

文章编号: 1002-1582(2025)06-0690-08

太赫兹气象遥感技术发展现状及趋势

邓雨旺, 刘钧*, 肖海龙, 王甚男, 王刚, 张彪

(1. 中国华云气象科技集团有限公司, 北京 100081)

(2. 中国气象局智能气象观测技术重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要: 太赫兹气象遥感技术的应用越来越凸显,并能与包括微波、毫米波、红外和激光雷达等传统的气象遥感技术形成有力互补,进一步推动气象遥感科学创新提质发展。文章介绍了太赫兹被动和主动气象遥感技术,以及该技术在星载、机载、艇载和地基等平台的气象应用。同时,总结了极具代表性的太赫兹辐射计和云雷达在气象遥感中的应用。最后,文章对太赫兹气象遥感技术的未来发展趋势进行了探讨。

关 键 词: 太赫兹; 遥感技术; 辐射计; 云雷达; 气象应用

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Developments and outlook of terahertz meteorological remote sensing technology

DENG Yuwang, LIU Jun*, XIAO Hailong, WANG Shennan, WANG Gang, ZHANG Biao

(1. China Huayun Meteorological Technology Group Co., Ltd., Beijing 100081, China)

(2. Key Laboratory of Intelligent Meteorological Observation Technology,
China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The use of terahertz meteorological remote sensing technology is becoming increasingly prominent and can complement traditional meteorological remote sensing methods, including microwave, millimeter-wave, infrared, and lidar. This technology further drives innovation and quality improvement in meteorological remote sensing science. It introduces passive and active terahertz meteorological remote sensing technologies, as well as their meteorological applications on various platforms such as satellites, aircraft, ships, and ground-based stations. Additionally, it summarizes the developments of representative terahertz radiometers and cloud radars in meteorological remote sensing. Finally, it discusses the future trends of terahertz meteorological remote sensing technology.

Keywords: terahertz; remote sensing technology; radiometer; cloud radar; meteorological application

0 引 言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1 至 10THz (波长从 30 μ m 到 3mm) 之间的电磁波,位于毫米波与红外辐射之间^[1]。早在 20 世纪 80 年代太赫兹技术已应用于气象遥感领域,但因太赫兹高效发

射源和灵敏探测器件的限制,太赫兹波气象遥感技术发展缓慢^[2]。随着气象遥感技术的进步,太赫兹波在气象遥感领域的应用能与现有波段形成有力互补^[3]。太赫兹气象遥感是利用发射的太赫兹波或空间中的太赫兹辐射对气象目标进行远程探测和感知。相较于可见光和红外遥感系统,太赫兹

收稿日期: 2025-02-27; 收到修改稿日期: 2025-05-20

作者简介: 邓雨旺 (1995—), 男, 工程师, 博士, 从事太赫兹气象遥感和量子激光雷达技术研究。

dengyuwang@cnhyc.com

刘钧 (1976—), 男, 正高级工程师, 硕士, 从事综合气象观测技术研究。

* 通讯作者: liujun@cnhyc.com

遥感受大气衰减的影响较小。它对云雾、烟尘、雨雪及沙暴等有很强的穿透能力，并对特定大气成分表现出高灵敏度，从而实现全天时、全天候观测^[4]。与毫米波遥感技术相比，太赫兹波长接近微小冰云粒子，能够精确测量冰云的三维结构。这使得太赫兹遥感技术在气象目标探测领域展现出了广阔的应用前景。

太赫兹气象遥感技术分为被动遥感和主动遥感。前者通过检测太赫兹频段大气分子的自发辐射，实现对气象参数、温室气体及污染物的监测。主动遥感技术是基于向探测目标发射太赫兹波并分析回波来对气象目标进行测量。当前以太赫兹被动遥感技术为主，并朝向主被动遥感技术并重发展的方向推进。

1 太赫兹被动遥感技术

太赫兹被动遥感主要通过辐射计实现对气象参数的精确测量^[5]。在太赫兹波段，由于许多气体分子具有独特的吸收谱线，可以识别并确定多种气体成分浓度，从而反演出温度、湿度和风速等垂直廓线。表 1 列出了不同太赫兹频段辐射计的主要大气探测目标。太赫兹辐射计通常由天线、准光系统、接收机和信号处理器组成。为提高空间分辨力，常采用大口径反射面天线。准光系统用于分离反射面天线传输过来的多频段信号，并将其导向对应的接收机。接收机将各频段的亮温信号功率转换为直流电压信号，完成太赫兹频段信号的功率测量^[6]。星载太赫兹辐射计发展较早且应用广泛，而近年来，地基和机载太赫兹辐射计也进入了快速发展阶段，并逐步应用于实际的气象目标探测任务中。

表 1 辐射计探测频率和主要探测目标

探测频率/GHz	探测目标
118	O ₂ 、温度廓线
165	H ₂ O
183	H ₂ O、HNO ₃ 、冰云、湿度廓线
190	H ₂ O、HNO ₃
240	CO、O ₃
325	H ₂ O
368	O ₂
424	O ₂
487	O ₂
556	H ₂ O
640	H ₂ O、NO ₂ 、HCL、CLO
2500	OH

1.1 星载太赫兹辐射计

当前，星载辐射计逐步向太赫兹频段延伸的趋势既源于高频段技术带来的空间分辨率跃升与

通信干扰规避需求，也因其能拓展探测频段、细化通道划分，从而推动载荷小型化发展。通过更高频段的精细观测，可更精准解析探测目标的物理特性，显著提升数据反演精度。

太赫兹辐射计技术的气象遥感应用始于 1974 年苏联发射的 Cosmos-669 卫星，其搭载的测辐射热计系统工作频段覆盖 300GHz 至 5THz，首次实现温度、压强、云层及水汽分布的综合探测^[7]。此后，美国在 1994 年与 1997 年发射的 DMSP-F12/F14 卫星搭载 150GHz 和 183GHz 双频辐射计，专用于反演大气水汽垂直廓线^[3]；图 1 所示 1991 年 UARS 卫星搭载的临边探测器（MLS）采用 183GHz 和 205GHz 双通道设计，首次引入超外差式高分辨率光谱接收技术^[8]。至 1998 年，SWAS 卫星进一步拓展频段应用，其四通道次谐波肖特基管接收机覆盖 486~581GHz 频段，通过分频探测，验证了太赫兹多频协同观测的可行性^[9]。进入 21 世纪，技术发展更趋多元化。2004 年 NASA 发射的 AURA 卫星搭载 2.5THz 临边探测辐射计，首次实现对大气 OH 自由基、氯氧化物及臭氧浓度的精准监测^[10]。美国 2017 年发射的 JPSS-1 卫星，其太赫兹探测仪工作频段扩展至 100~183.3GHz，空间分辨率较前代 AMSU-A 提升三倍，大幅优化了全球覆盖效率。2018 年，立方星搭载的 883GHz 冰云探测仪，则通过高频段特性增强了对冰云微物理参数的敏感度^[11]。这些进展表明，从多频段协同、接收机技术创新到探测模式升级，太赫兹辐射计技术持续推动气象遥感向高精度、多维化方向发展。



图 1 UARS 卫星

美国国防气象卫星（DMSP）是全球唯一专门服务于军事领域的气象卫星系列，至今已发展了七代，共发射了 40 多颗卫星。目前在轨运行的包括第六代的部分卫星和第七代卫星（DMSP 5D-3 F15 至 F18，于 1999 年至 2009 年间发射）。这些卫星的关键辐射计载荷具有五个通道，工作频段为 91 至 183GHz^[4]。DMSP 卫星的换代方案经历了一段曲折的过程，大约耗时十年，最终在过去两年内基本确定。图 2 展示了 DMSP 卫星的发展历程及其换代过程^[12]。

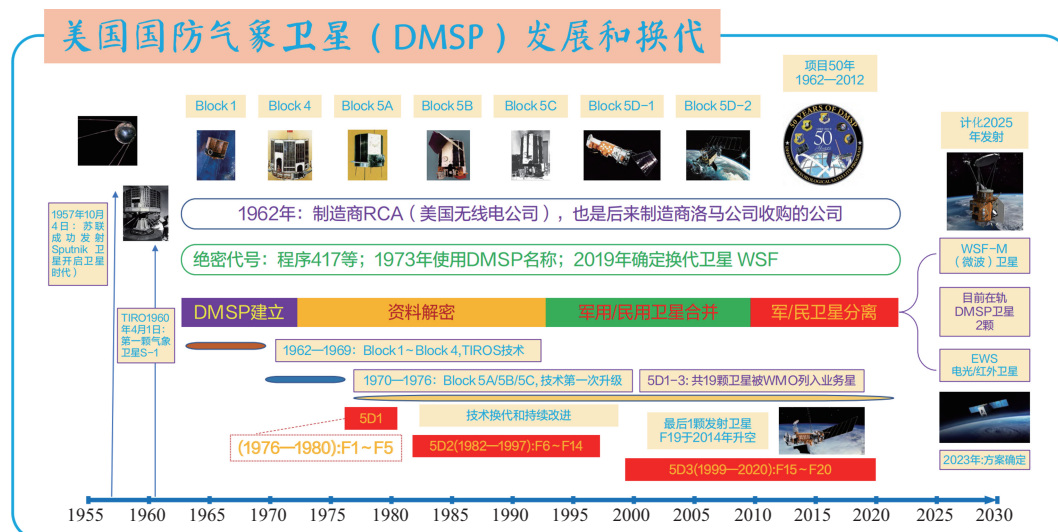


图2 DMSP卫星的发展和换代历程

2001年，瑞典发射的Odin卫星观测高度范围为15~120km，频率范围覆盖118.25~119.25GHz、486.1~503.9GHz及541.0~580.4GHz，能监测氯化物和臭氧层信息^[13]。2009年，ESA成功发射了Herschel空间设施，装备有高分辨率外差分光谱计HIFI等设备^[4]。此外，欧洲的“气象业务”（MetOp）系列极轨气象卫星^[14]，新一代MetOp-Sc于2022年发射，其MWS载荷拥有24个通道，工作频段为23.8~229GHz^[15]。随后，ESA设计了可用于小卫星搭载的太赫兹冰云探测辐射计，增加了157GHz和874GHz通道，并采用双极化通道以提高探测精度^[16]。ESA与日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）合作的EarthCARE项目于2024年5月29日发射，旨在探测云、气溶胶及其辐射过程，提升对气候变化的理解。JAXA在2009年发射的亚毫米波临边探测器JEM/SMILES被安装于国际空间站（ISS），频段为624~639GHz，用于探测多种大气微量物质^[4]。俄罗斯则在MTVZA系列辐射计中设置了183GHz通道，并正在设计新的同步轨道辐射计，增加多个通道以增强对地表降水和大气水汽含量的探测能力。此外，其新一代的同步轨道辐射计围绕183GHz、220GHz、340GHz、380GHz、425GHz等通道已经开始设计^[17]。国际最新进展包括NASA开发的全极化太赫兹辐射计和欧洲空间局开展的IceCube星载实验，为2025年后高时空分辨率全球大气三维监测奠定技术基础。

我国星载太赫兹辐射计被动遥感技术正处于快速发展阶段，气象领域成果尤为突出：“风云三号”卫星搭载的微波湿度计已实现183.31GHz最高探测频点，而正在研制的静止轨道毫米波亚毫米波探测仪更将工作频段扩展至54~425GHz；“风云

四号”A星于2016年成功获取全球首幅静止轨道425GHz遥感图像，风云三号和四号卫星如图3所示。新一代冰云探测载荷通过183~664GHz宽频覆盖，创新实现冰云粒子的多角度精细化探测^[4]。我国于“十三五”期间突破亚毫米波临边探测仪研制，其118~640GHz频段结合优于1.5K的灵敏度，有效弥补光学手段的观测盲区。面向未来，“风云五号”测云体系规划已明确集成高/低频太赫兹辐射计的国产化云成像系统研制目标，为全球大气科学观测提供更精密的技术支撑^[18]。

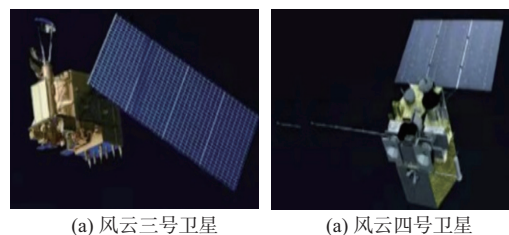


图3 中国主要在轨运行气象卫星

1.2 机载太赫兹辐射计

SWCIR（亚毫米波云冰辐射计）由美国JPL实验室研发，搭载于DC-8飞机，具备643GHz、448GHz、325GHz和183GHz四个中心频率通道，旨在推动轻量化空基冰云探测技术发展^[19]。1997年，Evans等团队进一步验证了Bayesian算法反演冰云参数的可靠性^[20]。CoSSIR（圆锥扫描亚毫米波成像辐射计）由NASA戈达德中心研制，如图4所示，搭载于ER-2飞机，集成太赫兹波段12个通道，兼具冰云粒子尺度、冰水路径及降雪率的多参数遥感能力。其太赫兹频段（380~640GHz）对冰云粒子敏感性显著优于低频段^[21]。Marschals由ESA主导开发，作为机载外差式光谱仪，采用临边探测模式，覆盖300GHz、321GHz和345GHz频段，核心目标为验证MASTER任务中太赫兹波光

谱辐射计的技术可行性与频段优势。上述辐射计的发展,从多频段协同、算法优化到探测模式创新,系统性推动了太赫兹遥感技术在冰云监测与气象大气成分分析中的应用深度,为气象卫星载荷国产化及高精度观测网络构建奠定了实践基础。



图4 圆锥扫描太赫兹成像辐射计(CoSSIR)

2021年中国空间技术研究院西安分院参与了气象局“海燕”计划,在海南利用太赫兹辐射计完成了我国首次太赫兹冰云探测。2023年西安分院进一步参与了太赫兹谱段冰云的微物理特性探测飞行试验,使用飞机为奖状II型,目前技术指标满足冰云探测需求。同年中国科学院国家空间中心基于ER2飞机挂载高分辨率THz辐射计观测的数据研究了中高层大气风速测量的可能性和方法,在反演中使用的太赫兹辐射计观测亮温和风速如图5所示。通过对0.1至5THz频段内不同分子(如水蒸气、O₃、CO₂等)谱线强度和敏感性分析,指出在40至105km高度范围内,通过选取适当的太赫兹波段组合,可以获得高精度(优于5m/s)的大气风速信息^[22]。

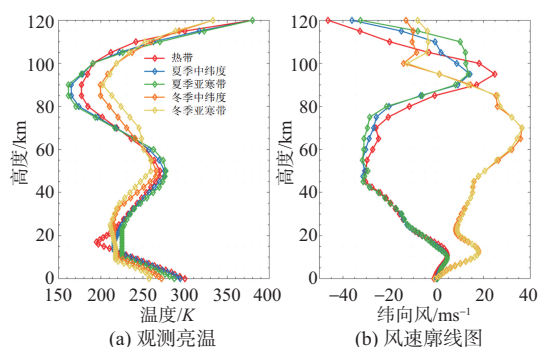


图5 反演中使用的太赫兹辐射计观测亮温和风速

1.3 地基太赫兹辐射计

当前地基微波辐射计采用K/V频段,探测频率较低,探测通道较少,导致目标信息获取不够深入和全面,大气气象参数反演分层不够精细,难以满足高精度、高时空分辨率天气预报等需要。

因此,扩展更高频段、进行太赫兹谱段探测是地基辐射计的主要发展趋势之一。采用更高工作频段的太赫兹辐射计对于提高辐射计的空间分辨率,获得更多的探测频段和通道,从更高谱段的辐射信息获得更多的大气参量信息,同时进一步降低辐射计体积、重量和功耗都具有重要意义。随着毫米波、亚毫米波乃至太赫兹技术发展,国外新一代辐射计频段已扩展至亚毫米波和太赫兹频段,并且探测通道数目更多,谱段更加细化。地基太赫兹辐射计数据训练通常采用观测站点的探空资料作为训练样本,将各个通道的大气辐射亮温与温湿度廓线进行一一对应,输入到神经网络进行训练。由于探空数据仅有大气的温湿度廓线,没有直接观测的大气太赫兹辐射亮温,因此就需要利用大气太赫兹辐射传输模型结合探空资料计算对应的各个通道大气微波辐射亮温(正演)。该模型在输入对应的温度、相对湿度和云液态水廓线后即可得到各个频点的大气太赫兹辐射亮温,将这个亮温数据集作为神经网络的输入样本,对应的探空廓线作为输出样本实现网络的训练。训练后的网络可用于太赫兹辐射计观测亮温反演大气温湿度信息。

上海航天技术研究院和中国空间技术研究院是较早进行地基太赫兹辐射计研制的单位,前者的研发工作主要用于和星载太赫兹辐射计进行联合观测试验,后者的研究面向气象业务应用。上海航天技术研究院联合相关企业研制的首台工程级118GHz地基辐射计已布设于内蒙古锡林浩特气象站点,如图6(a)所示,主要用来观测1~10km内的大气温度廓线分布。该辐射计主要测量大气O₂吸收频段的太赫兹辐射亮温来反演大气温度廓线。图6(b)展示了该辐射计不同时间点测量的锡林浩特站点1~10km内的大气温度廓线分布。目前中国气象局直属中国华云气象科技集团有限公司正联合北京理工大学进行地基183GHz太赫兹辐射计的联合预研,将用来对大气湿度廓线进行探测。

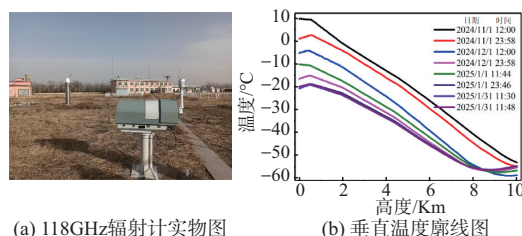


图6 地基太赫兹辐射计实物图及观测结果

2 太赫兹主动遥感技术

主动太赫兹气象遥感技术是一种通过主动发

射太赫兹波，并分析其与大气成分（如水汽、氧气、云粒子、气溶胶、沙尘等）相互作用后的反射或散射信号，以非接触方式获取大气气象参数的探测技术。其核心原理包括利用太赫兹源（如行波管、量子级联激光器）向大气中发射特定频率的电磁波，太赫兹波与大气分子或粒子发生吸收、散射、折射等相互作用效应，信号特性（强度、相位、频率）随之改变，通过高灵敏度探测器（如基于混频器的超外差探测、光电导直接探测）捕获回波信号，结合反演算法提取大气参数（如湿度、温度、污染物浓度、云微观结构等）。太赫兹云雷达无疑是当前主动太赫兹气象遥感技术领域中核心技术和关键设备。

北京理工大学曾率先研制出国内第一台太赫兹 220GHz 主动云雷达，实现地面至天顶 1 公里云剖面观测，装置实物图如图 7（a）所示^[23]。上海无线电设备研究所也已成功研制了地基太赫兹云雷达（装置见图 7（b）），其核心功能是实现对观测点上空云层剖面信息的实时动态监测^[24]。2017 年 7 月至 11 月，该太赫兹云雷达在上海（121.33°E，31.16°N）开展了首次外场试验，重点验证系统的探测性能与稳定性。试验采用 220GHz 工作频率，系统最小可探测雷达反射率因子为 -21dBZ@1km，距离分辨力达数十米级，时间分辨力为秒级。研究团队筛选出 2 组典型观测数据用于反演分析（见图 8）。基于最优估计理论，团队开发了针对液态云微物理参数的反演算法，包括有效粒子半径、液态水含量、粒子数浓度及分布宽度参数。通过分析试验期间的雷达回波特征，反演结果揭示了云层的微观结构动态演变规律^[25]。2020 年则更广泛地研究了太赫兹频段内用于冰云微物理参数反演的各种算法^[26]。当前上海无线电设备研究所新款太赫兹云雷达可实现地面至天顶近 10 公里云剖面观测，良好晴空条件下使用更优太赫兹大气窗口频率可达 15 公里云观测。该团队还研究了机载 220GHz 云雷达在探测云层时的信号衰减问题及其订正方法。研究结果提升了利用 220GHz 频段进行云物理特性探测的准确性。此工作对于改进云层观测技术及理解其内部结构具有重要意义^[27]。



(a) 北京理工大学研制 (b) 上海无线电设备研究所研制

图 7 太赫兹云雷达装置图

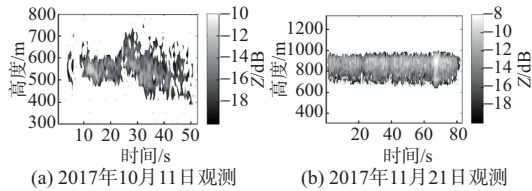


图 8 太赫兹云雷达观测图谱

近年来，多家研究机构针对星载太赫兹主动云雷达的不同研究方面进行了预研探究。2017 年上海航天技术研究院王平等初步探讨了将太赫兹技术应用于星载云雷达的可能性^[28]，并提出了设计星载太赫兹主动云雷达时需考虑的关键技术和挑战。2018 年国家卫星气象中心商建等深入分析了天基太赫兹云雷达的需求指标，如表 2 所示，包括频率选择、探测范围、分辨率等关键性能参数^[29]。同年中国科学院吴琼等的研究聚焦于利用双频（包括太赫兹频段）星载云雷达进行云微物理参数的反演算法^[30]。山东省气象局吴举秀等的研究详细评估了星载太赫兹双频云雷达在探测冰云方面的潜力，特别关注其对不同厚度云层的穿透能力和探测精度。研究表明，采用特定频段组合可以有效提升对复杂云系内部结构的解析能力^[31]。

表 2 天基太赫兹测云雷达指标需求

参数	雷达参数设置
探测频段/GHz	225 左右的大气窗口
距离分辨率/m	<10
水平分辨率/m	≤100
波束宽度/(°)	0.0143
天线扫描方式	垂直航向
扫描范围/(°)	±51.34
探测高度范围/km	地表~20
灵敏度(最小可探测反射率)/dBz	≤-25(最低), -40(期望值)

注:波束宽度是以卫星轨道高度 400km、星下点水平分辨率 100m 为例

此外，西安电子科技大学王彪等在 2022 年研究了 220GHz 太赫兹雷达探测卷云中的非球形冰晶粒子时，其雷达反射率因子 Z_m 与冰水含量 I 之间的关系。研究表明，非球形冰晶粒子和冰云模型都对 Z_m - I 关系产生了一定的影响。该研究对于中纬度卷云的太赫兹波雷达探测以及云参数反演具有实际应用价值，并可以为太赫兹波测云雷达的研发提供参考^[32]。2023 年北京真空电子研究所研制了 237GHz 行波管，如图 9 所示，旨在为太赫兹云雷达系统提供高功率放大器。该行波管采用 20kV、50mA 的 Pierce 型阴极枪产生的笔形电子束，并通过周期性永久磁铁（PPMs）聚焦，实现小型化和轻量化。采用优化的折叠波导（FWG）慢波结构（SWS），通过修改圆形弯头来提高耦合

电抗并消除边带振荡,以满足太赫兹云雷达系统对高增益和宽带输出的要求。未来,该研究成果对于推动太赫兹技术在测云雷达等领域的应用具有重要意义^[33]。中国电科十四所是国内最早开展机载合成孔径雷达研究的单位之一,十二五以来,在多项国家部委项目支持下,已经突破了太赫兹波段视频合成孔径雷达(SAR)的关键技术,整体技术水平达到国际先进水平,部分关键指标超过美国同类型产品。开创了国内首套机载太赫兹四通道多功能视频成像雷达系统,可用于移动团雾的监测。

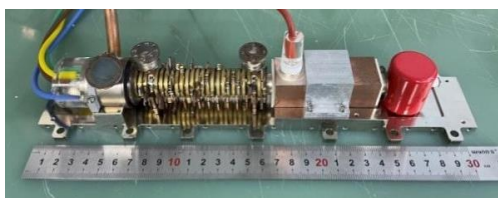


图9 237GHz行波管原型

3 太赫兹大气遥感技术发展趋势

3.1 新技术创新发展

当前量子技术和人工智能技术和正蓬勃发展,影响着各行各业,也将对太赫兹气象遥感技术产生深远的影响。如何做好量子+太赫兹、AI+太赫兹等新技术创新联动发展尤为重要。国防科技大学王宏强研究团队论证了里德堡原子技术在太赫兹探测领域展现了卓越的性能,包括高灵敏度、精确的可溯源性、优秀的空间分辨率和实时成像能力^[34]。通过利用里德堡原子的优势,有望推动新一代量子器件的发展,并催生出更加先进的太赫兹大气遥感设备。刘康等针对提升太赫兹雷达探测能力进行了深入研究,提出了一种基于单光子探测技术的超灵敏目标识别量子增强探测方法^[35]。该方法通过采用单光子探测器代替传统雷达接收机,显著增加了太赫兹雷达的有效作用距离。此外,还实施了时间分辨太赫兹光子计数实验,利用回波脉冲计数实现了高精度的距离测量。这项工作为太赫兹频段超灵敏大气探测技术和单光子雷达系统的进步奠定了理论与实践基础。而AI技术的应用将使得太赫兹大气遥感装备更加智能化,使得相关数据融合处理更加便捷化。可见未来量子技术、AI技术、固态太赫兹源以及高光谱成像等技术的创新不仅能够提升现有太赫兹气象遥感应用的表现,还可能开拓新的应用领域,为太赫兹气象遥感技术的进一步发展奠定坚实基础。

3.2 地海空天组网探测

综合研判技术现状,星载、艇载、机载和地基太赫兹气象遥感装备已形成良好发展势头。因

技术前沿、国内产业链发展未成规模等原因,各载台太赫兹遥感装备仍然是独立发展状态。星载观测技术发展较早适用于大尺度空间探测,艇载设备适用于海洋等环境使用,机载载荷机动性好观测灵活,地基遥感未来将可形成规模化组网观测效应。展望未来,综合各载台太赫兹遥感设备优势,形成地海空天组网探测规模、立体和高效特性将极大推进气象遥感科学发展。分立来看可进行子网建设,比如地空组网、地海组网或者星地组网。更为细分来讲可形成太赫兹星网、空网、海网、地网垂直领域观测系统,针对实际需求有规划进行组网联动探测。

3.3 跨波段遥感装备协同观测

太赫兹气象遥感技术相较于其它波段具有独特优势,例如冰云、过冷水识别,但面对多要素、多目标和复杂大气环境监测,该技术难以适应全场景应用。从电磁频谱角度将微波、毫米波、红外和可见光等遥感手段与太赫兹遥感协同作业将高效推进气象遥感立体、全面、集约化、提质创新发展。举例来讲,将118GHz太赫兹辐射计与V波段(50~60GHz)辐射计集成组合应用,将极大提升边界层以及中高空温度廓线探测精度。而且,基于微波技术的天气雷达目前国内已部署近300套,毫米波云雷达也已进行多站点布设,红外高光谱大气探测技术正处于发展高潮,气象探测激光雷达更是处于百家争鸣的研制部署状态。各个波段装备技术应用优势明显,但也存在各自短板。太赫兹气象遥感技术发展起步较晚,当前成熟度不足,有广阔的应用价值和应用空间亟待探索,未来与相对成熟的多波段遥感技术协同作业意义重大,也将是一项长周期可持续的大范围全空间站网工程。

3.4 应用场景开拓与多元产业融合

太赫兹遥感技术可用于探测温湿风廓线、水云、冰云和大气成分等目标。此外,利用太赫兹技术测量沙尘、气溶胶等也有广阔的应用空间。随着太赫兹各类元器件的发展,各种反演技术的提升将显著拓宽太赫兹技术应用场景。新兴科学技术的进步总会带动多个产业的发展,气象领域太赫兹遥感技术的推进也必将同步推进着太赫兹通信、军事应用、安全检查和生物医药检测等产业向前。同一科学在多个领域的应用定存在技术重叠、技术融合,同样太赫兹通信及军事应用的深入也将极大助力太赫兹气象遥感事业的发展。一方面应深耕专业领域突破新型太赫兹气象遥感技术,另一方面进行跨界组合发展同样重要。

4 结 论

太赫兹科学技术正成为气象遥感领域的重要工具,其应用日益广泛,包括星载、机载和地基等多平台的气象应用。文章特别强调了太赫兹辐射计和太赫兹云雷达在气象遥感方面的发展现状,它们分别用于大气参数测量和云结构分析。未来,太赫兹气象遥感技术有望继续推动应用创新,特别是在空间科学、大气物理化学过程以及全球气候变化的研究中发挥关键作用。新技术创新突破、地海空天一体化组网探测、跨波段遥感装备协同工作以及应用场景拓展与多元产业融合将是成为太赫兹气象遥感技术提质发展的新动能,四大方向的进步将有助于提升气象遥感的整体能力,促进科学研究和技术应用的新突破。总之,太赫兹大气遥感技术不仅是现有遥感手段的强有力补充,而且为探索未知的大气目标和气候演化提供了新的视角。

参考文献:

- [1] Yao Jianquan, Wang Jingli, Zhong Ke, et al. Study and outlook of THz radiation atmospheric propagation[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010, 21(10):1582—1588.
- [2] Siegel P. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3):910-928.
- [3] 胡伟东, 季金佳, 刘瑞婷, 等. 太赫兹大气遥感技术[J]. 中国光学, 2017, 10(5):656—665.
Hu Weidong, Ji Jinjia, Liu Ruiting, et al. Terahertz atmospheric remote sensing technology[J]. Chinese Optics, 2017, 10(5): 656—665.
- [4] 胡伟东. 空间太赫兹遥感技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2021:049871.
Hu Weidong. Space terahertz remote sensing technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021:049871.
- [5] 姚崇斌, 徐红新, 赵锋, 等. 微波无源遥感有效载荷现状与发展[J]. 上海航天, 2018, 35(2):1—12.
Yao Chongbin, Xu Hongxin, Zhao Feng, et al. Current status and future development of microwave radiometer[J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(2):1—12.
- [6] 王文伟, 钟海文, 王昊, 等. 星载太赫兹微波辐射计发展现状及应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(9):967—974.
Wang Wenwei, Zhong Haiwen, Wang Hao, et al. Status and application outlook of spaceborne terahertz microwave radiometer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(9):967—974.
- [7] Wang Wei, Dong Jinhe, Meng Yidi. Development and trend of visible light remote sensing camera for Mars exploration[J]. Optics Express, 2014, 7(2):208—221.
- [8] Ying Yibin, Wang Jianping, Jiang Huanyu. Inspecting diameter and defect area of fruit with machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5):216—220.
- [9] Waters J, Read W, Foroidevaux L, et al. The UARS and EOS microwave limb sounder (MLS) experiments[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1998, 56:194—218.
- [10] Urban J, Lautie N, Leflochmoen E, et al. Odin/SMR limb observations of stratospheric trace gases: validation of N₂O[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110:D09301-D09320.
- [11] 龚燃. 美国下一代极轨气象卫星系统及最新发展[J]. 国际太空, 2014(1):19—23.
Gong Ran. The next generation polar-orbiting weather satellite system of the United States and recent developments[J]. International Space, 2014(1):19—23.
- [12] 樊奕茜, 肖芳, 贾朋群. 美国国防气象卫星(DMSP)60年发展回望和换代计划初探[J]. 气象科技进展, 2022, 12(3):2—8.
Fan Yiqian, Xiao Fang, Jia Pengqun. Review on the development and replacement plan of defense meteorological satellite (DMSP) in the past 60 years[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 12(3):2—8.
- [13] Daddio S, Kangas V, Klein U, et al. Microwave imager instrument for MetOp second generation[C]//2014 the 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment. Pasadena, California, USA: IEEE, 2014:236—220.
- [14] Thomas B, Brandt M, Walber A, et al. Submillimetre-wave receiver developments for ICI onboard MetOP-SG and ice cloud remote sensing instruments[C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE, 2012:1278—1281.
- [15] Fox S, Lee C, Moyna B, et al. ISMAR: An airborne submillimetre radiometer[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(2):477—490.
- [16] 王虎, 段崇棣, 吕容川, 等. 星载太赫兹冰云探测技术发展和面临的问题[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(5):722—727.
Wang Hu, Duan Congdi, Lu Rongcuan, et al. Development and problems of space-borne terahertz ice cloud detection technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(5):722—727.
- [17] 王忆峰, 毛京湘. 太赫兹技术的发展现状及应用前景分析[J]. 光电技术应用, 2008, 23(1):1—4.
Wang Yifeng, Mao Jingxiang. Analysis of development status and application prospect of terahertz technology[J]. Application of Opto-electronic Technology, 2008, 23(1):1—4.
- [18] 董平夷. 星载太赫兹-微波辐射计联合反演冰水重叠云参数的研究[D]. 江苏南京:南京信息工程大学, 2024:1—125.
Dong Pingyi. Study on retrieval of ice-water overlapping cloud parameters by spaceborne terahertz microwave radiometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2024:1—125.
- [19] Franklin E, Steven W, Andrew H, et al. Submillimeter-wave cloud ice radiometer: simulations of retrieval algorithm performance[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D3):4028—4048.
- [20] Vanek M, Nolt I, Tappan N, et al. Far-infrared sensor for cirrus (FIRSC): an aircraft-based Fourier transform spectrometer to measure cloud radiance[J]. Applied Optics, 2001, 40(13):2169

- 2176.
- [21] Evans K, Wvong I, Racetie P, et al. Lce cloud retrievals and analysis with the compact scanning submillimeter limaging radiometer and the cloud radar system during CRYSTAL, FACE [J]. American Meteorological Society, 2005, 44: 839—859.
- [22] Wang Wenyu, Xu Jian, Wang Zhenzhan. Feasibility analysis of optimal terahertz (THz) bands for passive limb sounding of middle and upper atmospheric wind[J]. Atmospheric Measurement Technique, 2023, 16: 4137—4153.
- [23] 李雅朦, 胡伟东, 陈实, 等. 毫米波太赫兹波雷达遥感技术研究[J]. 第二届全国太赫兹科学技术学术年会论文集, 2016: 114—116.
- Li Yameng, Hu Weidong, Chen Shi, et al. Research on millimeter wave and terahertz wave radar remote sensing technology [J]. Proceedings of the Second National Academic Annual Meeting on Terahertz Science and Technology, 2016: 114—116.
- [24] 丁霞, 何静, 王平, 等. 太赫兹云雷达的外场试验结果及反演算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(2): 189—194.
- Ding Xia, He Jing, Wang Ping, et al. Field test results and retrieval algorithms for terahertz cloud Radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information, 2019, 17(2): 189—194.
- [25] 丁霞, 黄兴友, 王海涛. 太赫兹频段雷达探测的冰云微物理参数反演算法模拟研究[J]. 热带气象学报, 2019, 35(1): 63—72.
- Ding Xia, Huang Xingyou, Wang Haitao. Simulation studies on retrieval algorithms for microphysical parameters of ice clouds using terahertz band radar[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, 35(1): 63—72.
- [26] 丁霞, 黄兴友, 何静, 等. 220GHz冰云微物理参数反演算法模拟验证研究[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 1080—1088.
- Ding Xia, Huang Xingyou, Hejing, et al. Simulation validation study on retrieval algorithms for microphysical parameters of ice clouds at 220 GHz [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 1080—1088.
- [27] 杨敏, 黄兴友, 闫文辉, 等. 机载 220 GHz 云雷达衰减订正模拟试验[J]. 上海航天, 2020, 37(6): 83—91.
- Yang Min, Huang Xingyou, Yan Wenhui, et al. Simulation experiments on attenuation correction for airborne 220 GHz cloud Radar[J]. Shanghai Aerospace, 2020, 37(6): 83—91.
- [28] 王平, 王海涛. 星载太赫兹主动云雷达探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(5): 738—739.
- Wang Ping, Wang Haitao. Discussion on spaceborne terahertz active cloud Radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information, 2017, 15(5): 738—739.
- [29] 商建, 吴琼, 窦芳丽, 等. 天基太赫兹云雷达需求指标分析与论证[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(1): 125—131.
- Shang Jian, Wu Qiong, Dou Fangli, et al. Requirements index analysis and demonstration of spaceborne terahertz cloud measuring Radar[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2018, 41(1): 125—131.
- [30] 吴琼, 仰美霖, 窦芳丽, 等. 星载双频云雷达的云微物理参数反演算法研究[J]. 气象学报, 2017, 76(1): 160—168.
- Wu Qiong, Yang Meilin, Dou Fangli, et al. Research on retrieval algorithms for microphysical parameters of clouds using spaceborne dual-frequency cloud Radar[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 76(1): 160—168.
- [31] 吴举秀, 杨蕾, 窦芳丽, 等. 星载太赫兹双频云雷达对冰云探测能力研究[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(6): 157—171.
- Wu Juxiu, Yang Lei, Dou Fangli, et al. Study on the ice cloud detection capability of spaceborne dual-frequency terahertz cloud Radar[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(6): 157—171.
- [32] 王彪, 霍熠炜, 郭兴, 等. 220 GHz 卷云非球形冰晶散射特性与冰水含量关系研究[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(5): 850—855.
- Wang Biao, Huo Yiwei, Guo Xing, et al. Relationship between scattering characteristics of 220 GHz cirrus nonspherical ice crystals and ice water content[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(5): 850—855.
- [33] Li Ying, Pan Pan, Feng Jinjun, et al. A 237 GHz traveling wave tube for cloud radar[J]. Electronics, 2023, 12: 2153.
- [34] 王宏强, 罗成高, 邓彬, 等. 太赫兹雷达前沿探测成像技术[J]. 遥控遥测, 2021, 42(4): 1—17.
- Wang Hongqiang, Luo Chengao, Deng Bin, et al. Advanced detection and imaging technologies for terahertz Radar[J]. Remote Control and Telemetry, 2021, 42(4): 1—17.
- [35] 刘康, 武烘萱, 易俊, 等. 单光子计数太赫兹雷达直接探测方法与性能研究[J]. 雷达学报, 2024, 13: 1—13.
- Liu Kang, Wu Hongxuan, Yi Jun, et al. Single photon counting terahertz Radar direct detection methods and performance study[J]. Radar Journal, 2024, 13: 1—13.