

地球大气临边背景红外辐射特性研究

史波¹ 李瑞¹ 刘纯胜² 吴兴无²

¹南京航空航天大学, 江苏 南京 210016

²航天科工集团第二研究院, 北京 100854

摘要 飞行器所在环境的红外辐射特性对其红外特征存在着重要影响,因此对飞行器背景进行红外辐射研究很有必要。对地球大气系统进行观测时,视场中仅由大气区域构成的地气系统范围称为临边背景。基于中光谱分辨率大气辐射传输模式利用大气辐射传输理论建立了临边红外辐射计算模型,针对3~5 μm 和8~14 μm 典型波段,计算了各纬度冬夏两季的临边背景红外辐射,获得了影响临边背景红外辐射的主要因素,即切线高度、纬度、季节、气溶胶和波段并对其进行分析,为地球临边背景红外辐射探测提供了理论支持。

关键词 红外辐射; 临边背景; 地球大气; 中光谱分辨率大气辐射传输模式

中图分类号 P407.6

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.120101

Research on Earth's Atmosphere Limb Background Infrared Radiation Characteristics

Shi Bo¹ Li Rui¹ Liu Chunsheng² Wu Xingwu²

¹Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

²The Second Institute of China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100854, China

Abstract The infrared radiation characteristics of the environment for spacecraft play a significant role in the infrared characteristics of the spacecraft. Thus the study on infrared radiation of aircraft background is essential. The regime which only consists of the regional atmospheric climate system in the field is called limb background in the view of the atmosphere system of the earth. Based on moderate spectral resolution atmospheric radiation transmittance algorithm (MODTRAN) atmospheric radiation model, the atmospheric radiation transmission theory is used to establish the limb infrared radiation model. Limb background infrared radiations are calculated at all latitudes in the typical wavelength ranges of 3~5 μm and 8~14 μm , including the seasons of winter and summer. The results show that the main factors affecting the limb background infrared radiation are tangent altitude, latitude, season, aerosol and wavelength range. These provide theoretical supports for the detection of limb background infrared radiation.

Key words infrared radiation; limb background; earth's atmosphere; moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm

OCIS codes 010.5620; 010.1290; 010.0280; 130.3060

1 引言

近年来,弹道导弹等高轨道飞行器的红外探测与卫星预警越显重要,该类飞行器的红外特征不仅与其自身红外辐射特性相关,与其所在的环境背景也密不可分。为了高效准确地得到飞行器的红外辐射特征,针对临边背景展开建模与仿真越来越重要。在国外, Crow等^[1]研究了地表区域及海洋区域的红外辐射特征,并将两区域的红外辐射与导弹的红外辐射合成得到了导弹及其背景的辐射特性。美国弹道导弹防御机构(BMDO)建立了导弹的太空、大气和地表背景模型,采用合成景象生成模型(SSGM)将目标辐射特性与背景辐射特性合成,完成了导弹红外辐射特性、背景红外辐射特性和红外景象的合成,得到了完整的目标、背

收稿日期: 2015-06-29; 收到修改稿日期: 2015-07-08; 网络出版日期: 2015-11-13

作者简介: 史波(1976—),男,博士,副教授,主要从事动力工程及工程热物理学等方面的研究。

E-mail: boshi@nuaa.edu.cn

景一体化模型。Nestler^[2]研究了导弹的大气背景辐射特性,获得了大气温度、密度等参数的变化规律。Randal^[3]研究了大气红外辐射特性,对大气特性有了进一步的认识。O'Neil等^[4]通过中段空间实验(MSX)进一步获得了高灵敏度、高空间分辨率和广光谱范围的临边红外图像。在国内,孟雪琴^[5]通过研究大气辐射的基本理论研究了地球大气背景的光谱特性及其对光谱传输的影响,并根据地球临边背景的特性建立了辐照度模型,为探测、分析地球大气系统的辐射特性提供了新的技术支持。杨春平^[6]根据大气组成研究了大气分子和气溶胶消光系数垂直廓线的构建方法和散射象函数,基于辐射传输方程研究了晴空条件下临边背景红外辐射特性的方法,初步得到了临边背景的辐射特性。沈国土等^[7]针对基于中光谱分辨率大气辐射传输模式(MODTRAN)的临边红外辐射模型建立了大气层外观测临边系统的辐射模型,对临边辐射计算具有巨大意义。谭鹏飞等^[8]采用大气逐线辐射传递计算模型前向参考辐射模型(RFM),计算了高层大气在局地热力平衡状态(LTE)与非局地热力平衡状态(non-LTE)条件下主要大气分子红外光谱带的临边辐射,分析了白天与夜间情况下 non-LTE 大气对红外临边辐射的影响并进行比较,确定了 LTE 条件的大气高度适用范围。王治飞等^[9]提出了基于贝叶斯模式识别的激光雷达大气遥感灰霾组分识别的方法,并利用具体的贝叶斯判别函数作为灰霾粒子光学特征向量的选择依据对灰霾粒子进行识别分类,仿真实现了该灰霾组分模式识别模型,并通过两种自验证方法检验了模型的正确性和稳定性以及该模型对现有大气遥感激光探测器的适用性。文献[10-13]也介绍了很多地球及临边背景相关的工作。

本文在 MODTRAN 辐射计算软件的基础上建立了临边背景红外辐射计算模型,针对全球范围内不同波段、纬度、季节、气溶胶模型建立辐射计算关系,总结了临边背景的红外辐射特性和影响临边背景红外辐射的主要因素。

2 临边背景红外辐射计算模型

临边背景红外辐射受到太阳辐射、地球辐射、地球反射辐射和大气自身辐射的作用。大气自身的辐射是临边背景红外辐射的主要部分,其中影响最为明显的是纬度变化引起的大气整体特征变化。在计算大气临边辐射时,地球及大气采用经纬度方式划分单元格,其中计算大气辐射的部分采用了 MODTRAN 大气传输模型。

2.1 临边背景几何计算模型

临边背景几何模型如图 1 所示,地球半径为 R (6371 km),大气层厚度为 H_a (100 km), A 为大气层外边界, P 为探测器所在位置, B 为辐射路径与大气层外边界的交点, AP 为辐射路径, AB 为辐射路径在大气层中的部分,称作真实辐射路径。从地心 O 点出发与辐射路径 AP 垂直的线段与地表及辐射路径分别交于 D 、 C 两点,定义从 D 点到 C 点的距离 H 叫做切线高度,即辐射路径距离地表最近的距离。探测器 P 点处海拔高度为 H_0 , P 点正上方为探测器天顶方向,该方向与辐射路径所夹的钝角称为探测器天顶角 ϕ , B 点天顶方向与辐射路径所夹的钝角称为辐射天顶角 ϕ' 。根据 P 点的坐标 (x_P, y_P, z_P) 、天顶角 ϕ 和方位角 ν 可以得到辐射路径长度 l 和真实辐射路径长度 l' 。

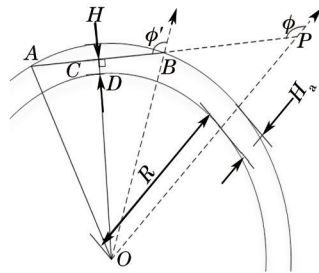


图1 临边背景几何模型

Fig.1 Limb background geometry model

辐射路径长度为

$$l = (R + H_0)\cos(\pi - \phi) + \sqrt{(R + H_a)^2 - [(R + H_0)\sin(\pi - \phi)]^2}. \quad (1)$$

真实辐射路径长度为

$$l' = 2\sqrt{(R + H_a)^2 - [(R + H_0)\sin(\pi - \phi)]^2}. \quad (2)$$

在临边红外辐射特性计算中,切线高度 H 是非常重要的一个参量,根据临边几何关系可求的切线高度 H 为

$$H = (R + H_0)\sin(\pi - \phi) - R. \quad (3)$$

根据MODTRAN红外辐射模型,计算红外辐射的参数为 A 点海拔高度、切线高度 H 、辐射天顶角 ϕ' 。

2.2 临边背景红外辐射计算模型

临边背景红外辐射模型计算的步骤:1) 根据临边背景几何模型确定几何计算关系;2) 确定纬度、季节等大气辐射计算参数;3) 将辐射计算几何模型和参数代入MODTRAN大气辐射计算软件计算获得不同纬度、季节在不同切线高度条件下的临边背景红外辐射。

临边背景红外辐射计算参数:1) 切线高度,切线高度和大气层厚度相关,由于MODTRAN计算高度适用范围为100 km大气层以下,所以变化范围为0~100 km;2) 大气模式,根据地表所处纬度和当地季节判断适用的大气模式,大气模式包括热带、中纬度冬季、中纬度夏季、高纬度冬季、高纬度夏季大气模式,热带大气模式为南北纬 $0^\circ \sim 30^\circ$,中纬度大气模式为南北纬 $30^\circ \sim 60^\circ$,高纬度大气模式为南北纬 $60^\circ \sim 90^\circ$ 。

MODTRAN计算所得结果为大气红外辐射亮度 E_r ,单位为 $W/(cm^2 \cdot sr)$ 。探测器表面辐照度用 E_{ir} 表示,单位为 W/cm^2 。

$$E_{ir} = E_r \times \omega_{sr}, \quad (4)$$

$$\omega_{sr} = \left(\alpha \times \frac{\pi}{180} \right)^2, \quad (5)$$

式中 ω_{sr} 为球面度, α 为探测器视场角度数。

3 计算结果及分析

根据卫星红外探测的基本特点建立了临边背景红外辐射模型,计算并获得了不同条件下的临边背景红外辐射分布。经对比分析不同情况下的辐照度分布,总结了影响临边背景红外辐射的主要因素有切线高度、波段、季节、纬度、气溶胶,为卫星临边背景的实际探测提供了理论支持。

通过计算获得了多种条件下的临边背景红外辐射随切线高度变化的分布图,如图2和图3所示,图中横坐标为切线高度,单位为km,纵坐标为辐照度,单位为 W/cm^2 。

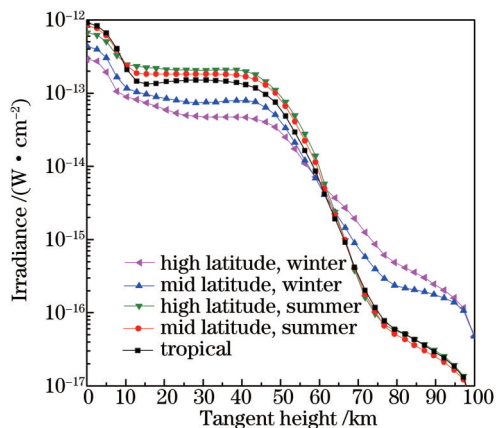


图2 3~5 μm 波段各纬度季节辐照度分布图

Fig.2 Irradiances at all latitudes of 3~5 μm wave range in winter and summer

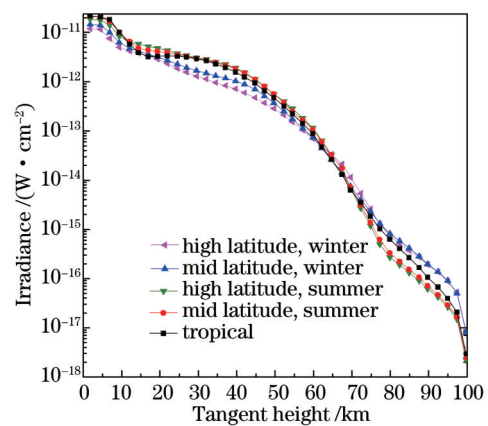


图3 8~14 μm 波段各纬度季节辐照度分布图

Fig.3 Irradiances at all latitudes of 8~14 μm wave range in winter and summer

3.1 切线高度变化对临边背景红外辐射的影响

图2和图3详细地呈现出了临边红外辐照度随切线高度变化的趋势,从图中可知,3~5 μm 波段与8~14 μm 波段的辐照度的变化趋势基本相同,仅辐照度的大小存在差距。从图2可知,3~5 μm 波段各纬度季节辐照度在10 km以下的对流层区域辐照度最强,并且呈明显下降趋势。10~50 km辐照度基本不变,这是由于平流层的大气垂直分布导致的。50~75 km范围内呈较快的指数下降趋势。70 km以上指数下降趋势有所减缓。从

图3可知,在8~14 μm 波段随着切线高度的变化辐照度分布总体趋势和3~5 μm 波段吻合,仅在10~50 km 范围内辐照度呈下降的趋势。图2和图3很好地呈现出了临边红外辐照度随切线高度变化的趋势,为进一步分析影响因素奠定了基础。

3.2 波段对临边背景红外辐射的影响

图4为8~14 μm 波段辐照度与3~5 μm 波段辐照度之比,横坐标为切线高度,单位为km,纵坐标为8~14 μm 波段的辐照度与3~5 μm 波段辐照度比值。从图中可以看出,8~14 μm 波段的辐照度明显高于3~5 μm 波段,且最小差距倍数接近于1,最大差距倍数达到48倍。对于夏季而言,20 km 以内均在26倍左右波动,20~50 km 间达6~8倍,50 km 以上有一个小的升幅随后下降到接近于1;在冬季20 km 以下的辐照度比例在45倍左右波动,随后直线下降到8倍左右,随后的升幅略小于夏季,最后达到1左右。可见不同波段临边辐射的差距较大,两波段辐照度比例总体随切线高度的升高而下降。

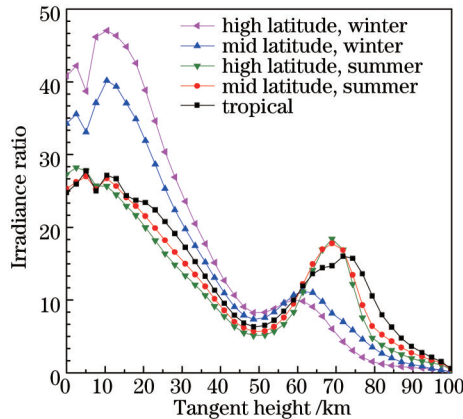


图4 8~14 μm 波段对3~5 μm 辐照度的比较结果

Fig.4 Results of 8~14 μm wave range irradiances compared with 3~5 μm

3.3 季节变化对临边背景红外辐射的影响

图5为高纬度和中纬度两种情况下3~5 μm 和8~14 μm 两波段冬夏季辐射比例对比。其中,横坐标为切线高度,单位为km,纵坐标为冬季辐照度与夏季辐照度比值。图中3~5 μm 波段切线高度60 km 以下夏季辐射明显强于冬季辐射,夏冬两季辐照度之比约为2:1,在60 km 高度以上冬季辐射更强一点,但该区域辐射本就较弱,而且受季节影响很小。由于季节变化的影响主要集中在对流层,平流层也受到一定的影响,从而导致冬季辐射明显低于夏季辐射。8~14 μm 波段的冬夏季辐射对比分析与3~5 μm 波段趋势基本相同,总体在1:2左右波动,辐照度比例在0~60 km 高度范围内仍然存在较小的波动。

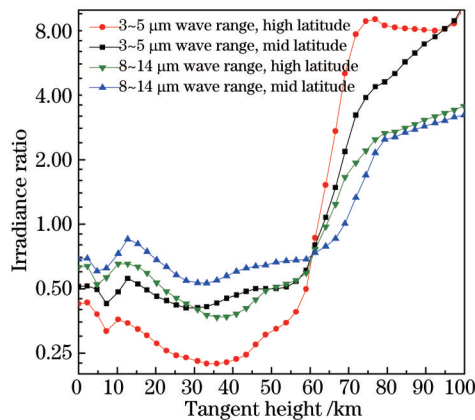


图5 冬夏季辐照度比值分布

Fig.5 Results of irradiances of winter compared to summer

3.4 纬度变化对临边背景红外辐射的影响

图6为不同波段和季节条件下中纬度辐照度除以高纬度辐照度的比例图,横坐标为切线高度,单位为km,纵坐标为中纬度辐照度与高纬度辐照度取常用对数的比值。图中不同纬度的辐照度在对流层、平流层及平流

层以上拥有不同的规律。在 10 km 以内,中纬度辐照度总是大于高纬度的,辐照度比值为 1.0~1.6。在 10~60 km 范围内,冬季时两个波段中纬度辐照度大于高纬度,而且冬季波动较大,先下降至 0.4 左右,再上升到 0.8 左右,夏季时中纬度辐照度小于高纬度,而且基本维持在 0.8 左右。可见纬度变化对辐照度的影响不可忽略。

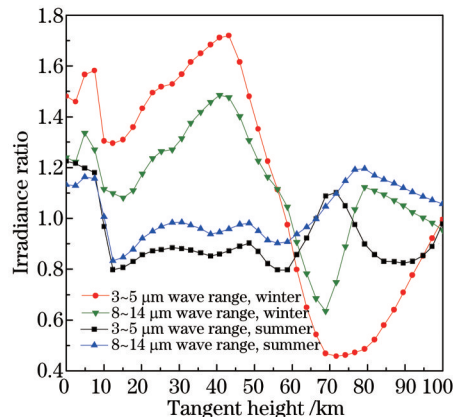


图 6 中、高纬度辐照度比值

Fig.6 Results of mid latitude compared with high latitude irradiances

3.5 气溶胶模式对临边背景红外辐射的影响

图 7 给出了中纬度 3~5 μm 波段在乡村、海洋和荒漠气溶胶模式条件下的辐射亮度分布,经分析得知气溶胶的影响主要集中在对流层 0~5 km。总体而言,沙漠气溶胶的辐射亮度最大,海洋气溶胶次之,乡村气溶胶最小,而且在 3~5 μm 波段海洋气溶胶和乡村气溶胶辐射亮度十分相近,8~14 μm 波段海洋气溶胶与荒漠气溶胶辐射亮度相近。可见气溶胶模式对临边背景辐射的影响也是不能够忽略的。

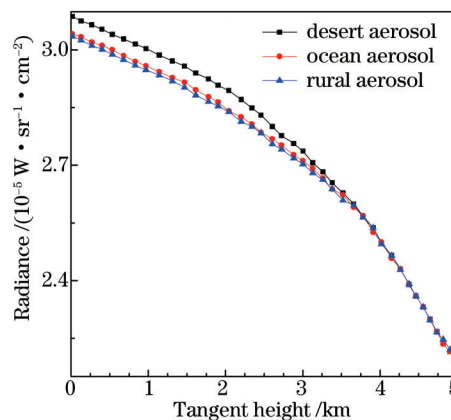


图 7 中纬度 3~5 μm 波段气溶胶辐射亮度对比分布

Fig.7 Comparisons of mid latitude 3~5 μm wave range radiances with different aerosols

4 结 论

在地球大气临边背景的红外辐射探测研究中,针对临边背景红外辐射的基本特点,建立了相应的计算模型,从而获得了临边背景红外辐射随切线高度的分布特点和影响临边背景红外辐射特性的主要因素,为临边背景红外辐射探测提供了理论依据和数据支持,并为红外辐射探测器的设计提供了指导。

参 考 文 献

- 1 Crow D R, Coker C. Composite hardbody and missile plume (CHAMP 98) IR scene generation program[C]. SPIE, 1998, 3368: 256-268.
- 2 Nestler S T. Statistical Analysis of Atmospheric Properties for Estimation of Infrared Radiance of Ballistic Missiles[R]. Monterey: 1999.
- 3 Randall C M. Infrared atmospheric effects[J]. Optical Engineering, 1975, 14(1): 31-37.
- 4 O'Neil R R, Gardiner H A B, Gibson J, *et al.*. Midcourse space experiment (MSX): Plans and capability for the measurement of infrared earthlimb and terrestrial backgrounds[C]. SPIE, 1994, 2223: 264-273.

- 5 Meng Xueqin. Theoretical Modeling of the Spectral Radiation of the Earth Atmosphere[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
孟雪琴. 地球大气背景光谱辐射特性的理论建模[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- 6 Yang Chunping. Modeling and Simulating of Spectral Radiance Property for Sky Background[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
杨春平. 天空背景光谱特性建模及仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- 7 Shen Guotu, Cai Jiguang, Yang Baocheng, *et al.*. Preliminary study of theoretical simulation of sky radiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, (z1): 399-403.
沈国土, 蔡继光, 杨宝成, 等. 空中辐射环境理论建模初探[J]. *红外与激光工程*, 2006, (z1): 399-403.
- 8 Tan Pengfei, Han Yuge, Xuan Yimin. Analysis of non-local thermodynamic equilibrium effect on infrared limb radiance in the upper atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1001001.
谭鹏飞, 韩玉阁, 宣益民. 高层非局地热力平衡大气对红外临边辐射的影响分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1001001.
- 9 Wang Zhifei, Liu Dong, Cheng Zhongtao, *et al.*. Pattern recognition model for haze identification with atmospheric backscatter lidars[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1113001.
王治飞, 刘东, 成中涛, 等. 基于模式识别的激光雷达遥感灰霾组分识别模型[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1113001.
- 10 Jin Lihua. Simulation on Radiance from Atmospheric Limb Scattering and Sensitivity Analysis[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
金丽华. 大气 Limb 辐射亮度模拟及其敏感性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- 11 Li Xuebing, Xu Qingshan, Wei Heli, *et al.*. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1655-1658.
李学彬, 徐青山, 魏合理, 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1655-1658.
- 12 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.*. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0113001.
- 13 Sun Xinhui, Zhang Tianshu, Lu Yihuai, *et al.*. Optimization solution of atmospheric profile extinction coefficient by scanning lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0314001.
孙新会, 张天舒, 陆亦怀, 等. 扫描激光雷达大气剖面消光系数优化求解[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0314001.

栏目编辑: 史敏