

THz 波大气探测仪器发展现状研究

高太长, 李书磊, 刘磊, 黄威

(解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101)

摘要: THz 波在电磁波谱中位于微波至红外波段的过渡区域, 其特性在空间研究及应用领域具有独特的优势, THz 频段的大气遥感仪器可以为探测地球大气信息提供全新的视角, 在大气科学领域展现出良好的应用前景。介绍了 THz 技术在大气探测领域的主要应用, 综述了国内外 THz 频段的大气观测仪器的研究现状, 通过各仪器关键指标参数的对比分析, 总结了 THz 大气观测仪器的发展趋势及发展前景, 并提出了发展 THz 大气遥感技术的建议。

关键词: THz 技术; 大气探测; 外差式接收机; 直接检测

中图分类号: P412 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0425002

Development study of THz instruments for atmospheric sounding

Gao Taichang, Li Shulei, Liu Lei, Huang Wei

(Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: THz wave lies in the region between the microwave and infrared range in the electromagnetic spectrum. There are unique advantages for THz wave in the space research and application field. THz remote sensing instruments can provide a new perspective for the exploration of the earth's atmosphere. As a result, THz technology has a good prospect in the field of atmospheric science. The main applications of THz technology in the field of atmospheric sounding were introduced. The current research status of THz atmospheric observation instruments at home and abroad were summarized. By comparison and analysis of key parameters of each instrument, the development trend and the development prospect of THz instruments for atmospheric observation were summarized. Meanwhile, the suggestions for developing THz atmospheric remote sensing technology were presented.

Key words: THz technology; atmospheric sounding; heterodyne receiver; direct detection

收稿日期: 2015-08-12; 修订日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(41205125, 41575024)

作者简介: 高太长(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大气探测与大气遥感方面的研究。Email: 2009gaotc@gmail.com

0 引言

THz 波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波,该波段位于微波和红外波段之间,在微波领域该波段也被称为亚毫米波,而在红外领域也被称为远红外波。THz 波所处的特殊位置及穿透性、低能性等特殊性质使其在通信、材料检测、雷达、大气探测、医药科学、国土安全等基础研究领域有重大的研究价值和广阔的应用前景^[1-2]。

太赫兹科学技术是一个典型的交叉前沿学科,研究范围涉及物理、电磁学、光学、材料科学、微波毫米波电子学等学科^[3]。太赫兹波高效的背景噪声抑制功能、良好的时间和空间相干性、超低的光子能量(4 meV)以及超强的穿透能力,使太赫兹技术在大气探测领域的吸引力大大增强^[4-5]。目前,气象载荷主要采用微波、红外、可见光和激光等波段,然而实践表明,红外探测通道可以对地面或云顶成像,但不能提供诸如锋面结构、气旋、强对流等天气现象的精细化信息^[6];传统微波探测通道具有全天候、全天时的对地观测能力,可以穿透主要大气活动区域,但不能细致地观测云层内部气象条件的变化^[7];可见光反演云仅能代表云的顶部特征^[8];激光仪器的方向性好,但能量衰减比较大^[9]。太赫兹波作为微波和红外的中间波段,兼具有微波穿透性和红外高分辨率的特点,设置多个 THz 波段的通道,可以得到大气垂直分布的精确信息^[10]。

从空基、天基平台上利用 THz 技术进行对地观测是近年来欧洲和美国科研的主题之一,包括对水、冰云、温度、湿度等的观测。在窗口频率下,即使在多云或者有雾的天气状况下,也可以实现对地球表面的遥感,而不会被大气层或者不良天气影响^[11-12]。许多科研机构如 NASA(美国国家航空航天局)、ESA(欧洲航天局)、DLR(德国宇航中心)、CNES(法国国家太空研究中心)、JAXA(日本宇宙航空研究开发机构)、NICT(日本国家情报与通信技术研究所)等都致力于发展 THz 波对大气层中的各种成分进行分析研究,不断创新观测方法、提高对地球大气组成的认识。文中主要介绍了 THz 技术在大气探测领域的主要应用,综述了 THz 波段大气探测仪器的发展现状,分析了国际上已完成的、尚在运行的、未来计划

研制的 THz 波段大气观测仪器的探测目标、技术参数、关键技术、实验结果等,并在总结技术发展历程的基础上分析了 THz 大气探测仪器的发展趋势和发展前景。

1 THz 技术在大气探测领域的主要应用

近年来,随着 THz 关键技术的发展,人们对该波段电磁辐射性质的研究不断深入,THz 波在大气探测领域展现出巨大的应用潜力。在 THz 波段,水汽吸收线密集,其线谱吸收是造成 THz 辐射大气衰减的重要原因^[13],同时太赫兹波段独有的纯转动能级之间的跃迁也可能会给水汽的连续吸收带来不同于其他频段的新的特点^[14-16]。利用 THz 辐射接收器接收来自天空的辐射能量,经过定标校准,处理成观测目标在某频率上的亮温,通过一定的反演方法可进一步得到水汽分布、大气湿度廓线等参量^[17-18]。

在 THz 波段,CO₂、O₂ 有多条特征吸收线,目前已广泛应用于温度廓线反演的氧气 118 GHz 吸收带即位于 THz 波段。通过探测 THz 波谱区域内 CO₂、O₂ 的特征吸收线,可以反演大气温度廓线^[19]。相较于其他波段,THz 波反演温度廓线可以减小接收天线孔径尺寸、提高空间分辨率。

目前在探测冰云微物理参数时,可见光波段的反射率仅能反映冰云顶部的粒子特征^[20],红外和毫米波段则只对部分冰云粒子敏感^[21-22],而无法提供冰云粒子的全面信息。由于 THz 波长和典型的冰云粒子尺寸处于同一量级,因此在测量冰云微物理参数方面 THz 波占有独特优势。研究^[23]表明:THz 波对尺寸大于 100 μm 的粒子很敏感,并且 THz 波可以测量尺度在 10 μm 以下的粒子。THz 波被动遥感卷云微物理参数有可能成为未来探测冰云的有效手段。

在 THz 波段,大气中的许多微量气体分子具有特征吸收线,利用它们固有的辐射和吸收光谱特征可以识别出这些组分,确定其中大部分气体包括羟基自由基在内的多种大气成分的浓度,并反演出微量气体垂直廓线,实现大气环境监测^[24-25]。此外,THz 波对因人类活动而排放的含氯、氮、硫和氟废气有特殊的敏感性,可用于臭氧层的大气环保监控。近十年来基于飞秒激光发展起来的 THz 时域光谱技术不仅能直接测定分子的转动光谱,还可以测定混合气体的化学组成和各组分的浓度,能够对自由基和反应

活性分子进行有效的探测和分析。THz 时域光谱技术还可以用于研究多种其它气体和蒸汽的转动光谱及分子碰撞引起的谱线展宽,如卤甲烷、氨气等^[26]。

2 THz 波大气探测仪器的发展历程

长期以来,由于有效产生源和灵敏检测技术的限制,THz 波大气探测技术发展缓慢。其中,THz 信号检测是制约其发展的主要因素。一方面,与微波相比,THz 波段光子能量低,背景噪声常常占据显著的地位;另一方面,为了充分发挥 THz 系统的作用,提高接收机的灵敏度也是必然要求^[27]。由于 THz 辐射在大气中传输时存在严重衰减,因此早期的 THz 空间应用主要以星载载荷进行外太空背景辐射、其他星球的气体组成成分探测。前苏联最早于 20 世纪 60 年代初开始研究 THz 波空间遥感技术,其主要目的是了解星系的形成过程、基本构成和进化等相关信息^[28]。随着空间应用技术的进步,THz 波对地观测也逐渐获得发展。

2.1 星载 THz 大气探测仪器

最早将 THz 技术应用到大气探测领域可追溯到 20 世纪 60 年代起前苏联发射的 Cosmos 系列卫星,其中 Cosmos-669(1974 年)卫星携带了一个太空亚毫米波测辐射热计系统,该系统使用了液氮致冷辐射热测定器,在提高灵敏度、缩短响应时间、降低噪声等方面取得了一定进展^[29]。其通道频段范围为 300 GHz~5 THz,主要用于测定大气层的降水、云、大气温度、压强、水汽的分布信息,对来自地球的热辐射第一次进行了远红外意义上的测定,是第一次将 THz 技术应用到大气探测的实验。1978 年,前苏联发射的 Salyut6 空间站上携带了一个亚毫米波望远镜^[30],包括一个直径 1.56 m 的光学卡塞格伦望远镜、一个 3 阶的焦耳托马斯 4.2 K 主动冷却辐射热计,用于测定来自地球和其他宇宙源的辐射,其频段范围为 200 GHz~15 THz,可同时进行紫外、红外和远红外观测。该望远镜同样使用了超低温冷却技术,需要在 4 K 的低温环境中工作,且仅能在地球背阳面工作。

尽管应用空间辐射制冷技术的直接探测方式在一定程度上推动了 THz 波大气探测技术的发展,然而辐射致冷技术的性能受航天器运行轨道、安装位置影响很大,其专用性很强。同时,也涉及到绝热、热流通量的精确计算、温控、防污染等许多复杂问题。

因此,研究人员一直致力于研发稳定可靠的太赫兹探测技术。从 20 世纪 80 年代中期开始,随着光电子技术和半导体技术的不断进步,宽带辐射计和成像探测器以及外差式探测仪器的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 THz 波大气探测技术进入了快速发展的时代。

1982 年美国国防部(DOD)和美国国家海洋和大气局(NOAA)实行 DMSP-Block 5D-2 计划,取得了大气亚毫米波成像技术的进步。其在 DMSP-F11(1991 年)、DMSP-F12(1994 年)、DMSP-F14(1997 年)3 颗卫星上搭载了 SSM/T-2 微波辐射计,用于反演水汽廓线^[31-32]。该辐射计采用交叉轨道扫描方式,每分钟可完成 7.5 次扫描。探测通道中心的频率分别为 91 GHz、150 GHz、183 GHz,水汽 183 GHz 强吸收线对由云、雾造成的吸收衰减敏感性降低,从而实现任何天气条件下全球水汽分布的监测。SSM/T-2 辐射计的成像数据可作为其他遥感数据的补充,提供了大气观测新的视角,同时可用于识别中纬度天气系统,如:锋面和温带气旋等^[33]。

1991 年,美国喷气动力实验室(JPL)发射第一个用于研究平流层大气特性的卫星 UARS 卫星,探测目标为平流层太阳辐射通量、化学特性(主要是臭氧)、动力学特性(风)以及中间层和热层的微量气体成分^[34-35]。卫星上搭载的三通道微波临边探测器(MLS),首次使用了“全功率”常温双边带超外差式高分辨率光谱接收机技术,通道频率分别为 63 GHz、183 GHz、205 GHz,第一次实现了亚毫米波临边探测的应用^[36]。其中,63 GHz 通道用于测量平流层大气压强和温度;183 GHz 通道主要测量水汽、臭氧的含量,205 GHz 通道主要测量氯氧化物、过氧化氢、二氧化硫以及臭氧等微量气体含量^[37]。由于技术原因,该卫星于 2005 年停止运行。

1998 年 NASA 发射的用于外太空探测的 SWAS 卫星上携带的 55 cm×71 cm 的椭圆卡塞格伦望远镜使用了次谐波肖特基管接收机,第一次实现了亚毫米波范围内的高精度外差探测,验证了亚毫米波外差式接收技术的可行性和技术优势^[38]。2001 年瑞典、加拿大、法国和芬兰合作发射了 Odin 卫星,成功将亚毫米波超外差式接收机应用于对地大气观测^[39]。卫星上携带的 SMR 亚毫米波辐射计应用亚毫米波

临边探测技术,包括 4 个探测通道,探测目标包括气温、O₃、ClO、N₂O、HNO₃、H₂O、CO、NO 及 H₂O 与 O₃ 的同位素^[40-41],Odin/SMR 对中间层上部水汽的观测能力是前所未有的,H₂O 反演的垂直廓线可高达 90 km。其探测通道频率、探测目标和仪器指标参数如表 1、表 2 所示。

表 1 Odin/SMR 通道基本参数

Tab.1 Fundamental parameters of Odin/SMR channel

Channels	Frequency/GHz	Detectable objectives
A1	541-558	H ₂ O,HNO ₃ ,O ₃
A2	486.1-503.9	O ₂ ,ClO,BrO,HNO ₃
B1	563-581.4	ClO,CO,HO ₂ ,H ₂ O ₂
B2	547-564	H ₂ O

表 2 Odin/SMR 仪器指标参数

Tab.2 Fundamental parameters of Odin/SMR instruments

Parameters	Value
Detectable height/km	10-120
Bandwidth/MHz	100-1 000
Spectral resolution/MHz	0.125-1
Vertical resolution/km	1.5-3
Noise equivalent temperature difference/K	2.4
System noise temperature/K	600 K in mm wave,3 300 K in sub-mm wave

2004 年 NASA 发射 AURA 卫星,是一颗用于探测平流层的 O₃、对流层的 O₃ 与污染物及环境变化的卫星^[42]。AURA 卫星携带 4 个探测仪器,分别是高分辨率动力探测器 HIRDLS、毫米波探测器 MLS、臭氧监测仪 OMI、对流层辐射分光计 TES^[43]。其中,MLS 是在 UARS/MLS 的基础上发展起来的,同样使用了 THz 外差接收技术,由于技术改进使得 AURA/MLS 的光谱范围和外差式辐射计的带宽得以扩展,因此 UARS/MLS 的带宽范围增宽、光谱分辨率增高、可探测成分增加^[44]。同时,Aura 的越极轨道使其在每个轨道的探测范围几乎可以覆盖南极-北极的区域,并且在视线(LOS)方向的大气廓线梯度精度更高。AURA/MLS 包括 3 个模块:(1) GHz 辐射计模块,包括 118 GHz、190 GHz、240 GHz 与 640 GHz 探测频率的辐射计;(2)具有两种极化的 2.5 THz 辐射计^[45];(3)分光计模块。主要用于探测的大气成分包括 OH、HO₂、H₂O、O₃、HCl、ClO、HOCl、BrO、HNO₃、N₂O、CO、HCN、CH₃CN、火山喷发的 SO₂ 以及冰云等。Aura/MLS 的基本参数如表 3 所示。

日本 JAXA 与 NICT 合作研究的临边探测器 SMILES(Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder) 搭载于国际空间站的 JEM 模块中,于 2009 年成功发射^[46]。SMILES 首次使用超导低噪声外差式接收机进行大气临边探测,在前端使用了最新的液氮冷却超导体-绝缘体-超导体(SIS)结混频器,以光子辅助隧穿机制为理论基础,使其在单

表 3 Aura/MLS 的基本参数

Tab.3 Fundamental parameters of Aura/MLS channel

Radiometer	Description	Detectable objectives	Vertical FOV /km	Remarks
R1(118 GHz)	InP HEMT preamplifier and downconverter	T, P, ice clouds, Geopotential height	5.8	
R2(190 GHz)	Schottky downconverter at room temperature and the Gunn diode-pumped local oscillator multiplier chain	H ₂ O, HNO ₃ , ClO, N ₂ O, O ₃ , HCN, CH ₃ CN, volcanic SO ₂ , ice clouds	4.2	
R3(240 GHz)	Schottky downconverter at room temperature and the Gunn diode-pumped local oscillator multiplier chain	O ₃ , CO, T, P, ice clouds, HNO ₃ , SO ₂	3.2	The higher resolution radiometer than R1, eventually detecting the temperature profile by ¹⁶ O ¹⁸ O absorption lines located at the 33.9 GHz
R4(640 GHz)	Schottky downconverter at room temperature and the Gunn diode-pumped local oscillator multiplier chain	HCl, ClO, BrO, N ₂ O, HO ₂ , ice clouds, O ₃ , HOCl, CH ₃ CN, SO ₂	1.4	
R5(2.5 THz)	Schottky planar waveguide tube mixer, automatic CO ₂ pump, methanol gas laser local oscillator	OH, O ₃ , ice clouds, T, P	2.1	

边带模式中的系统噪声降低到 500 K^[47]。SMILES 有 3 个探测波段, 主要用于平流层臭氧监测以及 ClO、BrO、HCl、HOCl、HO₂、H₂O₂ 等微量气体成分的探测^[48]。波段范围及探测目标如表 4、表 5 所示。

表 4 SMILES 通道基本参数

Tab.4 Fundamental parameters of SMILES channel

Channels	Frequency/GHz	Detectable objectives
A	624.32-625.52	HNO ₃ , ⁸¹ BrO, O ¹⁸ OO, ClONO ₂ , H ³⁷ Cl, H ₂ O ₂ , O ₃ , HO ³⁵ Cl, ¹⁸ OOO, SO ₂
B	625.12-626.32	O ₃ , HNO ₃ , ¹⁸ OOO, HO ₂ , O ¹⁷ OO, H ³⁵ Cl, SO ₂
C	649.12-650.32	¹⁷ OOO, ¹⁸ OOO, ClO, (ClO) ₂ , HO ₂ , O ¹⁷ OO, ⁸¹ BrO, HNO ₃ , SO ₂

表 5 SMILES 仪器指标参数

Tab.5 Fundamental parameters of SMILES instruments

Parameters	Value
Detectable height/km	10-60
Bandwidth/MHz	1 200
Spectral resolution/MHz	1.4
Vertical resolution/km	3.5-4.1
Noise equivalent temperature difference/K	0.4
System noise temperature/K	<500

SMILES 在 2010 年 4 月 21 日由于故障开始停止探测, 尽管仅工作了半年左右, 然而其在轨的半年

时间内, 提供了大量高精度的科学数据, 表明 SIS 混频器和 4-K 机械制冷技术在 THz 大气探测的可行性和优势^[49], 提高了探测的精度和灵敏性, 目前已逐渐成为 THz 射电天文和大气探测研究的核心技术。

为了充分获取平流层大气化学组成成分, ESA 研制 MASTER(Millimeter-wave Acquisitions for Stratosphere/Troposphere Exchanges Research) 新一代星载亚毫米波临边探测器, 探测通道主要位于毫米波与亚毫米波波段, 重点关注平流层上部与对流层底部, 研究对流层与平流层的交换过程, 并用于辐射强迫、环境反馈、低平流层化学成分与对流层化学成分的研究^[50]。然而, 由于部分技术原因, MASTER 目前尚未发射。为了验证 MASTER 的可行性、亚毫米波频段的优势以及 MASTER 光谱辐射计的需求, ESA 在 2007 年研制了 Marschals。Marschals 是一个机载外差式光谱仪, 采用临边探测方式探测部分气体成分亚毫米波段的热辐射的高光谱, 主要目标为平流层 H₂O、O₃、HNO₃、N₂O、CO、O₂ 等气体成分。其飞行高度为 21 km, 重点研究平流层临边探测技术^[51]。Marschals 和 MASTER 的部分技术参数如表 6、表 7 所示。

表 6 Marschals 通道基本参数

Tab.6 Fundamental parameters of Marschals channel

Band	Frequency /GHz	Detectable objectives	Spectral resolution /MHz
B	294-305.5	O ₃ , N ₂ O, O ₂ , HNO ₃	
C	316.5-325.5	H ₂ O, O ₃	200
D	342.2-348.8	CO, HNO ₃ , BrO	

表 7 MASTER 通道基本参数

Tab.7 Fundamental parameters of MASTER channel

Band	Frequency	Detectable objectives	Spectral Resolution/MHz	Detectable Height
B	294.0-305.5	O ₃ , N ₂ O, O ₂ , HNO ₃		Upper troposphere Lower stratosphere
C	316.5-325.5	H ₂ O, O ₃		Upper troposphere Lower stratosphere
D	342.25-348.75	CO, HNO ₃ , BrO	50	Upper troposphere Lower stratosphere
E	497.0-506.0	ClO, O ₃ , N ₂ O, BrO, H ₂ O, CH ₃ Cl		Lower stratosphere
F	624.0-626.5	HCl, O ₃		Lower stratosphere

与 MASTER 类似, SOPRANO (Submillimeter-wave Observation of Processes in the atmosphere Noteworthy for Ozone) 也是由 ESA 研发的新一代高分辨率亚毫米波临边探测器, 光谱分辨率为 3 MHz, 波段宽度约为 1.00~7.25 GHz, 扫描高度大约为 10~50 km, 其中间层模式的扫描高度大约为 14~150 km^[52]。其主要目的是探测大气中的氯化学成分, 为臭氧的长期监测提供数据。其探测目标和频段、仪器指标参数如表 8、表 9 所示。

表 8 SOPRANO 通道基本参数

Tab.8 Fundamental parameters of SOPRANO channel

Channel	Frequency/GHz	Detectable objectives
A	497.5–504.75	O₃, ClO, CH₃Cl, (BrO), N₂O, H₂O, (HNO₃), (COF₂)
B1	624.0–626.5	HCl, O₃, HOCl, (HNO₃), (BrO), (HO₂)
B2	627.95–628.95	HOCl, O₃, HNO₃, (COF₂)
C1	635.6–637.4	CH₃Cl, O₃, HNO₃, HOCl, HO₂
C2	648.0–652.0	ClO, O₃, N₂O, HNO₃, (H₂CO), (HOCl), (HO₂), (NO₂), (BrO)
D	730.8–732.25	T, O₃, HNO₃, (CH₃Cl), (HO₂)
E	851.5–852.5	NO, O₃, N₂O, (HNO₃), (NO₂), (H₂O₂)
F	952.0–955.0	NO, T, O₃, N₂O, (HNO₃), (HO₂), (CH₃Cl), (NO₂)
G1	685.5–687.2	ClO, O₃, (HNO₃), (HOCl), (H₂O₂), (COF₂), (NO₂)
G2	688.5–692.0	CO, CH₃Cl, ClO, O₃, HNO₃, (HOCl), (HCN), (HO₂), (NO₂), (H₂O)

(注: 粗体表示主要探测目标, 括号内表示分子仅有小部分光谱特征)

表 9 SOPRANO 仪器指标参数

Tab.9 Fundamental parameters of SOPRANO instruments

Parameters	Value
Detectable height/km	10–50
Bandwidth/MHz	1 200–2 000
Spectral resolution/MHz	3; 1.5; 0.3
Vertical resolution/km	2–4
Noise equivalent temperature difference/K	2.5–12.0
System noise temperature/K	2 372–11 384

SIRICE (Submillimeter-wave and Infrared Ice Cloud Experiment) 是 NASA 预计发射的用于地球大

气研究的极轨卫星, 主要目标有两个: (1) 探测全球冰云的冰水路径和有效粒子半径; (2) 在云的生消尺度表征冰水路径和有效粒子半径的分布在云系统和气象过程中的功能, 以量化深对流和天气抬升过程在对流层上层冰晶形成过程中的贡献^[53]。SIRICE 有效载荷包括两个仪器, 亚毫米波/微波辐射计 (SM4) 和红外冰云辐射计 (IRCIR)。其中, SM4 进行 45° 圆锥形扫描, 保持恒定的入射角, 覆盖大约 1 600 km 直径的范围。通过 6 个接收机进行 12 个通道光谱测量。同时结合红外波段的测量结果提高冰云参数的测量精度。拟采用非制冷红外焦平面阵列技术满足光谱分辨率和空间分辨率^[54]。

THz 波在反演卷云微物理参数上的独特优势, 吸引了大量研究机构如 ESA、NASA、NICT 等, 近十年来纷纷开展了星载 THz 波遥感卷云微物理参数的研究。临边探测的方式虽在一定程度上提高了反演的垂直分辨率, 但难以获得卷云的水平分布特性, 难以满足气候模式水平分布范围和水平分辨率要求。机载亚毫米波辐射计 CoSSIR 试验成功为 THz 波反演卷云提供了新的视角, 因此, 后续研究主要基于亚毫米波辐射计, 采用被动遥感的方式反演卷云的有效粒子半径、冰水路径、云高等参数^[55–58]。这些仪器和部分参数如表 10 所示。

表 10 部分星载 THz 波段冰云探测仪器基本参数

Tab.10 Fundamental parameters of some spaceborne THz instruments for cirrus

Name	Institute	Orbit	Frequency /GHz	Description
CIWSIR	ESA	LEO	183, 243, 325, 448, 664	Preparatory (2005)
GOMAS	ESA	GEO	54, 118, 183, 340, 380, 424	Preparatory (2002)
MIRACLE	CNES	LEO	183, 243, 325, 448, 664	Preparatory (2009)
CloudIce	ESA	LEO	183, 243, 325, 448, 664	Preparatory (2010)
Boitata	France & Brazil	LEO	243, 325, 448, 664	Proposed in 2009, currently in development
ISMAR	ESA, Met Office (UK)	LEO (tested by airborne)	118, 243, 325, 448, 664, 874	Proposed in 2008, expected to launch in 2022
IceCube	NASA	LEO	874	Proposed in 2013, currently in development

2.2 球载 THz 大气探测仪器

FIRST (Far-Infrared Spectroscopy of the Troposphere) 是由 NASA 研制的第一台远红外波段大气辐射成像仪, 目的是发展和试验迈克尔逊干涉仪和傅氏变换成像光谱仪遥感光谱的能力, 填补气候观测方面远红外观测仪器的空白。其探测区间为 10~100 μm , 光谱分辨率为 0.625 cm^{-1} 。核心部分是一个带有宽带通分光镜的焦平面阵列, 采用 45° 轨道交叉扫描模式, 每 1.2 s 记录 100 幅 10×10 的干涉图^[59]。噪声等效温度在 60~100 μm 区间为 0.2 K, 在 10~60 μm 区间为 0.5 K, 平均系统误差小于 $0.001\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{cm}^{-1})$ 。2005 年 7 月和 2006 年 9 月 FIRST 分别搭载于氦气球进行了两次试验飞行, 证明了 FIRST 的观测能力, 并进行了改进使得 FIRST 可进行天底和天顶两种观测模式。2007 年和 2008 年搭载于气球进行飞行验证了天顶观测模式^[60]。FIRST 技术逐渐成熟, 成功发展了 3 个方面的技术: 干涉仪、宽带通分光镜、远红外灵敏探测器技术在大气遥感中的应用。

TELIS (TeraHertz and submillimetre Limb Sounder) 由欧洲德国宇航中心 (DLR)、荷兰太空研究所 (SRON)、英国卢瑟福阿普尔顿实验室 (RAL) 联合研究的采用

最新技术、球载、低温、三通道、超导外差式辐射计, 其运行温度为 4 K, 以临边探测方式探测平流层的微量气体成分分布、臭氧层破坏及气候变化^[61]。TELIS 具有三个接收机: SRON (通道频率 480~650 GHz)、RAL (通道频率 500 GHz)、DLR (通道频率 1.8 THz), 分别以各自的研究单位命名。TELIS 工作时信号从双偏置巴塞格伦望远镜通过接收机前端传输、分离与耦合到每个专用通道^[62-63]。其中, DLR 接收机使用了热电子测辐射热计 (HEB) 混频器, 主要利用 THz 信号的热效应, 使它们有灵敏的响应, 响应时间也极快 (快声子或电子扩散的机制), 比 SIS 结混频器的工作频率更高。作为混频器使用, 电压响应是在皮秒的量级, 因此中频可以达到几千兆, 甚至 15 千兆。TELIS 的飞行高度为 10~40 km, 高度分辨率 2 km。2008 年, TELIS 在巴西的特雷西纳进行了第一次测试飞行, 验证了部分技术, 同时对 TELIS 进行了修正^[64]。然后, 分别于 2009 年 3 月、2010 年 1 月、2011 年 3 月在瑞典基律纳进行了 3 次成功飞行, 获取了大量科学数据, 并不断完善, 并计划搭载于 DLR 的飞机 HALO 作科学研究。TELIS 的主要参数如表 11 所示。

表 11 TELIS 探测器基本参数

Tab.11 Fundamental parameters of TELIS instruments

Instrument	Description	Frequency	Detectable objectives	Mode	System noise temperature/K
SRON	Super-Integrated-Receiver (SIR) combining the Superconductor-Isolator-Superconductor (SIS) mixer and quasioptical antenna, a superconducting phase-locked Flux Flow Oscillator (FFO) acting as LO and SIS Harmonic Mixer	480-650 GHz	ClO, BrO, O ₃ , HCl, HOCl, H ₂ O, HO ₂ , NO, N ₂ O, HNO ₃ , CH ₃ Cl, HCN, H ₂ ¹⁸ O, H ₂ ¹⁷ O, HDO, O ₂	Double sideband	200
RAL	Fixed tuned superconductor isolator, SIS mixer	500 GHz	BrO, ClO, O ₃ , N ₂ O	Double sideband	2 000
DLR	Hot electron bolometer (HEB) mixer	1.8 THz	OH, HO ₂ , HCl, NO, NO ₂ , O ₃ , H ₂ O, O ₂ , HOCl, H ₂ ¹⁸ O, H ₂ ¹⁷ O, HDO	Double sideband	3 000-4 000

2.3 机载 THz 大气探测仪器

SWCIR (Sub-millimeter Wave Cloud Ice Radiometer) 研究目标是验证辐射计在量化卷云微物理特性中的应用, 以发展低耗、轻便、空基冰云辐射计技术。SWCIR 搭载于美国 JPL 的 DC-8 飞机上, 中心探测频率为 183 GHz、325 GHz、448 GHz、643 GHz,

共计 10 个通道, 主要用于遥感对流层上层冰云的冰水路径和等效球形粒子半径。探测器使用平面肖特基管混频器和倍增耿氏二极管本振, 其中 643 GHz 通道接收机采用了室温肖特基管混频器, 以使其能直接应用到后续的天基探测系统中^[65-66]。SWCIR 部分参数如表 12 所示。

表 12 SWCIR 探测器基本参数

Tab.12 Fundamental parameters of SWCIR instruments

Parameters	Value
Receiver central frequency/GHz	642.86,448.00,325.15,183.31
System noise temperature/K	<4 000
Beam width	1.5° 3 dB FWHM
Polarization	Linear polarization
Detection accuracy/K	<0.5
Detection error/K	<1.0
Scanning range/(°)	-70+90

FIRSC(The Far Infrared Sensor for Cirrus)机载傅氏变换光谱仪,主要用于探测地球红外至亚毫米波段的辐射。包括一个机载快速扫描高分辨率的傅氏变换光谱仪、灵敏双通道探测器,以及一个 CCD 相机实时记录每一次扫描时天底的云图像^[67]。该仪器利用了 THz 波对冰云粒子尺度和冰水路径的敏感性。FIRSC 于 1998 年 4~5 月间搭载于 T-39 飞机进行了首次飞行试验,随后进行了系列改进,于 1999 年春又进行了数次飞行试验^[68]。其主要参数如表 13 所示。

表 13 FIRSC 探测器基本参数

Tab.13 Fundamental parameters of FIRSC instruments

Parameters	Description
Channels	Channel1: 300-21 000 GHz(1998) 300-1 050 GHz (1999) Channel2: 2 400-4 050 GHz
Spectral resolution/MHz	3 000
FOV/rad	0.03
Scanning time/s	4
Detectors	Channel1: Bolometer, 0.3 K Channel2: Ge:Ga PC, 4.2 K
Noise equivalent temperature difference	Bolometer (300-1050GHz): 1K Photoconductor (2700-3900GHz): 1.2K

CoSSIR (The Compact Scanning Submillimeter-wave Imaging Radiometer)是新型机载、12 通道、被动

亚毫米波全功率成像辐射计,主要工作频段为 183~874 GHz,主要目标是遥感冰云的粒子尺度和冰水路径,同时可用于遥感水汽廓线和降雪率^[69]。2002 年 7 月在 CRYSTAL-FACE (Cirrus Regional Study of Tropical Anvils and Cirrus Layers-Florida Area Cirrus Experiment) 实验中搭载于 NASA 的 ER-2 飞行器,此时 CoSSIR 在 183、220、380、487、640 GHz 附近计 15 个通道,以 4°的波束宽度作两轴圆锥扫描或交叉轨道扫描。在实验中 380、487 GHz 两个频率的通道失败,183、220、640 GHz 通道成功获得数据^[70]。结果表明:在亚毫米波波段的噪声比预期的大,但是亚毫米波段相比低频段对于冰云粒子更加敏感,并且可以联合 CloudSat 系统反演 IWC 和 Dme。2006 年 1 月改进后在 CR-AVE (Costa Rica-Aura Validation Experiment) 实验中搭载于 WB-57 飞行器共 3 次飞行,在亚毫米波波段对卷云进行了极化测量。2007 年在 TC-4 (Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling) 实验中 CoSSIR 两次飞行,此时在 183、220、380、640 (垂直和水平极化)、874 GHz 5 个频率附近共 11 个通道,以 4°的波束宽度作圆锥扫描^[71]。其中,640 GHz 的双极化通道可遥感冰晶粒子形状,183 GHz 和 380 GHz 通道可用于反演水汽廓线。同时,升级了 874 GHz 通道,以相应增加对小冰晶粒子测量的敏感性。

3 结 论

太赫兹大气探测技术的发展涉及电磁学、光电子学、半导体科学、材料以及微加工技术等多个学科,是典型的多学科交叉前沿热点领域。近年来,在相关技术的牵引下,太赫兹遥感技术已经取得了长足进步。目前的 THz 大气探测仪器或从微波波段向亚毫米波扩展至 THz 波段,或从红外波段向远红外扩展至 THz 波段。第一种仪器主要采用超外差式检测仪器,适用频率稍低但谱线分辨率较高的场合,关键技术主要包括室温肖特基二极管混频器、超导体-绝缘体-超导体(SIS)结混频器、热电子测热电阻(HEB)混频器等。外差式检测仪器可保持信号的相位和振幅双重信息,同时也可实现量子极限噪声的高灵敏度检测。但是,混频器必须有一定信号功率的本振信号源,这在 THz 波段难度较大,而且不易形成探测阵列,从而在一定程度上限制了其应用。

第二种主要是宽带测辐射热计、成像阵列或致冷分光光度计等直接检测仪器,可探测频段范围宽,适用频率较高,但谱线分辨率相对较低,多用于阵列多元成像检测等系统。直接检测方式可得到信号的振幅信息,无法得到其相位信息。此外,也存在灵敏度较低、背景噪声影响较大、标定问题等。因此,受限于太赫兹辐射源的输出功率和热辐射背景噪声等因素,在不同环境、波段范围和探测目标情况下灵活选择各种太赫兹遥感仪器相互补充。

目前,国际国内都深入开展了太赫兹探测仪器的研究,在被动探测和临边探测方面 THz 大气探测仪器已经投入使用。在探测频率方面,目前载荷频段主要集中在 118~874 GHz 范围内,并有向 THz 高频段发展的趋势,有助于获得更多大气成分的探测信息,同时有利于避开地面和空间通信的干扰信号。在探测通道方面,更加精细化的探测通道有利于了解探测目标的精细特性,特别是对于温湿廓线探测,将有利于提高三维反演精度。在天线型式方面,目前多采用双偏置卡塞格伦天线,随着探测频率增高,增加天线口径以提高分辨率。在信号接收方面,为了获得较高的灵敏度,从常温肖特基二极管混频器逐步发展为致冷 SIS 结混频器,且研究实现焦平面阵列探测。

为推进我国 THz 大气遥感技术的发展,应深化各部门单位及国际交流合作,着重加强 THz 遥感技术应用的基础及关键技术研究,一方面,改进国际上已经应用的 THz 遥感器件,提高光谱分辨率,降低系统噪声、提高接收机灵敏度;一方面重点研究 THz 信号与物质的相互作用,发现新的物理效应,突破检测机制,据以研制新型 THz 检测器。另外,THz 辐射传输模式的改进及验证、探测通道选择与试验等方面也是今后一段时间内的研究重点。随着对太赫兹技术研究的深入,太赫兹技术在大气探测领域的应用空间必将极大扩展。

参考文献:

- [1] Yao Jianquan, Wang Jingli, Zhong Kai, et al. Study and outlook of THz radiation atmospheric propagation [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(10): 1582-1588. (in Chinese)
姚建铨, 汪静丽, 钟凯, 等. THz 辐射大气传输研究和展望 [J]. *光电子·激光*, 2010, 21(10): 1582-1588.
- [2] Peter H Siegel. Terahertz technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [3] Peter H Siegel. Terahertz pioneers: a series of interviews with significant contributors to terahertz science and technology [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(4): 409.
- [4] Jana Mendrok, Dong L Wu, Stefan A Buhler, et al. Sub-millimeter wave radiometer for observation of cloudice-a proposal for Japanese mission [C]//Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII SPIE, 2009, 7474: 74740T.
- [5] Paul B Hays, Hilary E Snell. Atmospheric remote sensing in the terahertz region [C]//First International Symposium on Space Terahertz Technology, 1990: 482-491.
- [6] Cathy Clerbaux, Solene Turquet, Pierre Coheur. Infrared remote sensing of atmospheric composition and air quality: towards operational applications [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, 342(4): 349-356.
- [7] Paulo Pampaloni, S Paloscia. Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere [M]. Netherlands: VSP, 2000: 263-282.
- [8] Yang P, Liou K N, Bi L, et al. On the radiative properties of ice clouds: Light scattering, remote sensing, and radiation parameterization [J]. *Adv Atmos Sci*, 2015, 32(1): 32-63.
- [9] Michael A Lefsky, Warren B Cohen, Geoffrey G Parker, et al. Lidar remote sensing for ecosystem studies [J]. *Bioscience*, 2002, 52(1): 19-30.
- [10] Klein U. Future satellite earth observation requirements and technology in millimetre and sub-millimetre wavelength region [C]//The 17th Int Symp on Space THz Technology, 2006: 21-28.
- [11] Peter H Siegel. THz instruments for space [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(11): 2957-2965.
- [12] Peter H Siegel. THz for space: the golden age [J]. *IEEE Xplore*, 2010, 978(1): 816-819.
- [13] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 130: 4-50.
- [14] Podobedov V B, Plusquellic D F, Siegrist K E, et al. New measurements of the water vapor continuum in the region from 0.3 to 2.7 THz [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2008, 109: 458-467.
- [15] David M Slocum, Thomas M Goyette, Elizabeth J Slingerland, et al. Terahertz atmospheric attenuation and continuum effects

- [C]//SPIE DSS Conference, 2013, 8716: 871607-1-871607-14.
- [16] David M Slocum, Thomas M Goyette, Robert H Giles. High-resolution terahertz atmospheric water vapor continuum measurements [C]//Terahertz Physics, Devices, and Systems VIII: Advanced Applications in Industry and Defense, 2014, 9102: 91020E.
- [17] Kasai Yasuko. Terahertz-wave remote sensing: introduction to terahertz-wave remotesensing [J]. *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, 2008, 55(1): 79-81.
- [18] Kasai Yasuko, Ochiai Satoshi, Mendrok Jana, et al. THz remote sensing for water vapor and cloud observation [C]//37th COSPAR Scientific Assembly, 2008: 1456-1463.
- [19] Blackwell W J, Staelin D H. Comparative performance analysis of passive microwave systems for tropospheric sounding of temperature and water vapor profiles [C]//Proceedings of SPIE, 1996, 2812: 472-478.
- [20] Cho H -M, Zhang Z, Meyer K, et al. Frequency and causes of failed MODIS cloud property retrievals for liquid phase clouds over global oceans [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120(9): 4132-4154.
- [21] Vidot J, Baran A J, Brunel P. A new ice cloud parameterization for infrared radiative transfer simulation of cloudy radiances: evaluation and optimization with IIR observations and ice cloud profile retrieval products [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120(14): 6937-6951.
- [22] Gong J, Wu D L. CloudSat-constrained cloud ice water path and cloud top height retrievals from MHS 157 and 183.3 GHz radiances [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(6): 1873-1890.
- [23] Jana Mendrok, Philippe Baron, Yasuko Kasaia. Studying the potential of terahertz radiation for deriving ice cloud microphysical information[C]//Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIII, 2008, 7107: 710704.
- [24] De Lucia F C, Petkie D T. THz gas sensing with submillimeter techniques[C]//SPIE, 2005, 5790: 44-53.
- [25] De Lucia F C, Petkie D T. The physics and chemistry of THz sensors and imagers: long-standing applications, new opportunities, and pitfalls[C]//SPIE, 2005, 5989: 598911.
- [26] Jacobsen R H, Mittleman D M, Nuss M C. Gas sensing using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(24): 2011-2013.
- [27] Alexander Kellarev, Dan Sheffer. Terahertz remote sensing [C]//Terahertz Physics, Devices, and Systems V: Advance Applications in Industry and Defense, 2011: 80230N.
- [28] Phillips T G, Keene J C. Submillimeter astronomy [C]//IEEE, 1992, 80(11): 1662-1678.
- [29] Salomonovich A E, Solomonov S V, Khaikin A S, et al. Satellite measurements of submillimetre radiation of the earth's atmosphere [C]//Space research XVI: Proceedings of the Open Meetings of Working Groups on Physical Sciences and Symposium and Workshop on Results from Coordinated Upper Atmosphere Measurement Programs, 1976: 155-159.
- [30] Salomonovich A E, Bakun V N, Kovalev V S, et al. A submillimeter telescope for the orbital piloted station Salyut-6 [J]. *Telecomm Radio Eng*, 1979, 34(2): 82-88.
- [31] Wilheit T T, Al-Khalaf. A simplified interpretation of the radiances from the SSM/T -2 [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1994, 54(1): 203-212.
- [32] Galin I, Brest D H, Martner G R. The DMSP SSMT/2microwave water-vapor profiler[C]//SPIE OE/Aerospace and RemoteSensing Int Symp, 1993.
- [33] Byung-Ju Sohn, Eui-Seok Chung, Johannes Schmetz, et al. Estimating upper-tropospheric water vapor from SSM/T -2 satellite measurements[J]. *J Appl Meteor*, 2003, 42: 488-504.
- [34] Waters J W, Read W G, Froidevaux L, et al. The UARS and EOS microwave limb sounder (MLS) experiments [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 56: 194-218.
- [35] Joe W Waters, Gordon E Peckham. The microwave limb sounder (MLS) experiments for UARS and EOS [J]. *The International Society for Optical Engineering*, 1991: 543 - 546.
- [36] Hugh C Pumphrey, Hannah L Clark, Robert S Harwood. Lower stratospheric water vapor measured by UARS MLS [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(12): 1691-1694.
- [37] Barath F T, Chavez M C, Cofield R E, et al. The upper atmosphere research satellite microwave limb sounder instrument[J]. *J Geophys Res*, 1993, 98(10): 751-762.
- [38] Neugebauer G, Habing H J, van Duinen R, et al. The infrared astronomical satellite(IRAS) mission[J]. *Astrophys J*, 1984, 278(2): L1-L6.
- [39] Murtagh Donal, Frisk Urban, Merino Frank, et al. An overview of the Odin atmospheric mission [J]. *Canadian Journal of Physics*, 2002, 80(4): 357-368.
- [40] Ph Baron, Ph Ricaud, J de la Noë, et al. Studies for the Odin sub-millimetre radiometer. II: Retrieval methodology [J]. *Canadian Journal of Physics*, 2002, 80(4): 341-356.
- [41] Urban J, Lautie N, Le Flochmoez E, et al. Odin/SMR limb observations of stratospheric trace gases: Validation of N₂O [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: D09301-

- D09320.
- [42] Mark R Schoeberl, Anne R Douglass, Ernest Hilsenrath, et al. Overview of the EOS Aura mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44 (5): 1066–1074.
- [43] Krotkov N A, McLinden C A, Li C, et al. Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2014 [J]. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2015, 15: 26555–26607.
- [44] Pickett H M. Microwave limb sounder THz module on Aura [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1122–1130.
- [45] Gaidis M C, Pickett H M, Smith C D, et al. A 2.5 THz receiver front-end for spaceborne applications [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 2000, MTT–48(4): 733–739.
- [46] Junji Inatani, Hiroyuki Ozeki, Ryouta Satoh, et al. Submillimeter limb-emission sounder JEM/SMILES aboard the Space Station [C]//Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment II, 2000, 4152: 243.
- [47] Seta M, Masuko H, Manabe T, et al. Submillimeter-wave SIS receiver for JEM/SMILES [J]. *Adv Space Res*, 2000, 26 (6): 1021–1024.
- [48] Sagawa H, Sato T O, Baron P, et al. Comparison of SMILES CIO profiles with satellite, balloon-borne and ground-based measurements [J]. *Atmos Meas Tech*, 2013, 6: 3325–3347.
- [49] Fujii Y, Kikuchi K, Inatani J, et al. Space-borne 640-GHz receiver based on 4-K mechanical cooler [J]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, 2000, 4013: 90–99.
- [50] Perrin A, Pazzarini C, Colmont J M, et al. Molecular line parameters for the "MASTER" (Millimeter Wave Acquisitions for Stratosphere/Troposphere Exchange Research) database [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2005, 51(2): 161–205.
- [51] Matthew Oldfield, Brian P Moyna, Elie Allouis, et al. MARSCHALS: development of an airborne millimeter-wave limb sounder [C]//Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V, 2001, 4540: 450663.
- [52] Eric Defer, Carlos Jimenez, Catherine Prigent. Sub-millimetre wave radiometry for cloud and rain characterization: from simulation to Earth observation mission concept [J]. *C R Physique*, 2011, 10: 1016–1023.
- [53] Joe K Taylor, Henry E Revercomb, Fred A Best, et al. The infrared cloud Ice radiometer (IRCIR) [C]//Infrared Technology and Applications XXXIII, 2007, 6542: 65423H.
- [54] L'Ecuyer, Tristan S, Greenwald T, et al. Information content analysis in support of a new infrared cloud ice radiometer for SIRICE [C]//Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, 2006.
- [55] Buehler S A, Jimenez C, Evans K F, et al. A concept for a satellite mission to measure cloud ice water path, ice particle size, and cloud altitude [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(S2): 109–128.
- [56] Zhao Haibo, Zheng Cheng, Zhang Yongfang, et al. Information content analysis for the millimeter and sub-millimeter wave atmospheric sounding data from geostationary orbit [J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2014, 35: 183–191.
- [57] Buehler S A, Defer E, Evans F, et al. Observing ice clouds in the submillimeter spectral range: the Cloud Ice mission proposal for ESA's Earth Explorer 8 [J]. *Atmos Meas Tech*, 2012, 5: 1529–1549.
- [58] Brian Moyna, Clare Lee, Janet Charlton, et al. ISMAR: towards a submillimetre-wave airborne demonstrator for the observation of precipitation and ice clouds [C]//Twenty-First International Symposium on Space Terahertz Technology 2010: 185.
- [59] Winnewisser G. Submillimeter wave spectroscopy in astronomy related to the ESA-project FIRST (Far InfraRed Submillimetre space Telescope)[C]//SPIE, 1986, 598: 2–7.
- [60] Wellard S, Bingham G, Latvakoski H, et al. Far-infrared spectroscopy of the troposphere (FIRST): flight performance and data processing [J]. *Infrared Spaceborne Remote Sensing XIV*, 2006, 6297: 62970Q.
- [61] Gert de Lange, Manfred Birk, Dick Boersma, et al. Development and characterization of the superconducting integrated receiver channel of the TELIS atmospheric sounder [J]. *Supercond Sci Technol*, 2010, 23(4): 45016–45023.
- [62] Fuerholz P, Murk A. Phase-corrected near-field measurements of the TELIS telescope at 637 GHz [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(9): 2518–2525.
- [63] Suttiwong N, Birk M, Stefan B. Development and characterization of the balloon-borne instrument TELIS (Terahertz and Submm Limb Sounder): 1.8 THz receiver [C]//Proceedings of the 19th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programs and Related Research, 2009: 165–168.
- [64] Xu J, Schreier F, Vogt P, et al. A sensitivity study for far infrared balloon-borne limb emission sounding of stratospheric

- trace gases [J]. *Geosci Instrum Method Data Syst Discuss*, 2013, 3: 251–303.
- [65] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, et al. The submillimeter ν -wave cloud ice radiometer (SWCIR): Simulations of retrieval algorithm performance[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, 107: 4028–4052.
- [66] Franklin Evans K, Steven J Walter, Andrew J Heymsfield, et al. Submillimeter-wave cloud ice radiometer: simulations of retrieval algorithm performance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D3): 4028–4048.
- [67] Vanek M D, Nolt I G, Tappan N D, et al. Far-infrared sensor for cirrus (FIRSC): an aircraft-based Fourier-transform spectrometer to measure cloud radiance [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(13): 2169–2176.
- [68] Melnick G J, Dalgarno A, Fazio N R, et al. The submillimeter wave astronomy satellite: Science objectives and instrument description[J]. *Astrophys J Lett*, 2000, 539(2): L77–L85.
- [69] Evans K F, Wang J R, Starr D O’C, et al. Ice hydrometeor profile retrieval algorithm for high-frequency microwave radiometers: application to the CoSSIR instrument during TC4 [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5: 2277–2306.
- [70] Evans K F, Wang J R, Racette P E, et al. Ice cloud retrievals and analysis with the compact scanning submillimeter imaging radiometer and the cloud radar system during CRYSTAL FACE [J]. *American Meteorological Society*, 2005, 44: 839–859.
- [71] Miao J, Johnsen K –P, Buehler S, et al. The potential of polarization measurements from space at mm and sub-mm wavelengths for determining cirrus cloud parameters [J]. *Atmos Chem Phys*, 2003, 3: 39–48.