

文章编号: 1672-8785(2015)01-0001-11

用于空间领域的太赫兹技术研究概况

陆 燕

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 作为电磁波中从红外光到微波的过渡区, 太赫兹波所具有的独特性能已得到了人们的广泛认识。随着太赫兹辐射源、太赫兹探测器等单元技术研究的不断成熟, 美国、欧洲和日本已率先将其应用于空间天文观测、深空探测和对地气象环境监测等领域。重点总结了这些应用中的技术发展情况, 并简要分析了太赫兹雷达与通信技术的研究状况和应用前景。

关键词: 太赫兹; 太赫兹遥感; 太赫兹通信; 太赫兹雷达; 太赫兹成像; 太赫兹应用

中图分类号: TN29

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.01.001

Development Status of Terahertz Technology for Space Application

LU Yan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: As the transition region from infrared light to microwave in the electromagnetic wave, the terahertz (THz) wave has its unique characteristics which are widely known. With the mature of the unit technologies such as THz radiation sources, detectors and so on, the THz technology has been firstly applied to space astronomical observation, deep space exploration and earth meteorological environment monitoring by USA, Europe and Japan. The development status of the THz technology for these applications is summarized mainly and the research status of THz radar technology and THz communication technology and their application prospects in the future are analyzed briefly.

Key words: Terahertz; THz remote sensing; THz radar; THz communication; THz imaging; THz Application

0 引言

在很长一段时间里, 人们将波长为 $20\ \mu\text{m} \sim 1\ \text{mm}$ 的电磁波称为远红外光, 而将波长为 $1 \sim 3\ \text{mm}$ 的电磁波称为亚毫米波。太赫兹波由 Fleming J W 于 1974 年首次提出^[1], 其定义为频率为 $0.1 \sim 10\ \text{THz}$ (波长为 $3\ \text{mm} \sim 30\ \mu\text{m}$) 的电磁波。太赫兹波的辐射能量介于光子与电子之间, 其范围是由电子学向光子学过渡的区域 (见图 1)。

由于处在电磁波谱的独特位置, 太赫兹波

是宏观电子学与微观光子学的交叉研究领域, 其研究方法目前也是从电子学和光子学两方面向太赫兹波拓展。太赫兹波具有独特的瞬态性、高穿透性、宽带性、相干性和低能性等特点, 因此在材料科学、信息科学、医学影像、航天与军事、安全检测、环境监测等领域具有广阔的应用前景, 但相关的太赫兹辐射源、调制器和放大器等功能器件技术目前还不够成熟, 这在一定程度上也制约了其实际应用的发展。

收稿日期: 2014-12-17

作者简介: 陆燕 (1965-), 上海人, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间制冷、低温光学热控以及空间红外遥感方面的研究。E-mail: luyan420@mail.sitp.ac.cn

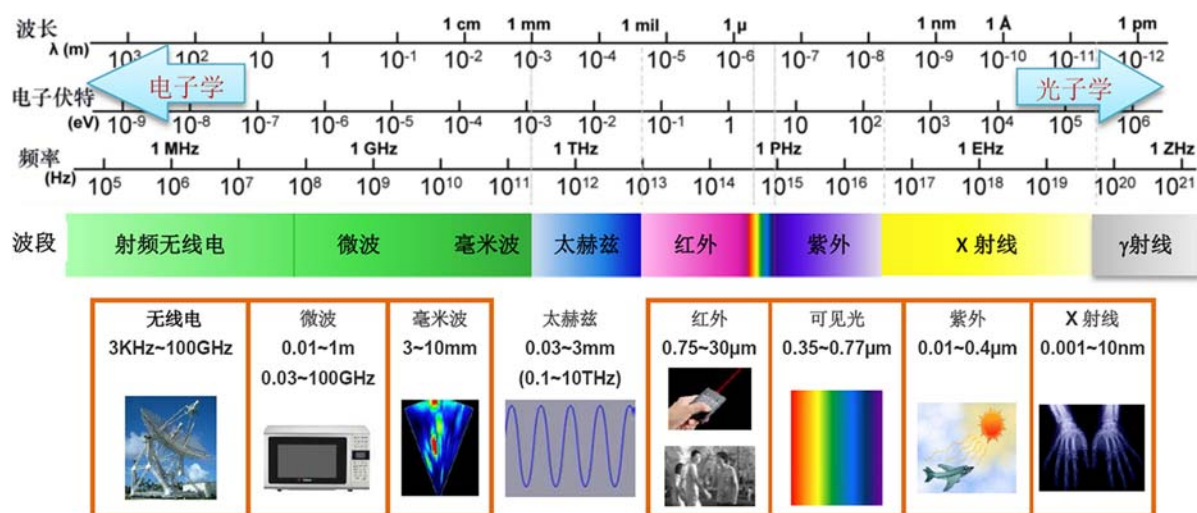


图 1 太赫兹波在电磁波谱中的位置

近三十年来,随着光电子技术和半导体技术的不断发展,研究人员现已能够提供稳定的太赫兹辐射源和可靠的探测手段。从 20 世纪 80 年代中期开始,基于太赫兹波的外差探测方式不断发展,不仅实现了空间高分辨率太赫兹波探测,而且还逐步在天文观测和对地观测中得到了成功应用,这标志着太赫兹探测技术已经日益成熟。

1 用于空间领域的太赫兹技术

在研究用于空间领域的太赫兹技术时,人们主要关注空间主动雷达、被动遥感以及卫星通信等研究方向。关于太赫兹辐射源和探测技术等单元技术研究一直以来都是影响其空间应用的关键因素。20 世纪 80 年代末,随着探测器技术的不断成熟,太赫兹被动遥感技术逐渐在天文观测、深空探测和对地观测等空间任务中发挥重要作用。

1.1 太赫兹雷达

由于太赫兹波具有较短的波长和较好的定向性,与微波雷达相比,太赫兹雷达具有分辨率高、保密性强等优点,因此可实现更精确的定位。另外,太赫兹脉冲具有很宽的带宽,所以具有很强的目标成像与识别能力,能够探测到更小的目标。对于雷达而言,一般频率越高,波束宽度越窄。太赫兹波段可以提供极窄的天线波束,并可获得更高的天线增益和更大的角跟踪

精度,因此太赫兹雷达能够实现更高的角分辨率。现有的电子战干扰和隐身手段主要集中在微波及红外波段,难以对太赫兹波段产生有效干扰,所以太赫兹雷达系统具有突出的抗干扰能力和反隐身能力。由于太赫兹的波束宽度较大,与激光雷达相比,太赫兹雷达可以实现更宽的探测视场;而且在雨、雾等恶劣天气条件下,太赫兹波的穿透能力也更强些。总之,太赫兹雷达不仅具有搜索能力和覆盖范围适中、空间分辨率和距离分辨率较高等特点,而且还具有良好的抗干扰和隐身能力。目前,其总体技术尚未成熟,还处于地面研究阶段,但仍是国内外航天领域重点关注的研究方向。

美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 已经开展了多个太赫兹雷达研究项目。图 2 所示为其近程高分辨率 0.67 THz 成像雷达的原理样机^[2]。该雷达采用了直径为 1 m 的椭球型铝制反射器,能够在 5 s 内快速地对远处 25 m 距离上的 50 cm×50 cm 视场进行高分辨率观测。

美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 在 2009 年启动了太赫兹电子学项目,旨在重点开发 0.67 THz、0.85 THz、1.03 THz 三个频率上的集成接收与发射模块^[3]。2012 年,他们又启动了“视频合成孔径雷达 (Video Synthetic Aperture Radar, ViSAR)”项目。ViSAR 系统将采用极高频传感器,能够透过云层对目标进行定位,并能提供高

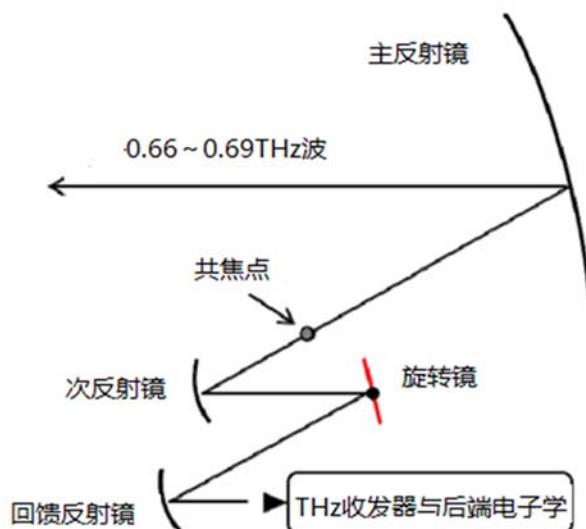
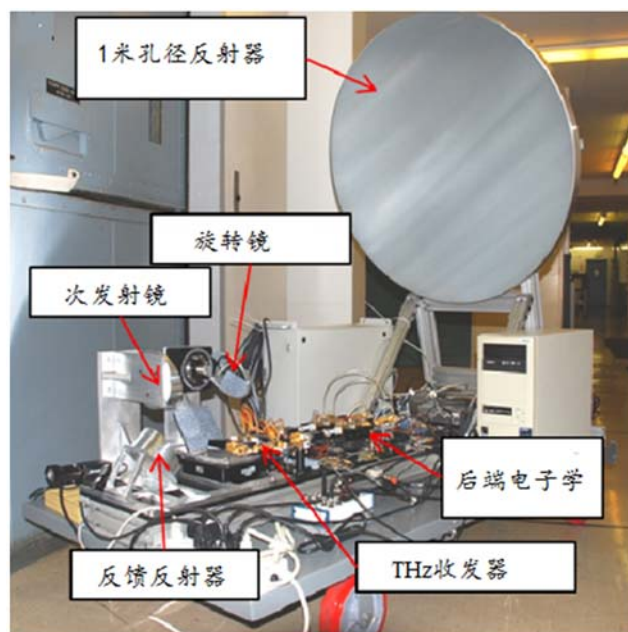


图 2 美国 JPL 研制的太赫兹雷达的结构图和光路图

清晰度和高帧频的图像。ViSAR 系统要求监视直径为 100 m, 成像分辨率达到 0.2 m, 刷新速率为 5 frame/s, 工作频率高于 170 GHz。

1.2 空间被动遥感技术

与光学遥感技术相类似, 太赫兹被动遥感技术将太赫兹探测器与光学机械扫描相结合, 可以实现高分辨率、快速成像和波谱探测功能。空间太赫兹被动遥感技术是一个已经得到成功应用的研究方向。美国、欧洲和日本是目前空间用太赫兹探测技术的主市场, 他们先后在天文观测和对地观测中实现了该技术的具体应用。

根据物体辐射原理, 任何高于绝对零度的物体都会产生热辐射, 而且低温物体的热辐射主要集中在太赫兹波段。宇宙背景的温度约为 2.73 K, 因此宇宙中大量冷物质的温度为 10 ~ 100 K, 其辐射波长的极大值恰为 30 ~ 300 μm , 即处在 0.1 ~ 10 THz 的频率范围内。

被动遥感就是无源遥感, 其器件一般有辐射计和分光计两类。其中, 辐射计用于对被测物体所发射电磁波的辐射通量进行测量; 分光计则是对被测辐射源的电磁辐射波长进行分离, 然后测定出相应波长的强度。大分子物质都有特定的振动和转动能级, 能够对太赫兹波产生

特定吸收, 因此具有明显的“指纹”特性。图 3 所示为 2.7 K 宇宙背景下 30 K 黑体星云颗粒物的波谱 [4]。

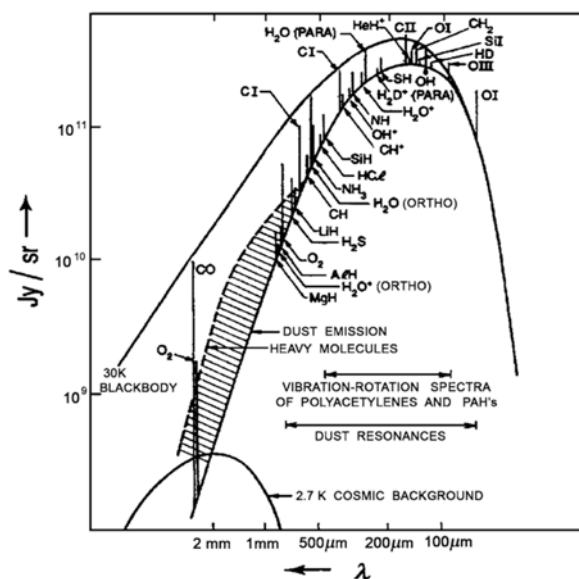


图 3 星云颗粒物的辐射波谱

空间太赫兹被动遥感技术是目前太赫兹技术在天文和深空探测领域的主流应用方向。1983 年, 美、荷、英三国共同研制的红外天文卫星 (Infrared Astronomical Satellite, IRAS) 发射升空。该卫星搭载了一台工作在 8 ~ 120 μm 波长范围内的四通道辐射计和一个口径为 0.6 m 的 R-C

望远镜,经液氮冷却到 10 K,其工作的中心波长分别为 $12\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 、 $60\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 。IRAS 卫星在轨运行了 10 个月,得到了太阳星系中 50% 的光度和 98% 的光子都处在远红外和太赫兹波段的试验结果。随后各国相继有 10 个天文观测卫星或航天器成功应用了太赫兹探测技术。

1.3 太赫兹通信

由于所处位置独特,太赫兹波兼具了光通信与微波通信的优点。与微波通信相比,太赫兹通信的传输容量更大、方向性更好、保密性和抗干扰性更强;在发射功率相等的情况下,其天线更小,系统更加简单、紧凑。与光通信相比,太赫兹通信的能效更高,不仅可以穿透大雾、浓烟、沙尘等,而且还可以应对恶劣天气和实现全天候工作。因此,作为一种安全的实时通信技

术,太赫兹通信是军事及国防安全所需的,并有望应用于卫星的星间通信、星际通信、航天器内部通信、同温层空对空通信以及地面短程无线安全局域网。

太赫兹通信系统一般可以分为全电子器件架构系统、光电子器件架构系统和激光器架构系统三种。其中,全电子器件架构系统由电子射频信号发生器、调制器和后置放大器组成。如图 4 所示,在光电子器件架构系统中,由两个红外激光器产生两束光信号,然后利用光学外差法并通过单行载流子光电二极管将其转换为太赫兹信号;在太赫兹信号发生器发射信号之后,通过调制器、放大器和光电转换器等对信号进行处理^[6]。此外,激光器架构系统则由基于半导体激光器的太赫兹信号源和太赫兹调制器组成。

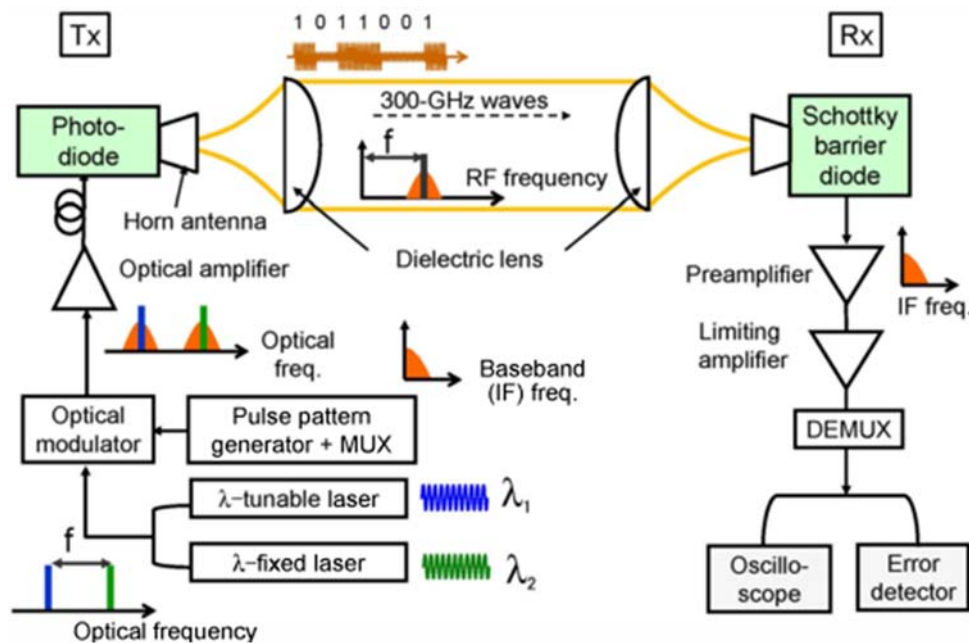


图 4 基于光电子器件的太赫兹无线通信系统的架构图

日本 NTT 公司的电子通信实验室长期从事通信系统的研发工作,并在无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN) 通信技术方面处于国际领先地位。2004 年,他们率先公布了 0.12 THz 无线通信系统,即采用单行载流子光电二极管 (Uni-Travelling-Carrier Photodiode, UTC-PD)、幅移键控 (Amplitude-Shift Keying, ASK) 调制和肖特基二极管探测技术^[5],实现了速率为 10 Gbit/s 的

数据传输。随后该公司通过用高速 InP 半导体器件替代光电器件构成了太赫兹通信样机,其工作频率为 0.12 THz,输出功率为 10 dBm,所用卡塞格伦天线的直径为 450 mm,传输距离大于 1 km,传输速率为 10 Gbit/s,可同时传输 6 路未压缩的高清电视信号。另外,NTT 公司还与大阪大学展开合作,成功验证了工作频率为 0.25 ~ 0.3 THz 的通信样机。该样机采用了 UTC-PD 器

件和肖特基二极管接收器, 其传输距离只有 0.5 m。当 UTC-PD 的输出功率约为 200 μ W、电流为 9.5 mA 时, 该样机可以实现速率为 24 Gbit/s 的无差错传输, 其误码率能够达到 2×10^{-9} 以上。

2 空间用太赫兹仪器研究概况

到目前为止, 美国、欧洲、俄罗斯和日本已经将太赫兹技术成功应用于空间领域, 其研究工作主要集中在天文观测、深空探测和对地观测中的被动遥感技术。该工作也是太赫兹技术

不断发展的主要驱动因素。

在 1983 年首颗 IRAS 卫星顺利升空之后, 美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 和欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 分别于 1989 年和 1995 年发射了“宇宙背景探测者号” (Cosmic Background Explorer, COBE) 卫星和红外空间观测卫星 (Infrared Space Observatory, ISO) 等一系列卫星。这些卫星的探测光谱覆盖了从红外、远红外到亚毫米波的范围, 其详细信息见表 1。

表 1 已发射的天文观测和深空探测卫星上搭载的太赫兹被动遥感仪器

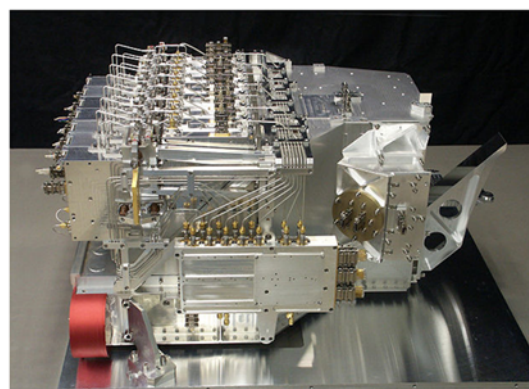
任务代号	发射时间	轨道	发射国家	频率范围	仪器概述
IRAS	1983-01-26	LEO	美国 NASA/ 荷兰/英国	8 ~ 120 μ m	经氦低温流体冷却的铍天线, 10 K 卡塞格伦望远镜, 口径为 0.6 m
COBE	1989-11-18	LEO	美国 NASA	30 GHz ~ 3 THz 1 ~ 240 μ m	宇宙背景及红外测绘仪, 650 L 液氮: (1) 远红外绝对分光光度计 FIRAS; (2) 漫反射红外背景实验 DIRBE; (3) 微分微波辐射计 DMR
ISO	1995-11-17	HEO	ESA	2 ~ 240 μ m	2286 L 液氮, 口径为 0.6 m 的 R-C 望远镜, 4 台光学仪器: (1) 红外相机 ISOCAM: 2.5 ~ 17 μ m; (2) 光电偏振仪 ISOPHOT: 2.5 ~ 240 μ m; (3) 短波分光计 SWS: 2.4 ~ 45 μ m; (4) 长波分光计 LWS: 45 ~ 196.7 μ m
SWAS	1998-12-05	LEO	NASA	490 GHz, 550 GHz	外差式亚毫米波辐射计, 被动冷却的肖特基二极管接收器。主要光谱: H_2O (556.936 GHz), O_2 (487.249 GHz), Cl (492.161 GHz), ^{13}CO (550.927 GHz) 和 H_2^{18}O (548.676 GHz)
Odin	2001-02-20	LEO	瑞典/加拿大/ 法国/芬兰	118 GHz, 490 ~ 500 GHz, 540 ~ 580 GHz	亚毫米波辐射计 SMR, 经 Stirling 制冷机冷却到 98 K 的 (肖特基二极管) 外差式探测仪
Spitzer	2003-08-25	以太阳 为中心的 地球 拖尾轨 道	NASA	3.6 ~ 160 μ m	经液氮冷却的低温 R-C 望远镜, 3 台仪器: (1) 红外面阵相机 IRAC (4 通道); (2) 红外光谱仪 IRS (光谱覆盖 5.6 ~ 38 μ m, 光谱分辨率 $R=\lambda/\Delta\lambda \approx 90, 600$); (3) 多谱段成像分光计 MIPS, 可提供 24 μ m、70 μ m、160 μ m 成像能力和 52 ~ 100 μ m 的光谱能量分布
Rosetta	2004-03-02		ESA	188 GHz, 560 GHz	Rosetta 轨道器上装载的微波仪器 MIRO 是外差式亚毫米波行星探测仪, 可测量 H_2O 、 CO 、 CH_3OH 、 NH_3 等
AKARI	2006-02-22	LEO	日本	1 ~ 180 μ m	0.685 m 的冷 R-C 望远镜, 超流氦与机械制冷, 远红外勘测仪 FIS, 采用 Ge:Ga 探测器

续表 1 已发射的天文观测和深空探测卫星上搭载的太赫兹被动遥感仪器

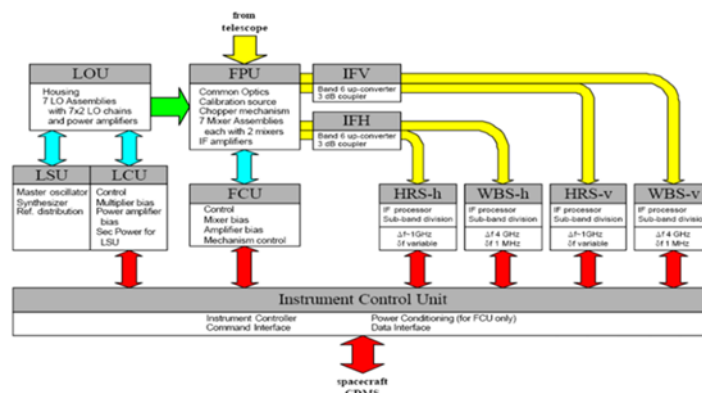
任务代号	发射时间	轨道	发射国家	频率范围	仪器概述
Herschel	2009-05-14	地日 L ₂ 点	ESA	480 GHz ~ 1.91 THz 60 ~ 200 μm	直径为 3.5 m 的望远镜, 经低温液氮冷却的 3 台仪器: (1) 高分辨率远红外外差分光计 HIFI (480 GHz ~ 1.91 THz); (2) 光电面阵相机和分光计 PACS, 光谱覆盖 55 ~ 210 μm ; (3) 光谱及光度测定成像接收仪 SPIRE, 傅里叶变换成像光谱仪, 光谱范围为 194 ~ 313 μm
Plank	2009-05-14	地日 L ₂ 点	ESA	30 ~ 70 GHz 100 ~ 850 GHz	宇宙背景探测, 格里高利离轴主光学, 被动制冷到 50 K, 两台仪器: (1) 低频仪器 LFI, 采用高速电子迁移晶体管的无线电接收器面阵, 工作温度为 20 K, 覆盖 30 ~ 70 GHz; (2) 高频仪器 HFI, 采用辐射热计探测器面阵, 工作温度为 0.1 K, 频率覆盖 84 GHz ~ 1 THz

典型的天文观测应用是 ESA 于 2009 年发射的 Herschel 和 Plank 计划。在 Herschel 望远镜中, 直径为 3.5 m 的碳化硅主镜被冷却到 80 K。该任务搭载了 3 个低温有效载荷: (1) 远红外外差分光计 (Heterodyne Instrument for the Far-Infrared, HIFI) [7] (见图 5)。该仪器由荷兰空间研究院研制, 工作温度为 4 K, 覆盖的电磁波范围为 480 ~ 1910 GHz, 共有 7 个波段。其中, 波段 1 ~ 5 采用超导混频器, 可实现 480 ~ 1150 GHz 的连续覆盖; 波段 6L 和 6H 采用热电子辐射热计外差混频器, 可实现 1410 ~ 1910 GHz 的连续覆盖。通过 4 个分光计 (2 个宽波段光谱仪和 2 个高分辨率光谱仪) 将经外差处理后的信号送至仪器控制单元。(2) 光电探测面阵相机和分光计 (Photodetector Array Camera and Spectrometer, PACS) [8] (见图

6)。PACS 的光谱范围为 60 ~ 210 μm , 其成像部分称为光度计焦平面组件 (设计为双波段成像)。该组件由蓝色通道 (60 ~ 85 μm 和 85 ~ 130 μm) 和红色通道 (130 ~ 210 μm) 组成。其中两个 Si 测辐射热计阵列探测器的视场为 $1.75' \times 3.5'$, 并经 ^3He 吸收制冷至 0.3 K 的工作温度。在光谱工作模式下, PACS 采用两个 Ge:Ga 光导焦平面探测器, 其成像视场为 $50'' \times 50''$, 瞬时光谱覆盖约为 1500 km/s, 光谱分辨率约为 175 km/s, 与超流氦连接后可实现 <2 K 的低温, 光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda$ 为 1500 ~ 4000; (3) 光谱和光度测定成像接收仪 (Spectral and Photometric Imaging Receiver, SPIRE)。SPIRE 由一个三通道相机 (工作波段为 250 μm 、350 μm 和 500 μm) 和一个傅里叶变换成



焦平面单元



HIFI的内部组成框图

图 5 HIFI 的内部组成框图

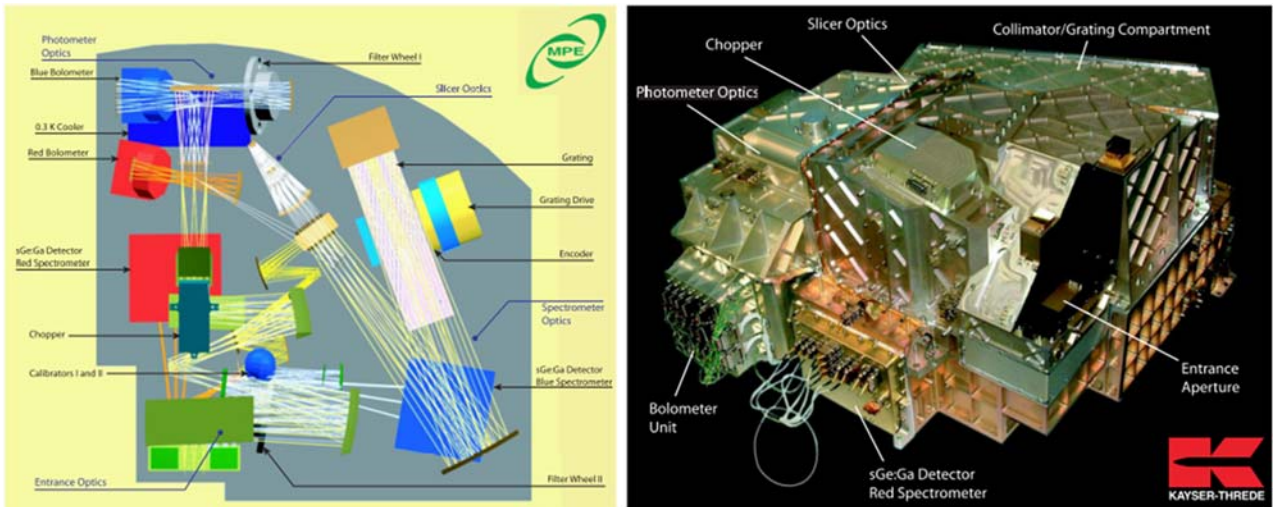


图 6 PACS 的光路图和结构图

像光谱仪 (覆盖波长范围为 $194 \sim 672 \mu\text{m}$) 组成。以上两种仪器均采用测辐射热计阵列探测器, 其工作温度为 0.3 K 。分光计的视场为 $4' \times 8'$, 三个通道同时成像, FTS 近视为 $2.6'$ 的圆视场, 光谱分辨率在 $0.04 \sim 2 \text{ cm}^{-1}$ (对应于 $250 \mu\text{m}$ 波长时, $\lambda/\Delta\lambda=20 \sim 1000$) 范围内可调。

Planck 卫星是与 Herschel 太空望远镜一同发射的 [9]。作为 ESA “宇宙愿景 2020” 计划的一部分, Planck 任务的主要目的是探测宇宙背景辐射。Planck 卫星的主光学部分采用离轴格里高利光学系统, 包括两台仪器: (1) 低频仪器 (Low Frequency Instrument, LFI), 采用基于高电子迁移二极管的射频接收器件, 频率覆盖范围为 $30 \sim 70 \text{ GHz}$, 工作温度为 20 K ; (2) 高频仪器 (High Frequency Instrument, HFI), 其特性见表 2; 采用

测辐射热计探测器阵列, 频率覆盖范围为 $100 \sim 857 \text{ GHz}$, 工作温度为 0.1 K 。图 7 所示为 Planck 卫星的制冷温度环境。该卫星采用三层锥角为 5° 的 V 型屏辐射制冷器, 冷却主光学、预冷吸收制冷器以及三级吸收制冷机+J-T 制冷, 为 LFI 提供 20 K 的工作温度和 4 K 的探测器组件壳体温度, 然后再通过 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 稀释制冷获得 1.6 K 和 0.1 K 的探测器工作温度 (杜瓦内部结构见图 8)。该探测器温度是目前为止空间应用的最低温度, 达到了制冷技术的极限温区。

ESA 于 2004 年发射的彗星探测用 Rosetta 深空探测卫星包括轨道器和着陆器两部分, 并搭载了多种科学载荷。Rosetta 轨道器上的微波仪器 (Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter, MIRO) 采用双波段外差接收器, 其中心波长为

表 2 Planck/HFI 的性能参数

中心频率 (GHz)	100	143	217	353	545	857
带宽 (GHz)	33	47	72	116	180	283
波束宽度 (arcmin, FWHM)	9.2	7.1	5	5	5	5
探测器	测辐射热计阵列					
探测器的工作温度 (K)	约 0.1					
制冷技术	H_2 制冷 + J-T 制冷 + $^3\text{He}/^4\text{He}$ 稀释制冷					
每个像元的平均 $\Delta T/T^3$	2	2.2	4.8	14.7	147	6700
每个像元的平均 $\Delta T/T^4$		4.2	9.8	29.8		
每个像元的灵敏度通量 (mJy)	9	12.6	9.4	20	46	52

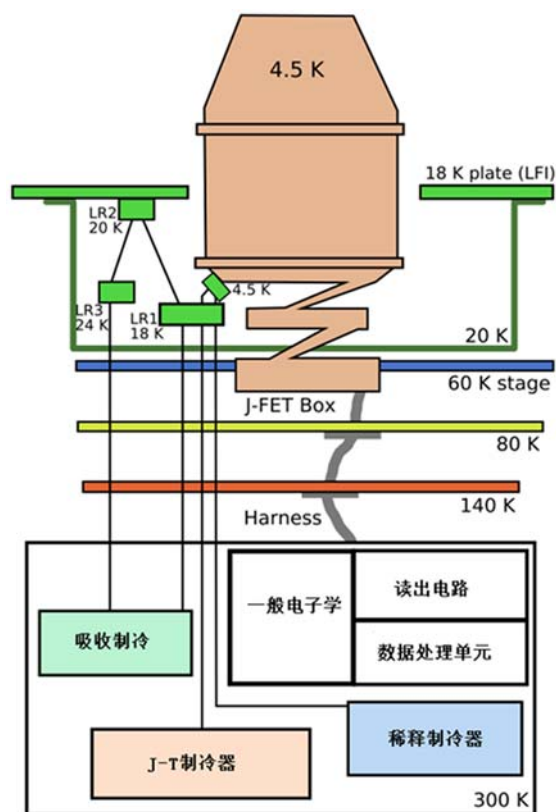


图 7 Plank 卫星的制冷温度环境

190 GHz (1.6 mm 亦称毫米波) 和 562 GHz (0.5 mm 亦称亚毫米波), 主要用于探测 67P 彗星、小行星 (2867) Steins 和小行星 (21) Lutetia 的近表层温度和温度梯度。其中, 亚毫米波接收器还连接了一个线性变换分光计, 用于探测彗核和彗尾的挥发性物种, 比如水汽、一氧化碳、氨、甲醇的含量。图 9 所示为 MIRO 仪器的结构与外形, 表 3 列出了亚毫米波接收器的性能参数^[10-11]。该卫星已经在太空中飞行了 10 年, 其着陆器于 2014 年 8 月 12 日成功着陆于 67P 彗星, 之后轨道器继续跟踪彗星, 预计 2015 年初结束探测任务。

在对地观测卫星方面, 在 0.001 ~ 1 THz 频段, 大气中的主要吸收气体是水汽 (H₂O) 和氧气 (O₂)。通过对氧气吸收谱线进行测量, 可反演出大气温度的垂直分布廓线; 通过对水汽吸收谱线进行测量, 可反演出大气湿度的垂直分布廓线。气象卫星的微波辐射计中都设置了 183 GHz 通道, 比如美国国防气象卫星计划 (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) 中基于专

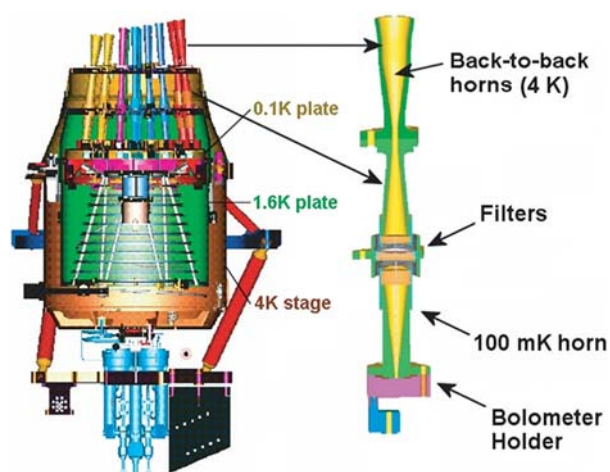


图 8 HFI 探测器的杜瓦组件结构

用传感器的微波温度探测仪 (Special Sensor Microwave Temperature Sounder, SSM/T)、NOAA 极轨气象卫星中的先进微波探测单元 (Advanced Microwave Sounding Unit - B, AMSU-B)、先进技术微波探测仪 (Advanced Technology Microwave Sounder, ATMS) 和微波湿度探测仪 (Microwave Humidity Sounder, MHS)。另外, 利用太赫兹波段中许多分子具有特征吸收线的特点, 可以探测大气成分或相态, 比如水汽、冰云、臭氧等^[12]。借此可以给出与对流层和平流层中上升气流运动有关的信息, 从而实现降水分布监测。由于能够穿透烟雾, 太赫兹辐射可以用于检测大气中水、氧气、氮化物、氯化物等气体的含量及分布情况, 以监测气候的“温室”效应。表 4 列出了各国已发射的对地观测卫星上的太赫兹遥感仪器的应用状况。

其中较为典型的太赫兹探测仪器是 NASA 于 1991 年发射的高层大气研究卫星 (Upper Atmosphere Research Satellite, UARS)。该卫星是世界上首颗用于研究地球高层大气的物理和化学过程的卫星, 其微波临边探测仪 (Microwave Limb Sounder, MLS) 由三通道外差式辐射计组成。MLS 采用砷化镓肖特基二极管探测器, 其各通道探测的中心频率分别为 63 GHz、183 GHz 和 205 GHz (对应波长为 4.8 mm、1.64 mm 和 1.46 mm), 每个波段的带宽为 500 MHz, 空间分辨率约为 400 km (水平) 和 4 km (垂直)。MLS 首次测定了同温层中

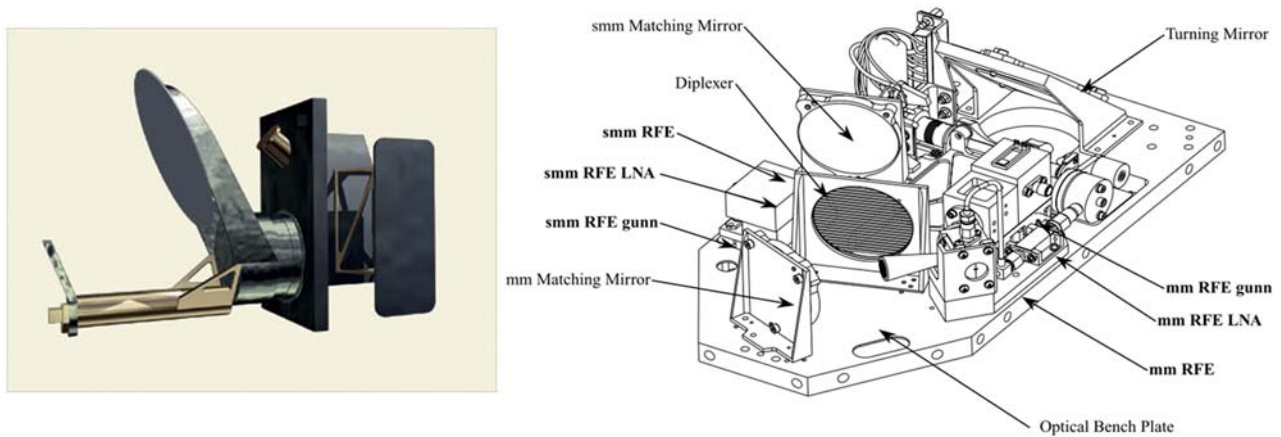


图 9 Rosetta 轨道器上的 MIRO 仪器的结构与外形

表 3 Rosetta/MIRO 仪器的性能参数

190 GHz		562 GHz	亚毫米通道光谱仪的 8 种分子变换频率		
望远镜的直径	300 mm		挥发性物种	频率 (MHz)	变换
波束宽 (FWHM)	23.8 arcmin	7.5 arcmin	水	H_2^{16}O 556936.002	1(1,0)–1(0,1)
光谱特征频率	188.5 ~ 191.5 GHz	547.5 ~ 580 GHz		H_2^{17}O 552020.960	1(1,0)–1(0,1)
IF 连续带宽	550 MHz	1100 MHz		H_2^{18}O 547676.440	1(1,0)–1(0,1)
光谱分辨率		44 kHz	一氧化碳 CO	576267.9305	J(5–4)
光谱带宽		180 MHz	氨 NH_3	572498.3784	J(1–0)
通道数		4096		CH_3OH 553146.296	8(1)–7(0) E
辐射计 DSB 噪声温度	800 K	3800 K	甲醇	CH_3OH 568566.054	3(–2)–2(–1) E
数据率	0.1~1.92 kbps			CH_3OH 579151.005	12(–1)–11(–1) E

表 4 各国已发射的对地观测卫星上的太赫兹遥感仪器应用概况

任务代号	发射时间	轨道	发射国家	频率范围	仪器概述
UARS	1991-09-12	LEO	美国 NASA	63 GHz, 183 GHz, 205 GHz	微波临边探测仪 MLS 是一级外差式接收器, 用于测量同温层成分的高分辨率光谱
DMSP	1991-11-28	LEO	NOAA/DoD	91 GHz, 150 GHz, 183 GHz	水蒸汽分析专用微波传感器 SSM/T-1, 2
Aura	2004-07-05	LEO	美国 NASA	118 GHz, 180 GHz, 240 GHz, 640 GHz, 2520 GHz	微波界区探测仪 MLS, 用于监测臭氧和气候变化, 由 GHz 辐射计、THz 辐射计和分光计三个模块组成
SMILES	2009-09-10	ISS	日本	625 ~ 650 GHz	基于超导混频探测器的亚毫米波界区辐射探测仪, 用于探测大气同温层中的 O_3 、 HCl 、 ClO 、 HO_2 、 H_2O_2 、 HOCl 、 BrO 、 HNO_3 、 SO_2 等
NOAA 15 ~ 19	1998 ~ 2009	LEO	美国	89 GHz, 150 GHz,	先进微波探测组件 AMSU-B 和微波湿度
MetOp-A, B	2006, 2012	LEO	ESA	183GHz, 89~190GHz	探测仪 MHS
Suomi NPP	2011-10-28	LEO	美国	23 ~ 183 GHz	先进微波探测仪 ATMS

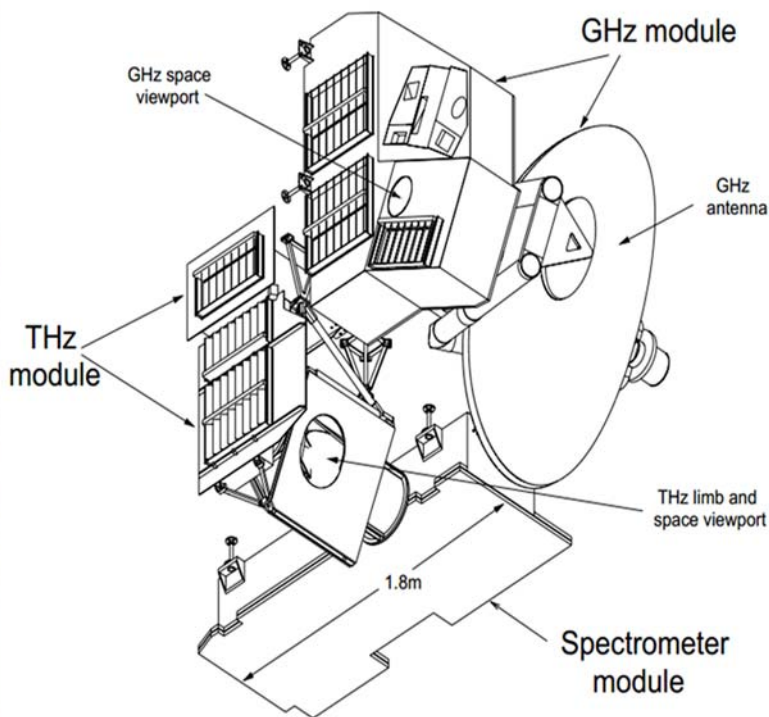


图 10 UARS 卫星的 MLS 仪器

表 5 AURA/MLS 的通道分布

通道	中心波长	视场 (FOV)		主要测量目标	附加测量
		垂直 (km)	水平 (km)		
R1	118 GHz	5.8	12	温度垂直分布	冰云、压力切向分布、上对流层的 H ₂ O
R2	190 GHz	4.2	8.4	H ₂ O、HNO ₃ , 是 UARS/MLS 在 183 GHz 下的延续	HCN、冰云、低质 ClO、N ₂ O、O ₃ 、SO ₂
R3	240 GHz	3.2	6.4	O ₃	CO、低质温度和压力、上对流层的 H ₂ O
R4	640 GHz	1.4	2.9	N ₂ O、HCl、ClO	HOCl、BrO、HO ₂ 、SO ₂ 、冰云、平流层 O ₃
R5	2.5 THz	2.1	2.1	OH	有限垂直区内的压力

臭氧、水汽、氧化氯等分子含量随大气压变化的轮廓。在此基础上, NASA 又于 2004 年发射了 Aura 卫星, 其观测目标是同温层和对流层。作为 Aura 卫星的主要载荷之一, MLS 由 GHz 模块 (118 GHz、190 GHz、240 GHz 和 640 GHz 四个辐射计)、THz 模块 (2.5 THz) 和分光计模块组成 (见图 10)^[13], 其空间分辨率为 3×300 km (水平) 和 1.2 km (垂直)。表 5 列出了由 MLS 提供的数据产品。其中, GHz 模块继承了 UARS/MLS 技术, 而作

为标志性技术的首个 THz 频率探测 (2.5 THz) 通道则将远红外激光用作本地振荡。美国 Coherent 公司生产的远红外激光器是一种经 CO₂ 激光器抽运的甲醇蒸汽气体激光器, 其激光输出频率为 2522 GHz, 功率为 20 mW。

2009 年, 日本将载有超导亚毫米波临边辐射探测仪 (Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder, SMILES) 的日本实验舱 (Japanese Experiment Module, JEM) 发

射至国际空间站^[14]。该任务通过两级斯特林制冷机以及节流制冷技术, 将超导混频探测器 (Superconductor-Insulator-Superconductor, SIS) 冷却到 4 K, 以获得平流层轨道气体 (如 ClO、HCl、HO₂、HNO₃、BrO、O₃ 等) 的全球分布信息。

3 结论

近二十年来, 在空间天文观测技术的牵引下, 太赫兹探测技术已经取得了长足进步。在被动探测方面, 各国已先后发射了多颗卫星, 并获得了有用的探测数据。由于辐射源、调制器和放大器等单元技术尚未达到空间应用水平, 太赫兹雷达与通信等主动探测研究目前还没见到有实际应用报道, 但美国、德国、日本、英国等正在加大研究投入。随着单元技术研究的不断深入, 作为光学与电子学的交叉领域, 太赫兹应用技术已经得到了人们的广泛认识, 其系统技术研究也得到了各国科学界的重视。高分辨率太赫兹雷达成像、成像识别、目标分析与探测、频谱监视以及高速大容量太赫兹通信等系统将是未来空间应用的重要发展方向。

参考文献

- [1] Erik Brundermann. Terahertz Techniques [M]. London: Springer Press, 2012.
- [2] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. Fast, High-resolution Terahertz Radar Imaging at 25 Meters [C]. *SPIE*, 2010, **7671**: 76710Y.
- [3] Albrecht J D, Rosker M J, Wallace H B, et al. THz Electronics Projects at DARPA: Transistors, TMICs, and Amplifiers [C]. Anaheim: Microwave Symposium Digest (MTT), 2010 IEEE MTT-S International, 2010.
- [4] Thomas G P, Jocelyn K. Submillimeter Astronomy [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1992, **80**(11): 1662–1678.
- [5] Tadao Nagatsuma, Kazutoshi Kato. Photonically-assisted 300-GHz Wireless Link for Real-time 100-Gbit/s Transmission [C]. Tampa: Microwave Symposium Digest (MTT), 2014 IEEE MTT-S International, 2014.
- [6] Nagatsuma T, Hirata A, Sato Y. Sub-Terahertz Wireless Communications Technologies [C]. Dubrovnik: 18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, 2005.
- [7] Thijs de Graauw, Nick Whyborn, Frank Helmich, et al. The Herschel-Heterodyne Instrument for the Far-Infrared (HIFI): Instrument and Pre-launch Testing [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 701004.
- [8] Poglitsch A, Waelkens C, Geis N. Photodetector Array Camera & Spectrometer (PACS) for the Herschel Space Observatory [C]. *SPIE*, 2010, **5487**: 425–436.
- [9] ESA. The Scientific Programme of Plank [EB/OL]. www.cosmos.esa.int/documents/387566/387653/Bluebook-ESA-SCI%282005%291_V2.pdf, 2005.
- [10] Gulkis S, Frerking M, Crovisier J, et al. MIRO: Microwave Instrument for Rosetta Orbiter [J]. *Space Science Reviews*, 2007, **128**(1–4): 561–597.
- [11] Samuel Gulkisa, Mark Allena, Charles Backusa, et al. Remote Sensing of a Comet at Millimeter and Submillimeter Wavelengths from an Orbiting Spacecraft [J]. *Planetary and Space Science*, 2007, **55**(9): 1050–1057.
- [12] Emde C, Buehler S A, Eriksson P, et al. The Effect of Cirrus Clouds on Microwave Limb Radiances [J]. *Atmospheric Research*, 2004, **72**(1–4): 383–401.
- [13] Joe W W, Lucien F, Arwood R S, et al. The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura Satellite [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(5): 1075–1092.
- [14] Junji Inatani, Hiroyuki Ozeki, Ryouta Satoh, et al. Submillimeter Limb-emission Sounder JEM/S-MILES aboard the Space Station [C]. *SPIE*, 2000, **4152**: 243–254.