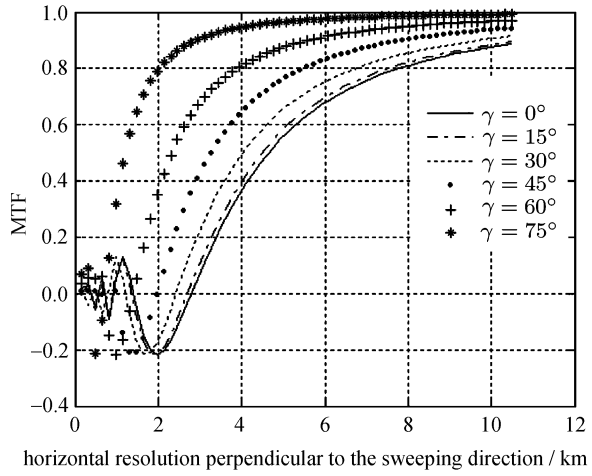

图 3 在不同纬度 TDICCD 的 MTF 值随分辨率的变化

Fig. 3 TDICCD's MTF function value variation with the space resolution and latitude

3 星载大气波动成像仪方案

基于上述分析, 这里提出一种星载全球大气波动成像仪的方案 (见图 4). 该成像仪观测对象为 O_2A (0-0) 气辉. 为了减小背景光干扰, 该方案利用两个探测通道, 即信号波段 (中心波长 762 nm, 带宽 5 nm) 以及背景光波段 (中心波长 745 nm, 带宽 5 nm). 主要由光学部分、CCD、电信号处理部分、光机控制和温控部分等组成. 光学部分包括两组焦距 48 mm, 焦径比 F 数 2.8 镜头, 电路部分对 CCD30-11 采集的信号进行去噪、数据格式化和存储等. 光机控制部分使设备在背阳面对气辉成像, 温控部分使成像仪包括 CCD 等温敏器件在合适的工作温度下工作. 整个工作原理为, 气辉光以及背景光分别由两个光通道进入 CCD 焦平面, CCD 产生的电荷经去噪处理并数字化, 转化成一定格式的数据暂存. 这些数据在卫星平台计算机的控制下被送上数据链路. 该设备在高度 700 km, 倾角 73° 的轨道上搭载, 采取背阳面成像向阳面传输数据的工作模式. 其技术指标列于表 2.

根据第 3 节的分析和表 2 中的水平分辨率数据可知, 最低情况下, 该大气波动成像仪可以观测到水平波长大于 11.4 km 的大气波动. 条件好时, 可以用来观测水平波长 0.7 km 左右的大气波动. 由于当重

表 2 星载大气重力波成像仪参数

Table 2 Global atmospheric waves imager parameters

参数	参数值
覆盖气辉带范围	84 km×150 km
单个像元信噪比 (O_2 气辉强度为 6000 Ra 时)	42.9
视场角	8° × 14°
最大曝光积分时间	12.52 s
水平空间分辨率	5.7 km×0.33 km ($\lambda < 28.6°$)
	5.0 km×0.33 km ($28.6° < \lambda < 42.8°$)
	4.1 km×0.33 km ($42.8° < \lambda < 55.9°$)
	3.0 km×0.33 km ($55.9° < \lambda < 67.5°$)
	1.5 km×0.33 km ($67.5° < \lambda < 73°$)

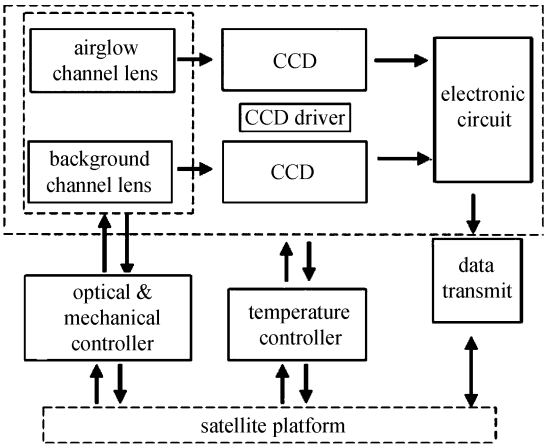

图 4 星载全球大气重力波成像仪结构

Fig. 4 Block diagram of global atmospheric waves imager

力波垂直波长小于或与 O_2A(0-0) 气辉层半高宽 (约 8 km) 相当时, 会产生干涉现象导致波动抵消, 难以观测 [11], 垂直波长大于 10 km 的波动对气辉体发射率影响比较显著 [4], 一般认为利用该气辉带可监测的大气波动的垂直波长大于 10 km. 综上所述, 该星载大气波动成像仪可以用于观测水平波长大于 11.4 km, 垂直波长大于 10 km 的大气波动.

根据信噪比分析的结果, 该设备还可以设计使用像元合并的工作方式, 在保证信噪比的前提下, 减少使用累积级数, 减小曝光时间, 从而提高穿航方向的水平分辨率. 代价是降低了沿航方向的分辨率, 但可使得在两个方向的水平分辨率得到平衡. 这样可以用于观测水平波长更短的大气重力波.

4 结论

分析了在卫星上对 O_2 气辉成像观测的可行性, 着重从成像的信噪比、曝光时间以及地球自转导致的偏流角引起的像移等方面进行了推导分析和计算. 结果表明, 在卫星上开展气辉成像观测以监测大气波动是完全可行的. 在分析研究的基础上, 提出了一种星载大气波动成像仪的方案, 并给出了指标, 该成像仪可以探测中间层顶区域垂直波长大于 10 km, 水平波长最短约 0.7 km 的大气波动.

星载大气波动成像仪可以实现对全球大气波动的监测, 帮助人们了解大气波动的全球分布及分析大气波动激发源特征, 对于促进中高层大气研究具有重要的意义. 本文的方案还可以进一步在大气波动水平分辨率监测上进行优化, 以达到更好的观测效果.

参考文献

[1] Tu C, Hu X, Yan Z A, *et al*. First imaging observation of the gravity waves in the mesopause region in China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2010, **55**:539-543

[2] Tang J, Liu A Z, Swenson G R. High frequency gravity waves observed in OH airglow at Starfire Optical Range, NM: Seasonal variations in momentum flux [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(20), 1966, doi:10.1029/2002GL015794

[3] Suzuki H, Shiokawa K, Tsutsumi M, Nakamura T, Taguchi M. Atmospheric gravity waves identified by ground-based observations of the intensity an d rotational temperature of OH airglow [J]. *Polar Sci.*, 2008, **2**(1):1-8

[4] Liu A Z, Swenson G R. A modeling study of O_2 and OH airglow perturbations induced by atmospheric gravity waves [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D4), 4151, doi: 10.1029/ 2002 JD002474

[5] Greer R G H, *et al*. ETON 1: A data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow [J]. *Planet. Space Sci.*, 1986, **34**:771-788

[6] Scheidegger N, Krpoun R, Shea H, *et al*. A new concept for a low-cost earth sensor:imaging oxygen airlow with arrays of single photon detectors [R]//30th Annual AAS Guidance and Control Conference, Breckenridge, 2007

[7] Xu Qian, Miao Lifeng, Wang Yueming, Wang Jianyu. In-depth analysis of TDI-CCD image senor [J]. *Chin. Infr. Tech.*, 2008, **30**(12):683-687. In Chinese (徐茜, 苗丽峰, 王跃明, 王建宇. 8192 像元 TDI-CCD 相机信噪比的深入分析 [J]. 红外技术, 2008, **30**(12):683-687)

[8] Jiang Guangwei. The features of TDICCD's space resolution [J]. *Chin. Infr.*, 2001(9):17-21. In Chinese (蒋光伟. TDICCD 的空间分辨率特性 [J]. 红外, 2001 (9):17-21)

[9] Wang J Q, Yu P, Yang C X, *et al*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling error budget and synthesis [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **3**(7):414-417

[10] Liu Liangyun, Zhang Boheng, Li Yingcai. Analysis of the MTF and image quality of TDI-CCD camera [J]. *Chin. Opt. Tech.*, 2000, **26**(6):481-483. In Chinese (刘良云, 张伯珩, 李英才. 航天 TDICCD 相机的 MTF 和像质分析 [J]. 光学技术, 2000, **26**(6):481-483)

[11] Wang Yongmei, Wang Yingjian. A modeling study of OH airglow responding to atmospheric gravity waves [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1998, **41**(4):455-462. In Chinese (王咏梅, 王英鉴. OH 气辉对于重力波响应模式的研究 [J]. 地球物理学报, 1998, **41**(4):455-462)