

文章编号: 2095-4980(2014)01-0037-04

金星表面 THz 遥感探测

苏兴华¹, 于春香², 王瀚卿¹

(1.中国航天科技集团公司 上海航天电子通讯设备研究所, 上海 201109;
2.中国兵器工业集团公司 华东光电集成器件研究所, 江苏 苏州 215163)

摘要:从“金星快车可见光与红外热成像光谱仪(VIRTIS)载荷成功地实现了对金星表面辐射探测”事实出发,利用高分辨率传输分子光谱数据库(HITRAN),仿真验证了金星大气模型相适应的近红外大气窗口,从而分析并获取了金星 THz 大气窗口。与此相适应,从实现金星地表全天候遥感探测科学目标出发,系统阐述了金星大气 THz 窗口下探测的优势,提出多功能金星遥感构想。

关键词:金星; 表面遥感; 大气模型; 窗口; THz 频谱

中图分类号: TN917

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201401.0037

THz remote sensing for exploration Venus surface

SU Xing-hua¹, YU Chun-xiang², WANG Han-qing¹

(1.Shanghai Institute of Electronic Commutation Instrument, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China;
2.East China Institute of Optical-Electronic Intergraded System, China North Industries Group Corporation, Suzhou Jiangsu 215163, China)

Abstract: Based on High Resolution Transmission(HITRAN) database and the fact that the imaging spectrometer Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer(VIRTIS) on the "Venus Express" has observed thermal emissions from the surface of Venus, infrared atmosphere windows adapted to the Venus atmosphere model are simulated, and then the terahertz atmosphere windows of Venus are analyzed. By establishing scientific object that realizing all-weather remote sensing for exploration Venus surface, advantages of sensing the atmosphere windows of Venus in terahertz are given, and idea of multi-function Venus sensing is put forward.

Key words: Venus; surface sensing; atmosphere model; atmosphere windows; terahertz spectral

自1961年前苏联发射金星1号飞船以来,人类共发射了42颗金星探测器,各种数据表明,金星具有独特的地理环境、大气特性。经过探索发现,虽然金星自转速度相对较低,但其表面大气反而表现为有规律的周期性。金星赤道自转速度为每秒1.81 m,而大气中的强风速度最高竟达每秒110 m,是前者的60倍。这种“超旋转”现象只有经过更深入的探测研究才能揭示其机理。对金星大气进行立体结构的观测和结合金星地表结构、温度进行综合分析是一种有效的解决办法。

多次的航天探测表明,金星的浓密大气,使得航天器难以拍到清晰的地表照片,金星的高温,使得登陆探测器工作时间有限,探测活动的收获不够理想。1989年美国的麦哲伦(Magellan)金星 SAR(Safety Analysis Report)成像探测使人们清楚地看见金星的地表特征,但其不能揭示出金星地表的温度特征。此后,对金星探测的近、中、长期科学目标相对较为清晰,即充分利用前期已表明的金星大气模型参数,并利用金星轨道卫星长期测绘特点,进行有选择的光谱探测以揭示金星表层上的立体结构,设法推理出金星的演化历史。

NASA的马歇尔(Marshall)航天飞控中心的科技工作者根据对金星长期的观察数据,建立了基于金星大气模型下的金星表面温度与其地表高度、以及大气密度的对应关系^[1],其中任一参数的获取都能有效反演出其对应区域的其他2个参数。可以想象:通过表层温度的精确探测,可以反推出其地表特性和表层大气特性,反演出大气活动规律。另一方面结合高度计的联合数据,也可验证公式的适用性。因而,选择合适的窗口频率进行表层温度探测具有深远意义。2005年欧洲空间局(European Space Agency, ESA)的金星快车任务和2010年日本的行星-C都试图通过对金星表层上的立体结构遥感探测解释金星未解之谜,虽然行星-C没有成功,但金星快车取得的数据可说明选择的合理性。

收稿日期: 2013-09-10; 修回日期: 2013-11-23

1 金星大气模型及金星快车 VIRTIS 窗口频率

根据前期探测数据可知：金星大气主要是 CO₂、N₂ 和中间层的 SO₂。中间 SO₂ 的存在使可见光探测不可能，浓密的 CO₂ 又限制了红外探测的应用，高的大气密度又必须寻找更宽的窗口频段以有效减少频谱展宽的影响，图 1 是资料所表明的金星成份参数，图 2 是资料所表明的金星 3 层结构。

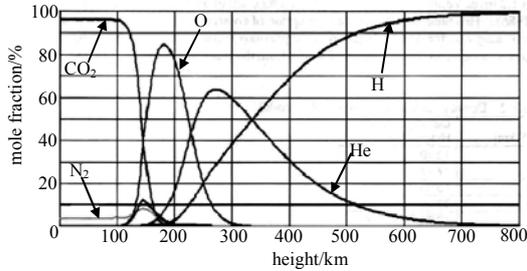


Fig.1 Altitude variation of Venus atmospheric constituents
图 1 金星大气成份参数

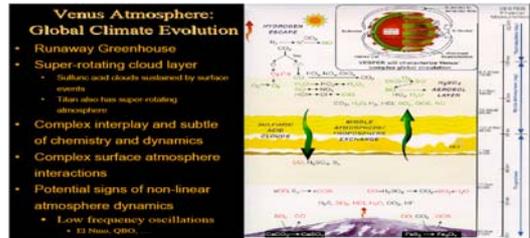


Fig.2 Cloud distribution and climate evolution of Venus
图 2 金星表面大气层状结构及气候环境

很多资料^[2-4]均表明金星的上述图 1、图 2 结构，对金星表面观察必须选择有效宽窗口以有效穿透上述结构。2005 年 ESA 的金星快车中的 VIRTIS 是一种工作于近紫外、可见光和红外波段的成像光谱仪，VIRTIS 合适的选择 2 个窗口频率 1.02 μm^[5]和 1.3 μm 开展表面温度测量和研究，其表面温度成像数据与 Magellan 探测 SAR 成像数据取得了相一致的结果。

虽然无法得知 ESA 科学家的原始设计理念，但从气体成份分子谱线出发可以佐证其选择的前提。图 3、图 4 分别基于 HITRAN 频谱数据库^[6-7]入手得到其窗口和加入了水汽成份后的窗口消失图。

通过验证表明：近红外 1.02 μm 确实是一个非常合适的金星大气探测窗口，另一方面也验证了无需考虑水汽的极小量影响。但是，这个窗口频带下的太阳辐射能量同样很强烈，因而金星快车近红外频点表面温度探测仅能探测金星背阴面的地表特性，要做到全天候金星全球适时地表遥感，更低的频率 THz 是比较合适的选择。

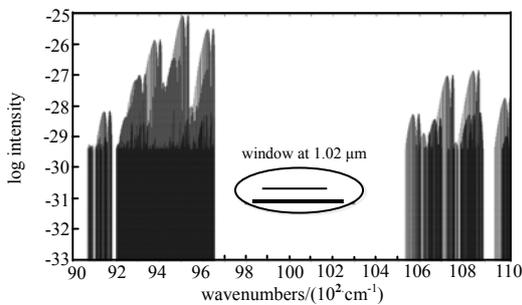


Fig.3 Absorption line of Venus atmosphere among window at 1.02 μm

图 3 基于金星大气的近红外窗口谱线分布图

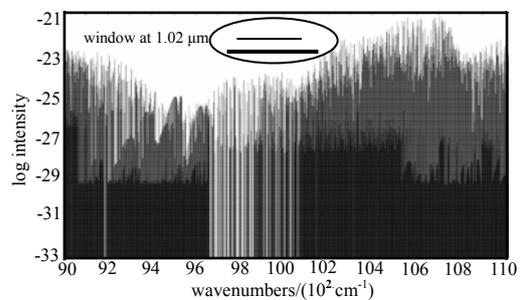


Fig.4 Absorption line of Venus atmosphere include water vapor molecule among window at 1.02 μm

图 4 水汽后的近红外窗口消失谱线分布图

2 金星大气模型下的 THz 窗口特性

在 THz 频段，很多气体分子的特征谱线均落到这个频段，水汽以及地球上的很多痕迹气体在此频段有强烈的吸收谱线，但在金星上，这些气体是有待探测确定的痕迹气体，即使有也极其微量，这些气体相对于金星中已探明的气体是微不足道的，探测金星表面温度 THz 遥感同样基于图 1 中所论述的大气模型进行宽窗口选择，图 5 中反映出 THz 频段下的宽窗口特性。

可以看出，THz 频段其窗口相对带宽可达到 20%以上，比图 3 近红外端 8%左右更宽，很适合进行全天候下金星表面遥感探测频点选择。

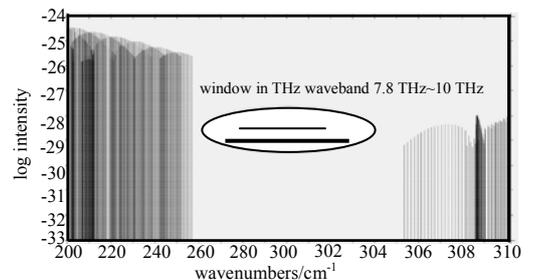


Fig.5 Absorption line of Venus atmosphere among window in THz waveband

图 5 金星大气模型下 THz 宽窗口

3 金星表面温度下近红外与 THz 窗口性能比较

前期各项金星探测表明,金星表面温度虽然准确数值点没有具体统一,但基本可以认定在 700 K~900 K 之间,其表现的最大表面辐射在 7 μm 左右。但这个波长处于金星大气 CO₂ 的强辐射带中,金星快车所选择的是基于地表辐射的高端窗口,而选择 THz 频点则是基于其低端窗口,通过普朗克黑体近似计算可以发现:低端更加有其优越性。图 6~图 8 分别反映出相对黑体计算辐射结果以及 2 个窗口频率下的辐射特性。

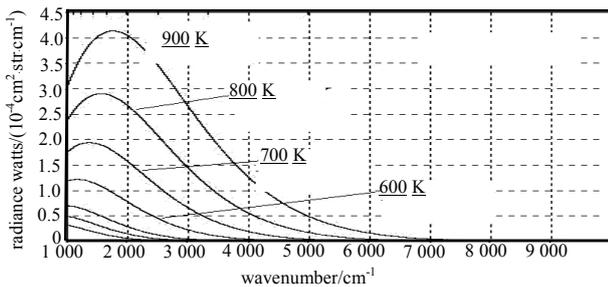


Fig.6 Equivalent blackbody thermal emission of Venus surface
图 6 金星表面等效黑体辐射曲线示意图

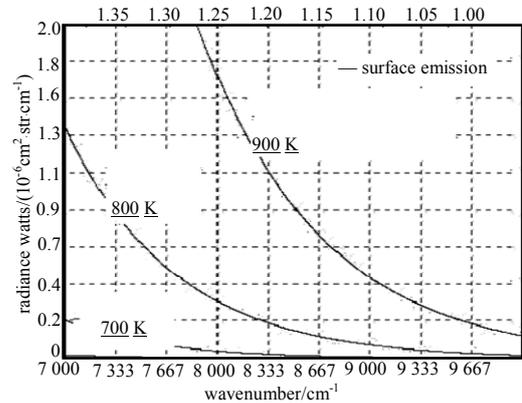


Fig.7 Equivalent blackbody thermal emission of Venus surface among the window in infrared waveband
图 7 金星表面近红外窗口辐射特性

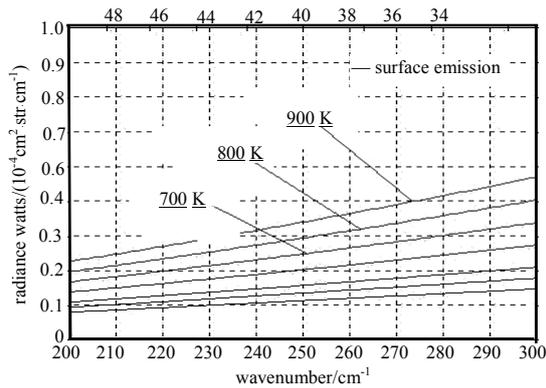


Fig.8 Equivalent blackbody thermal emission of Venus surface among the window in THz waveband
图 8 金星表面 THz 窗口辐射特性

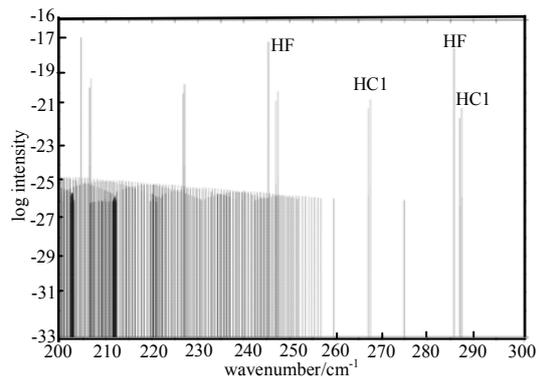


Fig.9 Absorption line of the key molecular constituents within the Venus atmosphere
图 9 金星大气 THz 宽窗口下几种痕迹气体谱线分布图

通过曲线比对,可以看出,选择 THz 窗口具有 2 个明显优点:

- 1) 相同的地表温度下,THz 窗口辐射强度比近红外辐射强度高 1~2 个数量级。
- 2) 相对应的地表温度下,选择 THz 窗口具有相当一致的线性特性,后期的数据处理和峰值点逼近相对简单。

另外,如果将太阳看成 5 900 K 的黑体辐射,并按太阳面积以及太阳至金星距离计算可得:太阳辐射至金星表面将衰减 4~5 个数量级,在向阳面,金星表面所得近红外能量与金星自辐射能量相当(这也是前面阐述的 VIRTIS 仅能探测金星背阴面的主要原因),而金星表面所得的太阳 THz 能量比金星自辐射能量低 4~5 个数量级,基于 THz 窗口则可适应全天候探测要求,实时成像。

4 金星表面其成份、痕迹气体多功能 THz 遥感探测构想

图 5 中低频边带反映是 SO₂ 特征谱线分布,而高频边带则反映是 CO₂ 特征谱线分布,从而在选择 THz 窗口特性进行窗口频谱细分时,完全可以在进行金星表面温度探测的同时,利用窗口上下气边带探测成份气体特性,达到成份气体随高度细分探测的目标。此外,也可利用痕迹气体(金星大气中,微量气体成份,如 HF、HCl、H₂S、H₂O 都可认为是痕迹气体)的 THz 特征谱线进行临边下的窄带遥感探测,从而实现多功能遥感探测目标。

图 9 显示出基于上述论证金星 THz 窗口下的微量气体 HF、HCl 谱线分布情况,可以看出同等条件下的辐射特性比成份气体谱线强度高 4~6 个数量级,遥感探测完成可行。

5 结论

本文引证金星快车中的载荷探测数据,以说明从金星大气模型出发,选择合适的窗口频点是实现对金星表面探测的有效手段,并提出基于 THz 金星窗口全天候金星表面遥感探测的构想,在我国进行深空项目目标论证中,希望起到抛砖引玉的作用。

国外对 THz 的频谱遥感探测研究较为深入^[8-9], NASA 的 DIRBE, FIRAS, MIPS 项目, ESA 的 ISO, 日本的 ASTRO 等均对 THz 大气特性进行了研究,其中 Herschel 太空望远镜中的 Pacs 载荷将 60 μm ~200 μm 分成 2 个焦平面成像频率区间。最为典型的日本 SAFARI(远红外太空望远镜项目),采取 TES(Transition Edge Sensor)焦平面阵列,将 34 μm ~210 μm 细分至 3 个波段。基于目前状态下的金星 THz 窗口(30 μm ~39 μm)遥感完全借鉴上述成功的工程经验。

目前,制冷技术限制了 THz 遥感的深空应用,但随着新型材料(如石墨烯等)、新结构、新工艺技术(美国的多项专利“bolometer-type THz-wave detector”是一个很好的探测思路)发展^[10-14], THz 遥感会逐渐突破制冷技术或无需制冷, THz 频段的工程应用将会越来越广泛。

参考文献:

- [1] Sengupta A, Jet Propulsion Lab., California Inst, et al. Challenges of a Venus Entry Mission[C]// Aerospace Conference, 2011 IEEE. Big Sky, MT:[s.n.], 2011:1-9.
- [2] Drossarta P, Piccioni G, Coradini A, et al. VIRTIS imaging spectrometer for the ESA/Venus Express-mission[J]. Proc. of SPIE, 2004, 543(4):175-185.
- [3] Bullock M A, Grinspoon D H. The role of sulfur in detecting recent climate change on Venus[Z]. Workshop on Venus Geochemistry: Progress, Prospects, and New Missions, 2009.
- [4] Justus C G, Braun R D. Atmospheric Environments for Entry, Descent and Landing(EDL)[Z]. NASA report, 2007.
- [5] Mueller J, Helbert G, Hashimoto C, et al. Venus Surface Thermal Emission Observed by VIRTIS on Venus Express[Z]. Workshop on Venus Geochemistry: Progress, Prospects, and New Missions, 2009.
- [6] Roman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2009, 110(9-10):533-572.
- [7] 卢昌胜, 吴振森, 李海英, 等. 基于 HITRAN 的太赫兹波大气吸收特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3):346-349. (LU Changsheng, WU Zhensen, LI Haiying, et al. Atmospheric absorption characteristics of Terahertz-wave based on HITRAN[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3):346-349.)
- [8] Siegel P H. THz for space: The Golden Age[C]// Microwave Symposium Digest(MTT), 2010 IEEE MTT-S International. Anaheim, CA:[s.n.], 2010:816-819.
- [9] Khosropanah P, Dirks B, van der Kuur J, et al. Low Thermal Conductance Transition Edge Sensor(TES) For SPICA[C]// 20th International Symposium on Space Terahertz Technology. NY: American Institute of Physics, 2009:42-47.
- [10] United states patent. Bolometer-Type THz-Wave Detector: USA, US2008/0237469 A1[P]. 2008-08-02.
- [11] United states patent. Bolometer-Type THz-Wave Detector: USA, US7741604 B2[P]. 2008-06-22.
- [12] United states patent. Bolometer-Type THz-Wave Detector: USA, US7557349 B2[P]. 2002-07-07.
- [13] United states patent. Infrared/visible energy protection for millimeter wave bolometer antenna method apparatus: USA, US6441368 B1[P]. 2002-08-27.
- [14] 王瀚卿, 黄理勇, 苏兴华. 星载高灵敏度太赫兹遥感接收技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3):340-345. (WANG Hanqing, HUANG Liyong, SU Xinghua. Terahertz remote sensing on satellite[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3):340-345.)

作者简介:



苏兴华(1966-), 男, 安徽省贵池市人, 研究员, 主要研究方向为微波、毫米波、THz 遥感系统工程, 在多种刊物中发表了多篇技术论文, 获部级二等奖 1 项, 省部级三等奖 3 项和兵科院某重大工程专项奖 1 项. email: suxinghua698229@sohu.com.

于春香(1970-), 男, 江苏省泰州市人, 研究员, 主要研究方向为混合集成电路及其传感集成技术。

王瀚卿(1986-), 男, 江苏省滨海市人, 工程师, 主要研究方向为毫米波器件与电路。