在轨航天器地气光环境分析

原育凯 陈宏宇 吴会英

(上海微小卫星工程中心, 上海 200050)

摘 要: 为得出定量化的遥感观测地气光环境数据,建立了简化的航天器地气光分布计算模型,首先将航天器及其各类运行轨道归纳到统一的照明模式中,地气光的分布主要考察航天器轨道面与地球晨昏面的夹角,然后考察航天器在每轨中的具体相位,以建立照度的几何传递关系;随后考察太阳辐照经地表后,最终到达航天器遥感观测载荷的光照度. 计算结果能反映地气光在载荷观测方向 2π 半球视场内的分布情况,根据分布随空间变化的具体量级,对不同的离轴角进行照度积分,可转化为对观测仪器的地气光抑制能力要求.

关 键 词: 地球大气; 遥感观测; 晨昏面

中图分类号: TP 702

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)02-0136-04

In-orbit spacecraft's earth and atmosphere radiation environment analysis

Yuan Yukai Chen Hongyu Wu Huiying

(Shanghai Engineering Center for Micro-Satellite, Shanghai 200050, China)

Abstract: To provide quantitative reference for related space mission analysis, the remote sensing the earth and atmosphere radiation (EAR) simplified model was proposed. A universal irradiation model that suited for most kinds of spacecraft orbit was introduced, which reduced different orbit scenarios to different angles between the orbit plane and the dawn-dusk plane of the earth. Then the spacecraft position on each orbit, or the phase, was taken into account. The spacecraft remote sensing mode determined the main axis and field of view(FOV). Irradiance propagation process was described with common hypothesis. Then the result display in two ways: distribution map and quantitative graph, which the former shows the relative position where the EAR is in the spacecraft's 2π hemisphere FOV, then the latter shows the magnitude distribution based on the average albedo. The following magnitude integral according to different off-axis angle could transform the faint target detecting requirement of space mission into the payload's stray light/radiation blocking requirement. A low earth orbit(LEO) observation example has been demonstrated at visible band.

Key words: earth atmosphere; remote sensing; dawn-dusk plane

地球-大气系统是指以地球表面为下限、大气上界为上限的空间系统,地气辐射一般指地球-大气系统向宇宙空间释放的各类辐射[1-2],这也是卫星观测的独有视角. 然而,地气辐射已成为航天器对暗弱目标探测及定量化遥感应用中严重的干扰因素,尤其是对于运行于近地轨道的天文观测载荷和星敏感器[3-5]. 目前已经对观测仪器本身进行了大量的地气等杂散辐射抑制的研究,但工作基本上仅仅对仪器自身进行分析、以研究如何更加有效地阻挡和消除[6-7],至于地气辐射的具体空间分布和强度以及随时间变化的规律,多根据粗略的经验值或统计值[6,8],尚未形成明确的结论,这对于航天任务的设计、规划与调度分析形成了障碍.

在可见光及近红外波段,地气辐射(也称为地气光)相对于观测载荷的分布,需要考虑太阳、

收稿日期: 2009-12-07

基金项目: 中科院知识创新工程(KGCX1-YW-16)

作者简介: 原育凯(1979 -),男,山西晋城人,助研,ykyuan@ ustc. edu.

地球和观测载荷三者的空间位置关系[8-9];而在中长红外波段,一般只需要考虑地球和观测载荷两要素. 下文以可见光波段为例,考察地气光对于空间观测载荷的空间分布及时间特性.

1　建立模型

观测载荷随航天器可运行在各种高度、倾角、偏心率等轨道上,因此其地气光随时间、空间的分布情况复杂而且多变,有必要适当将其简化,归纳到统一的计算模型中.

1.1　各类轨道的归纳

图 1 列举了典型的航天器轨道,可以注意到地球表面明显分为阳照区和地影区两部分,分界标志为晨昏圈(或晨昏面),而能成为地气光来源的必须位于阳照区,那么确定观测载荷视场(及扩展视场)中晨昏圈的位置成为分析航天器地气光分布的关键.

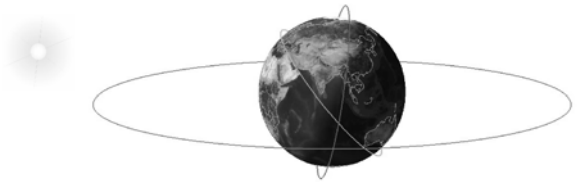


图 1　典型轨道示意图
(从左至右依次为 GEO、ISS、SSO 轨道)

在建立的模型中,关键的 2 个因素为地球晨昏面和航天器轨道面. 定义晨昏面方向与太阳矢量方向一致,该面在地球表面形成晨昏圈,半径为地球平均半径(如果考虑地气影响,需要适当增加高度);以圆轨道航天器为例,其飞行轨迹也是圆,则晨昏圈和轨道轨迹二者圆心重合即地心,显然,晨昏面与轨道面的夹角即为 β 角(太阳光照角)的余角,本文称为 β 余角,此角因季节、轨道进动等因素随时间不断变化.

上述模型描述见图 2,xOy 为晨昏面,由球心指向纸外为 $+x$ 轴,太阳沿 $-z$ 方向垂直照射在该平面上. 然后定义坐标系,航天器轨道面与晨昏面的交线在 x 轴上,定义 β 余角为 η. 航天器在图中的轨道轨迹上逆时针飞行,其每一周的相位定义为:由地心指向 $+x$ 方向为航天器过晨昏面时刻,可称为 6 点方向;航天器飞行到达 yOz 平面时,其到晨昏面距离达到 $+z$ 向最大,此时的轨道面相位角称为 12 点方向;随后航天器相位角继续增大,但与晨昏面距离减小,当航天器再次到达晨昏面时称为昏点,称为 18 点方向;当航天器位于晨昏面下方时($-z$ 方向)相位角取 18 点到 6 点区间.

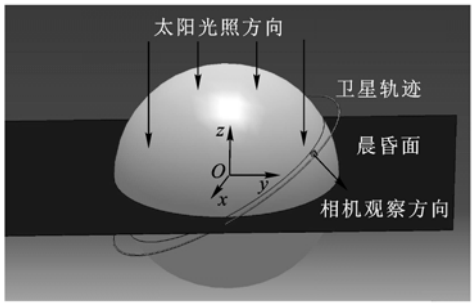


图 2　统一的光照模型图

1.2　照度传递关系

从上述坐标系可以看出,地气光的分布问题,需要考察航天器轨道面与晨昏面所夹的 $+z$ 球面部分(阳照区)与航天器观测载荷光轴的相对位置关系,以星敏感器为例,定义观测方向为垂直于轨道面反太阳方向,视场正下方为地心方向. 地气光问题需要考察这一过程的照度传递关系.

下面根据照度传递关系推导定量化分析结果.

图 3 中观测目标面元的光线到达相机光学入口单位面积产生的照度为

$$E_{d0} = \frac{\sigma E_S \cos\gamma \cos\varepsilon \cos\alpha}{\pi D^2} \mathrm{d}S \qquad (1)$$

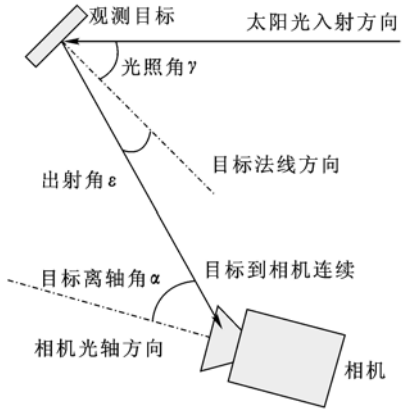


图 3　观测过程的照度传递示意

式中,σ 为面元反照率;E_S 为太阳在大气层外的光照度;γ 为太阳到面元连线与面元法线的夹角,即光照角;ε 为相机到目标面元 $\mathrm{d}S$ 的连线与面元法线的夹角,即出射角;α 为相机到 $\mathrm{d}S$ 连线与相机光轴的夹角,即离轴角;$\mathrm{d}S$ 为被照射目标面元,D 为相机到面元的距离. 上述表达式中,除了 E_S,σ,π 为固定数值外,其他均为随时间、空间的变化量,因此需要对上述 γ,ε,α 和 D 变量进行确定.

以下对航天器和地表点分别建立约束. 在前述坐标系下,设航天器在某一时刻的空间位置为 (x_s, y_s, z_s),轨道半径为地球半径 R_E 加轨道高度

H,则其约束条件如下:

$$\left.\begin{aligned} & x_S^2 + y_S^2 + z_S^2 = (R_E + H)^2 \\ & \frac{x_S}{R_E + H} = \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \\ & z_S = y_S \tan\eta \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中,T 为轨道周期;t 为相对时刻;η 为 β 余角,定义见上文.

设地球表面的任一点坐标为(x_E, y_E, z_E),可能会对观测载荷产生地气光影响的点的条件包括:处于观测载荷视场角 180°范围内,即以相机光轴为中心的 2π 半球面上;同时处于阳照区,考虑到地球的表面弯曲,还要增加航天器地表连线与地球相切的约束,其方程为

$$\left.\begin{aligned} & x_E^2 + y_E^2 + z_E^2 = R_E^2 \\ & 0 \leqslant z_E \leqslant y_E \tan\eta \\ & (x_S - x_E)^2 + (y_S - y_E)^2 + (z_S - z_E)^2 \leqslant \\ & \qquad (R_E + H)^2 - R_E^2 \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

联立上述关系式,得出如下结果:

$$\left.\begin{aligned} & \cos\gamma = \frac{z_E}{R_E} \\ & D = \sqrt{(x_S - x_E)^2 + (y_S - y_E)^2 + (z_S - z_E)^2} \\ & \cos\varepsilon = \frac{x_E x_S + y_E y_S + z_E z_S - R_E^2}{R_E D} \\ & \cos\alpha = \frac{(y_E - y_S)\sin\eta - (z_E - z_S)\cos\eta}{D} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

利用上述推导结果,带入具体数值可得出定量化的结果.

2 分析结果

从上述推导过程可以看出,航天器运行中的 β 角是分析计算的关键,因此这里以近地太阳同步轨道为例,说明地气光分析结果的形式. 太阳同步轨道的 β 角随季节的变化比较明显,整体上变化相对平缓.

考虑较为特殊的情况包括:首先考察各季节轨迹中的 12 点相位的情况,此时的地气光在观测视场中的区域达到极大值;然后考察每轨中不同相位的情况. 计算结果从 2 个方面给出:区域估计和定量化计算两方面. 其中,在区域估计中,忽略地气光的强度变化,仅仅考察出现在光轴 2π 半球视场内的地气光分布区域;而在定量化计算中根据光照度的传递关系,计算空间各个方向传输到观测载荷入口的地气光照度.

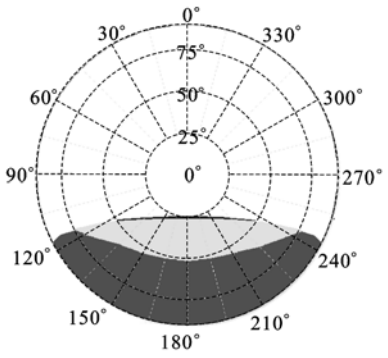
2.1 分布区域估计

分布区域的估计可以根据上述推导结果进行计算,也可以采用仿真软件进行评估.

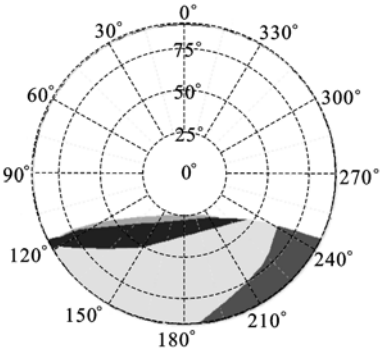
现以仿真手段为例,在光线追迹软件 TracePro 中建立地球、航天器和太阳模型,通过大量光线追迹得出结果;图 4a 中显示了地气光的分布区域,坐标采用极轴向上的极坐标系,边缘为 90°视场的界限. 色块区域为地气光在相机视场中的位置,图中不同颜色的色块从下到上依次为春秋季、冬季和夏季的情况,色块间逐级向上被包容. 可以得出夏季的地气光情况最为严重,春秋季的分布最小.

图 4b 为在夏季时每轨中不同相位的地气光分布图,色块区域为地气光在相机视场中的位置,图中不同颜色的色块从下到上依次为轨道相位为 18 点、17 点、16 点和 14 点方向的情况,色块间逐级向上被包容. 随着时间推移,分布区域逐渐减小.

可以注意到位于 12 点方向前后 1 个范围内约 10 点到 14 点区间,地气光分布没有明显变化,可认为分布达到饱和状态. 而互补角度的上午 6 点、7 点、8 点以及 10 点方向的分布,与图 4b 中的结果是左右对称的. 超过 18 点后和早于 6 点前,观测载荷视场 180°范围内仍有地气光分布,20 点至 4 点区间内,2π 半球视场内地气光完全消失.



a 地气光分布的季节变化



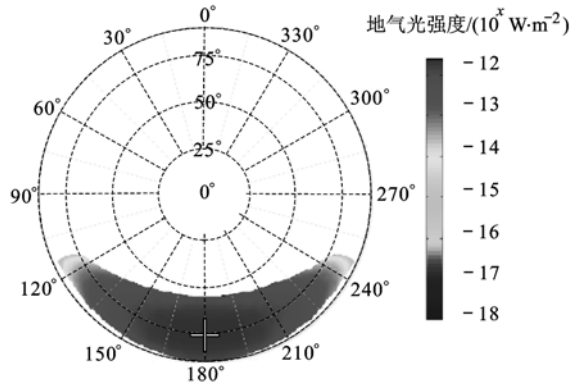
b 夏季地气光分布在每轨中的变化

图 4 光线追迹仿真结果

2.2　定量化结果

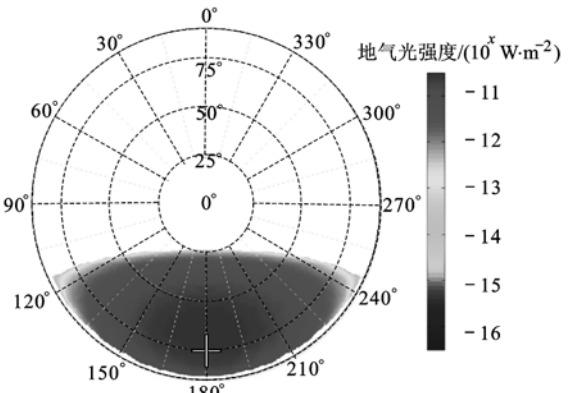
将上述仿真过程引入实际的光度值,得出具有强度数值的地气光空间分布图;图 5 中采用对数坐标,峰值和总计标注于下方,其中 a 为春秋季的情况,b 为夏季情况.

将上述杂散光分布进行同离轴角的强度积分,得出地气光强度与离轴角的关系见图 6,可进一步建立对轴对称光学系统的地气光抑制指标要求.



极大值(十字):2.02×10^{-12} W/m^2,合计:0.78W/m^2

a　春秋季



极大值(十字):2.23×10^{-11} W/m^2,合计:24.2W/m^2

b　夏季

图 5　地气光强度空间分布图

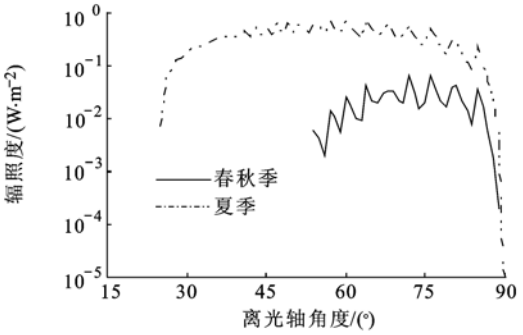


图 6　不同季节的地气光积分强度

3　结　论

长期来看,地气光在航天器视场中的分布和强度随季节更替有显著的差异;短期变化中,每轨约有一半时间会受到地气光影响. 对于航天器任意具体时刻地气辐射的了解有助于航天任务的系统分析.

本文建立的模型能够应用于大多数常用航天器轨道,计算过程容易实现,分析结果具有通用性,特别是对于空间天文观测和导航定位用星敏感器的分析设计.

参考文献(References)

[1] 陈创买,李叶新,周文,等. 地气系统辐射平衡特征的观测研究[J]. 中山大学学报,2003,42(1):87 - 90
Chen Chuangmai, Li Yexin, Zhou Wen, et al. An observation study on the radiation budget characteristic for earth-atmospheric system[J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis SUN Yat-seni,2003,42(1):87 - 90(in Chinese)

[2] Yang Chunping, Meng Xueqing, Wu Jian. Approximate model for calculating radiance of atmospheric background[C]//Zhang Yudong. 4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing. Bellingham:SPIE,2009,7283(3S):1 - 5

[3] Guo Q, Xu J M, Zhang W J. Stray light modeling and analysis for the FY-2 meteorological satellite[J]. International Journal of Remote Sensing,2005,26(13):2817 - 2830

[4] Zong Y Q, Steven W B, Gerhard M, et al. Characterization and correction of stray light in optical instruments[C]//Roland Meynart, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XI. Bellingham:SPIE,2007,6744(1L):1 - 6

[5] Uwe S. Intelligent error correction method applied on active pixel sensor based star tracker[C]// Jean-Pierre Chatard, Detectors and Associated Signal Processing II. Bellingham: SPIE, 2005, 5964(0J):1 - 8

[6] 唐勇,卢欣,郝云彩. 星敏感器杂光抑制分析[J]. 航天控制,2004,22(3):58 - 61
Tang Yong, Lu Xin, Hao Yuncai. Suppression and analysis of stray light in a star sensor[J]. Aerospace Control,2004,22(3):58 - 61(in Chinese)

[7] 杜胜华,夏新林,孙创. 星载多波段红外光学系统的杂散辐射分析[J]. 光子学报,2008,37(4):763 - 767
Du Shenghua, Xia Xinlin, Sun Chuang. Analysis on stray radiation of multi-spectral infrared remote sensor[J]. Acta Photonics Sinica,2008,37(4):763 - 767(in Chinese)

[8] 肖相国,王忠厚,白加光,等. 地表反照对天基测量相机的影响[J]. 光子学报,2009,38(2):375 - 361
Xiao Xiangguo, Wang Zhonghou, Bai Jiaguang, et al. Influence of earth radiation on photoelectric detection system based on space[J]. Acta Photonics Sinica, 2009, 38(2):375 - 361(in Chinese)

[9] 张云松,冯钟葵,石丹. 卫星观测方位对遥感成像的影响[J]. 遥感学报,2007,11(4):433 - 438
Zhang Yunsong, Feng Zhongkui, Shi Dan. The influence of satellite observation direction on remote sensing image[J]. Journal of Remote Sensing,2007,11(4):433 - 438(in Chinese)

(编　辑:刘　晔)