

文章编号: 1672-8785(2018)02-0039-05

大气成分对中波红外地基光电系统观测的影响分析

朱 会¹ 李 周^{2,3*} 余 毅² 何锋赞²

(1. 中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116000;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 地基光电系统白天在可见光波段对空间目标观测时, 因受大气散射等因素的影响, 探测能力会急剧下降。红外波段较可见光波段具有较强的大气穿透能力, 因此在红外波段观测空间目标可以较好地解决白天探测的问题。利用 MODTRAN 模型计算了不同大气成分对中波红外透射率的影响并进行了分析, 并用中波红外成像系统在地基望远镜上进行了观测。实验结果表明, 中波红外探测器在白天能极限探测到 7 等星, 平均信噪比为 6.236。本研究对白天红外波段地基的空间探测具有一定参考意义。

关键词: 星等; 白天观测; MODTRAN; 信噪比

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.02.007

Analysis of Influence of Atmospheric Composition on Ground-based Medium Wave Infrared Optical System Observation

ZHU Hui¹, LI Zhou^{2,3*}, YU Yi², HE Feng-yun²

(1. No. 91550 Troops of the Chinese People's Liberation Army, Dalian 116000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: When a ground-based opto-electronic system is used to observe the space targets in the visible light waveband in the daytime, its detection ability will drop sharply due to the factors such as atmospheric scattering. Compared with the visible light waveband, the infrared waveband has strong atmospheric penetration ability. Therefore, to observe space targets in the infrared waveband can solve the detection problem occurred in the daytime. The influence of different atmospheric composition on medium wave infrared transmission is calculated and analyzed by a MODTRAN software and a medium wave infrared imaging system is used in a ground-based telescope for observation. The experimental results show that the medium wave infrared detector can detect the stars of seventh magnitude in the daytime and the average signal-to-noise ratio is 6.236. This research is of a certain referential significance to the space detection by ground-based infrared telescopes in the daytime.

收稿日期: 2018-01-03

作者简介: 朱会(1977-),男,辽宁大连人,学士,主要从事数据处理与测量技术研究。

E-mail: xiao_chunsheng@163.com

Key words: star magnitude; daytime detection; MODTRAN; signal to noise ratio

0 引言

随着航天技术的飞速发展,各国对太空探索的投入不断增加。目前,空间目标探测的主要手段是地基光电望远镜。光电望远镜具有测角精度高、探测距离远、造价低的优势,但其极易受太阳辐射及大气散射的影响,且多数空间目标只能在夜晚观测。使用白天探测技术可以弥补光电探测系统观测时间短的缺陷,提高光电系统的观测时长。美国使用口径为 1.6 m、探测波段为 0.9~1.8 μm 的望远镜进行观测,白天探测能力达到了 9 等星^[1-2]。俄罗斯主要使用 AZT-14、SBG、Zeiss 系列光学望远镜进行观测,望远镜的口径在 45~100 cm 之间,白天对空间目标的探测能力达到 10 等星^[3-4]。在国内,中科院长春光机所从上世纪 90 年代起陆续使用口径为 350 mm、焦距为 3000 mm 的电影经纬仪进行白天测星实验,最好的实验效果是在下午 15 时观测到了 5.4 等星^[5-6]。王伟国等采用光谱滤波方法使用 650 mm 口径的望远镜在白天天空背景亮度为 3.4 m 的条件下,极限探测能力达到了 7 等星。综合国内外白天探测的研究现状,白天探测对地基光电系统全天时探测具有重要的意义^[7]。

本文使用 MODTRAN 大气计算软件,针对大气对白天观测带来的影响,对大气各主要成分在中波红外波段的透过率进行了分析。使用中波红外光电系统对恒星开展了白天观测实验。实验结果表明,在未使用光谱滤波等抑制天空背景辐射的实验条件下^[8],中波红外系统白天可有效观测 7 等星,在有薄云的情况下也可对恒星进行有效观测。

1 可探测星等极限值的计算方法

根据天文学规定,恒星在相差五个星等时照度相差 100 倍。因此在计算恒星辐射出度时,星等较高的恒星比星等较低的恒星辐射出

射度低 2.5 倍^[7]。

用红外探测器观测恒星时,将观测恒星的信号能量大于 5 倍背景噪声的能量作为恒星可被观测的最低标准^[8-9]。经过测量得到恒星在探测器上的单位时间灰度值为 N_{dj} ;使用同样的方法去观测一颗标准星,得到其单位时间的读出是 N_{sd} ;假定对两者的观测条件完全相同,并在设备、地平高度和大气吸收完全一致时,则可求得该目标的星等值为

$$m_{dj} = m_{sd} - 2.5 \lg \frac{N_{sd}}{N_{dj}} \quad (1)$$

式中, m_{sd} 为红外标准星的星等值, m_{dj} 为待测星体的星等值。

1.1 中波红外大气的传输特性

红外探测是以被观测物体自身的热辐射作为信息源的,因此只受限于被观测物体自身的温度变化,昼夜变化并不影响目标源自身的红外辐射。但大气背景是一个纵深背景而非一个平面,空间目标的红外辐射经过大气层时会发生吸收、散射、反射,因此大气介质会对红外辐射产生衰减作用。通过红外目标对比度的计算可知,在中波红外波段(3~5 μm)大气窗口的大气背景辐射较小,相比于可见光波段不易产生瑞利散射,因此在中波波段更容易探测到目标。

地基光电系统在观测空间目标时,常受到不同大气环境的影响,因此大气中各成分是制约光电望远镜成像质量的主要原因,其中对红外吸收起主要作用的有二氧化碳(CO_2)、水蒸气(H_2O)和臭氧(O_3)^[10-11]。因此,我们利用 MODTRAN 模型对这 3 种气体的透过率进行计算,并分析它们对中波红外波段传输效果的影响。

1.1.1 大气成分透过率分析

MODTRAN 是由美国空军物理实验室(The Air Force Research Lab, AFRL)和光谱科技公司(Spectral Sciences, SS)联合开发的一种

针对中等光谱分辨率大气透过率及辐射传输算法的分析软件, 目前已成为较主流的大气传输率与辐射率计算软件。

计算时, 选择中纬度夏季大气模型, 将参数设置为海拔 200 m, 太阳高度角为 45° , 波长为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 。图 1 为中波红外波段在大气中的整体透过率, 在 $3.5\ \mu\text{m}$ 和 $4.5\ \mu\text{m}$ 波长处大气传输率急剧下降, 在 $3.5\ \mu\text{m}$ 波长处传输率甚至为 0; 在 $4\ \mu\text{m}$ 和 $4.75\ \mu\text{m}$ 左右传输率较高, 由于空间目标发射的红外为连续波段, 因此部分波段的红外辐射不能透过大气, 被探测器接收时不会对目标的探测产生决定性的影响^[12]。考虑到大气由多种气体组成, 为了细化分析哪种因素对大气透过率的影响较大, 分别计算 CO_2 、 H_2O 、和 O_3 在同样条件下的传输率。

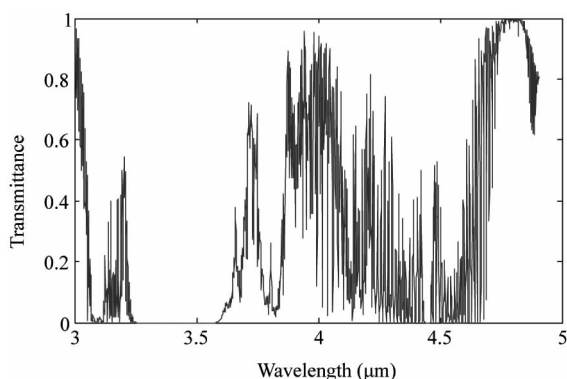


图 1 中纬度夏季大气的整体透过率

光线经过水蒸气时会被水分子吸收, 而水蒸气在高空遇冷会凝结成水滴或者冰晶, 使光线产生散射现象并反射到各个方向。如图 2 所示, 水蒸气在中波红外波段的整体传输率较好, 对波长为 $3.5\ \mu\text{m}$ 左右的光线传输基本没有影响, 但在 $4.5\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段光线的传输率在平均传输率之下。

臭氧的透过率呈波形分布方式, 如图 3 所示, 在传输率极好和极差的波段都较少, 传输率主要集中在 $0.4\sim 0.7$ 之间。由于臭氧在空气中所占比例较小, 并且在特殊条件下可自行分解为氧气, 因此臭氧对中波红外波段的影响相对较小。

如图 4 所示, 二氧化碳在 $3.5\ \mu\text{m}$ 波段附近的

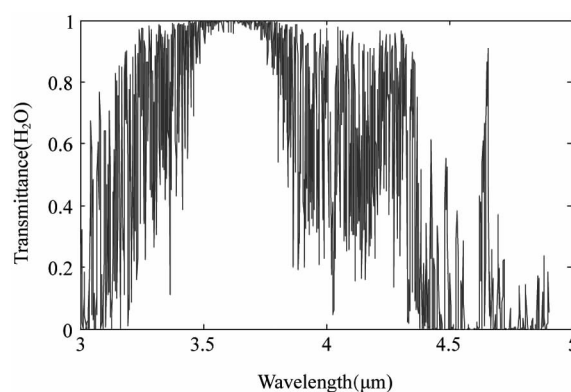


图 2 中纬度夏季水蒸气的透过率

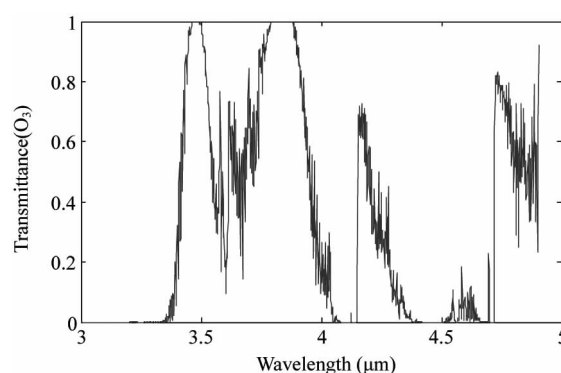


图 3 中纬度夏季臭氧(O_3)透过率

传输率基本为 0, 因此在此范围大气的传输效果不好主要是由二氧化碳导致的。但在大于 $3.5\ \mu\text{m}$ 的波段, 其传输率大幅提高, 平均传输率可达 0.9 以上。

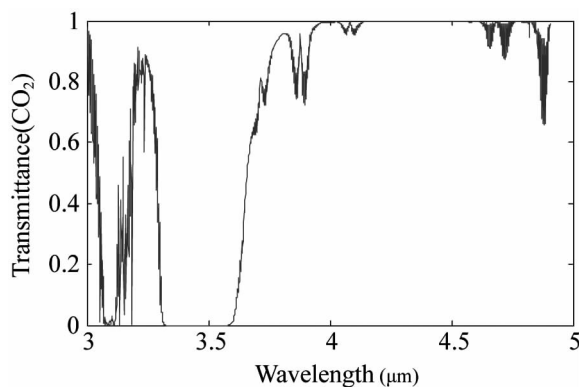


图 4 中纬度夏季 CO_2 的透过率

综上分析可知, 在 $3.5\ \mu\text{m}$ 附近主要由二氧化碳导致整体透过率为 0, 水蒸气和臭氧没有对整体传输率产生较大影响。在 $4.5\ \mu\text{m}$ 附近, 二氧化碳的透过率最好, 基本不会对光线传输产生任何影响, 而水蒸气和臭氧在此波段

的传输效果较差,是导致整体传输率不佳的主要原因。

考虑到以上三种气体是导致大气透过率下降的主要因素,雨后空气中水蒸气及臭氧的含量较高,下午及傍晚时分工业排放气体经过不断累积,空气中二氧化碳的含量达到白天时段的峰值,因此上午晴朗干燥天气为最佳观测时段。

2 白天观测实验

使用 F 数为 2 的同轴三反式光学系统,如图 6 所示。光线入射到主镜,经过次镜和三镜的反射后被中波相机接收^[13-14]。光学系统的主口径为 1 m,系统的焦距为 2 m^[15]。系统所用相机为 HgCdTe 焦平面探测器, A/D 输出值为 14bit,分辨率为 320×256 ,像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$,响应波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。



图 5 红外中波探测器

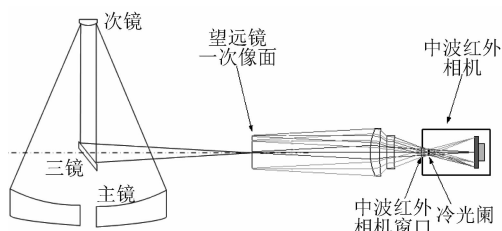


图 6 光学系统的示意图

为检验本文光电系统的探测能力,开展了空间目标白天红外测量实验。在夏季 6 月某日下午 16 时,天空只有少量薄云时对不同天体进行观测^[11]。首先使用天空晴朗无云处的天

空背景对探测器进行单点校正,相机积分时间设置为 5 ms。

如图 7 所示,由于拍摄的星体在图像中只占据几个像素,因此,需取目标所占全部像素的平均信噪比作为该幅图像中星体的信噪比。考虑到大气的流动及相机自身会产生噪声,因此在观测星体时连续对其拍摄 10 帧图像,以减小随机误差,每幅图像中星体的信噪比信息如图 8 所示。表 1 中的信噪比为连续拍摄的不同星体的平均信噪比。

表 1 探测星等及平均信噪比

时间 (UTC)	光谱 类型	星等	太阳 高角	信噪比
T083934	K2	1.36	24°	19.815
T084116	K0	3.52	24°	9.412
T084224	K5	5	23°	8.786
T084632	K3	7	23°	6.236

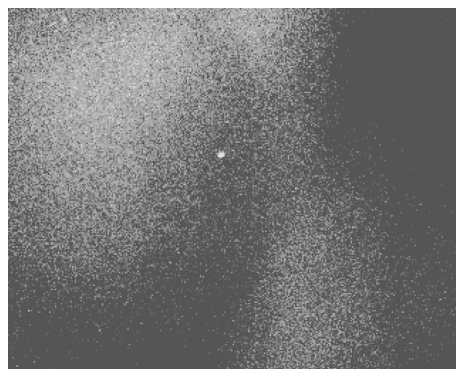


图 7 观测的红外星图像

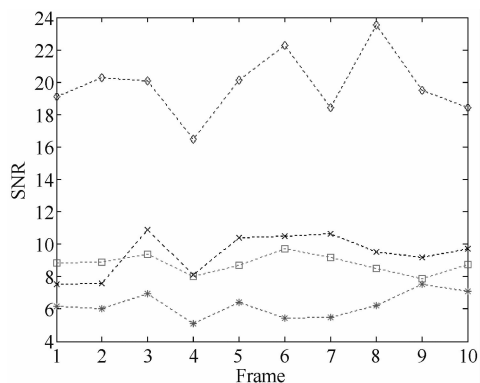


图 8 连续 10 帧图像的信噪比

3 结论

使用 MODTRAN 模型分析了不同大气成分对中波红外传输率的影响。使用地基光电系统进行了红外星白天观测实验。实验结果表明, 系统探测的星体图像的信噪比在较小范围内变化, 最高可探测 7 等星, 7 等星时的平均信噪比为 6.236。观测实验为空间目标的中波红外探测提供了重要参考。

参考文献

- [1] 王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [2] 牛照东, 汪琳, 段宇, 等. 国外地球同步轨道目标天基光学监视策略 [J]. 中国光学, 2017, 10(3): 310–320.
- [3] Alexander C D. Design of a Day/Night Star Camera System [C]. SPIE, 1999, 3779: 47–54.
- [4] 谭碧涛, 景春元, 王宝国, 等. 光谱滤波技术对星等测量精度的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 221–224.
- [5] 白天测星研究报告 [R]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 1992.
- [6] 刘祥意, 张景旭, 乔兵, 等. 应用于冷光学组件的透镜支撑技术研究 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1850–1856.

- [7] 王铎, 韩艳丽, 孙腾飞. 三视场白天测星研究 [J]. 光电技术应用, 2014, 29(5): 26–30.
- [8] 魏合理, 陈秀红, 余凯, 等. 白天 CCD 观星可探测极限星等值分析 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(2): 187–192.
- [9] 贺宇, 王岭雪, 蔡毅, 等. 折反射周视系统研究进展与展望 [J]. 中国光学, 2017, 10(5): 681–698.
- [10] 田昌会, 杨百愚, 蔡明, 等. 大气背景对红外目标探测的影响 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 438–441.
- [11] 赵云峰, 李夜金, 张寅, 等. 海洋背景下运动目标的天基红外探测场景生成系统 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 487–493.
- [12] 陶金, 易凡, 王攀, 等. 地球大气系统对红外目标探测影响的分析 [J]. 光学与光电技术, 2013, 11(5): 44–47.
- [13] 田博, 谢放, 范春懿, 等. 低轨红外探测卫星对大气层内高动态目标的探测能力研究 [J]. 红外, 2015, 36(5): 1–7.
- [14] 钟兴, 贾继强, 金光, 等. 机载导航白天星敏感器的探测性能及总体设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2900–2906.
- [15] 王昊京, 王建立, 吴量, 等. 基于粗测位置和方位的三视场快速星图识别方法 [J]. 中国光学, 2014, 7(5): 768–778.

(上接第 33 页)

参考文献

- [1] 宋豫晓. 基于红外探测的人员工作状态自动监控与告警系统 [J]. 红外, 2016, 37(8): 29–32.
- [2] 张俊才, 刘树聘. 基于计算机控制的红外监控系统的设计与实现 [J]. 微计算机信息, 2010, 26(9): 91–93.
- [3] 曹学飞, 李雪梅, 朱云雷. 基于 C8051F120 的红外监控报警系统的设计 [J]. 微型机与应用, 2014, 33(1): 87–88.
- [4] 宋悦, 周玉国, 李清慧, 等. 基于 ARM 的嵌入式红外图像监控系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2013, 11: 38–40.
- [5] HC-SR501 人体感应模块说明书 [Z]. 2017.

- [6] 陈齐亚, 米超. 民航气象报文综合应用系统软件的总体设计 [J]. 电脑知识与技术, 2011, 30(7): 7321–7323.
- [7] 巴文, 宋国红, 李宝富. 民航电报编码 ITA2 和 IA5 相互转换的 VB 编程实现方法 [J]. 电脑开发与应用, 2010, 23(9): 10–12.
- [8] 孙晓霞, 刘星燕, 孙跃飞, 等. 气象报文转换程序设计 [J]. 软件, 2012, 33(6): 72–74.
- [9] 马月枝. 气象报文编发监控报警系统设计 [J]. 气象与环境科学, 2009, 32(1): 91–93.
- [10] 朱剑明. 基于新一代民航气象数据库的报文检索系统设计与实现 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2016, 15: 59–60.