

文章编号: 2095-4980(2017)05-0722-06

星载太赫兹冰云探测技术发展和面临的问题

王 虎, 段崇棣, 吕容川, 雷红文, 朱忠博, 陈 刚

(中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 冰云位于上对流层, 在全球表面覆盖率达30%, 在地球大气系统中发挥了重要作用。但由于一些技术因素限制, 目前并没有进行足够的观测。太赫兹波波长接近冰云中典型的冰晶粒子尺寸, 星载太赫兹辐射探测仪观测冰云具有独特的优势, 目前得到了极大关注。基于国内外相关研究, 首先阐述了冰云探测的重要性及已有卫星探测手段的不足之处, 然后介绍了太赫兹冰云探测技术国内外发展情况, 在此基础上分析和讨论了我国太赫兹冰云探测技术发展将面临的问题, 为未来技术发展提供参考。

关键词: 冰云; 卷云; 太赫兹辐射计; 亚毫米波辐射计

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0722

Development of space borne Terahertz ice clouds measurement technology and existing technical problems

WANG Hu, DUAN Chongdi, LYU Rongchuan, LEI Hongwen, ZHU Zhongbo, CHEN Gang

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: The ice clouds locate in the upper troposphere and regularly cover about 30% of the globe. They play an important role in the earth atmosphere system but are poorly measured currently due to some technological reasons. With wavelengths in the order of the size of typical ice cloud particles and therefore being sensitive to ice clouds, the terahertz region presents a unique window for the observation of ice clouds, thus space borne terahertz ice clouds measurement technology has drawn special attentions. In this paper, the roles of the ice clouds in the earth atmosphere system are illustrated and the disadvantages of current potential satellite measurements are summarized firstly; then the development of the terahertz ice clouds measurement technology is introduced; based on these, some technical problems for further development are finally analyzed and discussed.

Keywords: ice clouds; cirrus clouds; Terahertz radiometer; sub-millimeter radiometer

冰云高度为 6~15 km, 是对流层上层中全部由冰晶组成的云。国际卫星云-气候计划的研究表明, 对流层上层的冰云在全球的覆盖率高达 30%, 作为该层大气的重要组成部分, 对地球大气水循环和能量循环等有着重要影响。对冰云的有效探测将极大地促进全球和局部气候研究, 提升数值天气预报精确度, 并为极端天气预警、人工影响天气和航空气象等方面应用服务^[1-5]。

国内外发展了多种冰云探测方法, 应用较多的是地基激光测云雷达系统, 初步提供了特定地区的冰云云高、云厚和多层结构等信息, 但不具备厚冰云的探测和全球覆盖能力^[2]。星载探测系统具有较强的覆盖能力, 当前微波辐射计、毫米波和亚毫米波临边探测仪、红外和可见光遥感成像仪以及激光雷达等具有一定的冰云探测能力, 但都有各自缺点, 不能很好地满足冰晶尺寸全部敏感、高空间分辨力和全球覆盖等需求^[4]。由于太赫兹波波长和冰云冰晶尺寸相近, 正在发展的太赫兹冰云探测技术利用太赫兹频段冰云的高敏感性, 可以很好地解决目前的冰云探测难题, 值得借鉴和发展^[1,5]。

1 冰云重要性和现有冰云探测手段

冰云位于对流层上层,其上方为大气稀薄的平流层,而下方则是活动比较频繁的对流层中下层。所处高度决定了它在地球能量循环和水文循环中的重要作用。首先,冰云吸收和反射地表和对流层中下层大气的长波辐射,这个效应会使地-气系统逐渐变暖;其次,它直接反射太阳的短波辐射,又具有制冷的效果,见图1,这使得冰云能够在一定程度上影响地球的能量循环。另外,冰云通过释放潜在的热量存在热效应,通过一系列机制在时间和空间尺度上影响大气的状态,对极端天气过程具有重要影响。在水文循环方面,对流层中下层水汽上升并凝结形成冰云,而冰云中冰晶的进一步凝结、降落又会

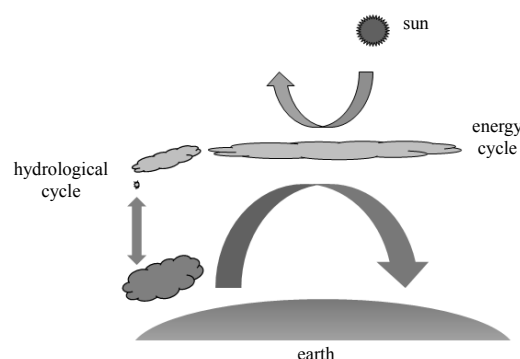


Fig.1 Diagram of the roles of the ice clouds in the earth's atmosphere radiant energy budget and hydrological cycle

图1 冰云在地球大气能量和水文循环中的作用示意图

形成降水,这使得上对流层敏感区域的水汽收支很大程度上受云冰总量和垂直分布的影响,因此获取全球高时间和空间分辨力的冰云参数,包括冰云构成、粒子尺寸、形状和分布等,有助于完善云的辐射传输模型,对数值天气预报、气候研究以及极端天气预警等具有重要促进作用^[1,4-5]。冰云中冰晶粒子尺寸主要集中在 $20\sim 600\mu\text{m}$ ^[1],根据电磁波与冰晶粒子的散射特性研究,波长越接近冰晶尺寸,散射效应越强,探测越敏感。因此,微波和毫米波频段的探测仪器只对冰云中的大尺寸冰晶敏感,而红外和可见光频段的探测仪器只对冰云中的小尺寸冰晶敏感,若要覆盖冰云的全部冰晶尺寸,则需要采用处于它们中间的太赫兹频段(亚毫米波频段)的探测仪器。

国内外在轨应用且具备一定冰云观测能力的卫星载荷系统主要有3类,分别是微波辐射遥感载荷系统、雷达载荷系统和光学遥感载荷系统^[4]。

微波辐射遥感载荷系统主要有美国国家大气和海洋局(The National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和欧盟“气象业务”(Meteorological Operational, MetOp)系列卫星上的AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit)、MHS(Microwave Humidity Sounder)、中国风云系列卫星上的MWHS(Microwave Humidity Sounder)和AMAS(Advanced Microwave Atmospheric Sounder)等微波辐射计,它们的探测频率一般低于 200GHz ,只对 $200\mu\text{m}$ 以上的冰晶敏感,冰云探测能力极其有限。美国的EOS/MLS(Earth Observing System/Microwave Limb Sounder)等微波临边探测辐射计,采用频点虽高,但由于遥感体制,水平分辨率很低(百公里)^[6],不能满足未来区域气候和数值天气预报等冰云探测信息需求。

微波测云雷达主要有美国云卫星CloudSat上的云廓线雷达(Cloud Profiling Radar, CPR)等,它在云层垂直结构的探测方面具有独特优势,但探测频点较低(低于 94GHz ,波长约为 $3200\mu\text{m}$),同微波温湿度计一样,仅对冰云中的大尺寸冰晶敏感。激光测云雷达,如CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)等,同样能够探测云层垂直结构,并具有较强的云顶高度探测能力,但它一般采用 532nm 和 1064nm 等频点,波长较短,只能探测 $50\mu\text{m}$ 以下冰晶,而且不能穿透较厚的云层。另外,由于雷达信号重复频率、发射功率和探测灵敏度等限制,雷达载荷系统一般难以实现高水平分辨率、宽刈幅的扫描成像^[7-8]。

光学遥感载荷系统探测频段为红外和可见光,典型的有AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)和MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)等^[4],波长一般低于 $20\mu\text{m}$,同激光雷达相似,只对 $50\mu\text{m}$ 以下冰晶敏感,云层穿透能力也差,只能获取薄云或云顶小尺寸冰晶参数信息。

总结已有探测手段,一方面需要采用微波和红外之间的频段(即太赫兹频段)来弥补 $50\sim 500\mu\text{m}$ 尺寸的冰云探测间隙,另一方面需要采取与临边探测和雷达不同的探测手段,获得高的水平分辨率,太赫兹冰云探测技术应运而生。

2 太赫兹冰云探测技术发展

自1976年始,LIU等相继论证和报道了云(包括卷云等冰云)对地球水循环和辐射能量循环的重要影响,并提出气候和天气过程研究对云的冰水路径参数的需求^[2]。基于冰云中冰晶尺寸和电磁波散射特性,1995年EVANS等研究和首次提出采用毫米波太赫兹频段探测冰云的设想^[9]。认识到冰云参数探测重要性和太赫兹频段用于冰云探测的优势,欧美日等国家和地区陆续开展了机载和星载太赫兹冰云探测的研究。如美国早在20世纪末就开发了远红外冰云探测仪(Far InfraRed Sensor for Cirrus, FIRSC,实际探测频段处于太赫兹频段),并开展了一系列机

载实验,论证了采用太赫兹频段进行冰云探测的有效性^[10]。2002年,苗俊刚等提出了星载太赫兹冰云探测仪方案(Cloud Ice Water Submillimeter Imaging Radiometer, CIWSIR)^[5,11],其后,多个专门针对冰云探测的星载太赫兹冰云探测方案陆续被提出^[1,12]。基于这些设计方案和相关研究,美国 and 欧盟陆续立项开展了机载冰云探测仪(Compact Scanning Submillimeterwave Imaging Radiometer, CoSSIR)^[13-14]、ISMAR(International SubMillimeter Airborne Radiometer)^[15]和星载太赫兹冰云成像仪(Ice Cloud Imager, ICI)的研制和试验工作^[16]。日本也密切关注太赫兹冰云探测技术,设计了双通道的系统^[17]。此外,由于近几年小卫星技术的蓬勃发展,搭载于小卫星上的太赫兹冰云探测仪也受到了密切关注,已经出现了多款系统设计方案,如冰立方(Ice-Cube)等,其轻小型化、廉价性和高时空分辨力等颠覆了传统卫星载荷的设计概念^[18-19]。

1) FIRSC

FIRSC 是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和几所高校于1998年前后联合研制的太赫兹频段傅里叶变换光谱系统,目的是用来探测高层的卷云中冰水路径、冰粒子尺寸和极化等^[10]。它有2个通道,覆盖频谱范围为 $10\sim 140\text{ cm}^{-1}$ (频率范围为 $0.3\sim 4.2\text{ THz}$)。低频通道从 $10\sim 70\text{ cm}^{-1}$,采用 0.3 K 低温冷却的测辐射热探测器;高频通道从 80 cm^{-1} 到 140 cm^{-1} ,采用 4.2 K 低温冷却的Ge:Ga光探测器。该系统光谱分辨力为 0.1 cm^{-1} ,足迹小于 1 km , 30 cm^{-1} 频段扫描的单通道NE ΔT 约为 1 K 。1999年,FIRSC进行了一系列机载实验,结果充分证明冰云的冰水路径、尺寸和极化在太赫兹频段具有很强的光谱敏感性。由于FIRSC采用超低温探测器,该系统并不适用于星载应用,但该系统最早证实了理论结果,为后续太赫兹冰云探测系统的推出奠定了实验基础。

2) CoSSIR

CoSSIR 是 NASA 研制的机载紧凑型太赫兹全功率成像辐射计,专门用于开展冰云冰晶粒子尺度和冰水路径等实验研究,工作频率选取了 183 GHz 、 220 GHz 、 380 GHz 、 487 GHz 、 664 GHz 和 874 GHz ,各频段的接收机均采用基于肖特基二极管的超外差混频探测方式。2002年7月,CoSSIR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飞行器开展了一系列实验,成功获取了 183 GHz 、 220 GHz 和 640 GHz 通道的数据,而 380 GHz 和 487 GHz 2个频率的通道失败^[13]。2006年对通道进行改进后由NASA的WB-57飞机挂飞开展CR-AVE(Costa Rica Aura Validation Experiment)实验。2007年增加了 874 GHz ,在CT4(Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling)中与云雷达系统一起挂载在NASA的ER-2飞行器上开展了对比验证性实验。结果表明,CoSSIR和 94 GHz 的云雷达系统得到的数据具有很好的相关性,而且CoSSIR在反演冰水路径和冰晶尺寸以及展现冰云水平结构方面具有明显优势^[14]。

3) ISMAR

见图2,ISMAR是英国气象局和欧空局(European Space Agency, ESA)联合研制的一款机载太赫兹冰云探测仪^[15],目的是验证已有的一些任务设想,并为星载太赫兹冰云探测仪提供机载实验验证。ISMAR的探测频点设置在 118 GHz 、 243 GHz (V&H极化)、 325 GHz 、 424 GHz 、 448 GHz 、 664 GHz (V&H)和 874 GHz (V&H),其中 874 GHz 是正在发展的频点,所有频点都采用基于肖特基二极管的超外差探测方式。该仪器大小大约为 $1.1\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times 0.5\text{ m}$,质量约为 90 kg ,计划在2015年4月开展机载实验,目前还没有详细的实验结果报道。

4) ICI

ICI 载荷提案于2012年在欧洲气象卫星组织委员会审议通过,2013年获得了ESA的最终采用决定,未来将作为欧洲气象卫星组织下一代气象业务卫星MetOp-SG的主载荷,于2022年发射并应用。该载荷覆盖 $183\sim 664\text{ GHz}$ 范围内5个太赫兹探测频点,其中 243 GHz 和 664 GHz 采用双极化探测通道,13个通道参数和功能见表1^[16]。

ICI由包含主反射面天线、馈源组件和接收电子器件的旋转部分和包含热定标体、冷空反射镜和控制电子设备的固定部分组成。天线采用单副偏置反射面,组合馈源包含7个喇叭,2排布局。圆锥扫描天顶角为 $53^\circ\pm 2^\circ$,方位扫描角度为 $\pm 65^\circ$,匀速扫描,转速为 45 r/min ,冷热定标体分别位于 135° 和 150° 视角,足迹为 15 km ,可见具有很高的水平分辨力。

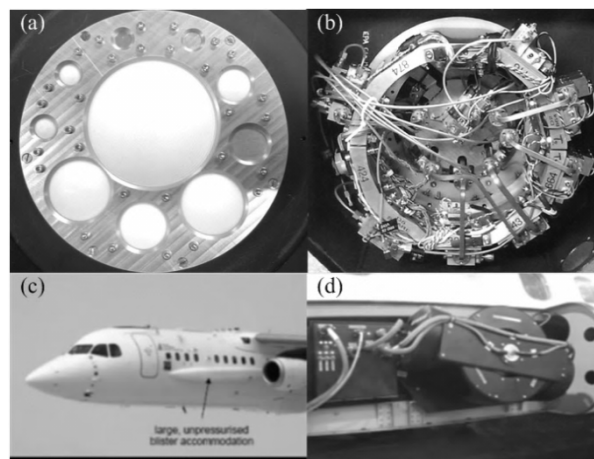


Fig.2 (a) front and (b) rear view of the ISMAR front-end assembly, (c) location of the radiometer blister on the aircraft, (d) ISMAR instrument installed in the blister with the cover removed

图2 ISMAR接收装置(a)前和(b)后视图, (c)机载载荷放置位置和(d)打开外壳下的ISMAR安装图片

表 1 ICI 通道参数和探测目标
Table1 Channel parameters and targets of ICI

channel	f/GHz	band/MHz	NEAT/K	accuracy/K	simplified utilization
1	183.31±7.00	2 000	0.6	1.1	water vapor profile and snowfall
2	183.31±3.40	1 000	0.7	1.1	
3	183.31±2.00	500	0.7	1.1	
4/5	243.2±2.5(H/V)	3 000	0.6	1.5	quasi-window, cloud ice retrieval, cirrus clouds
6	325.15±9.50	3 000	1.1	1.5	cloud ice effective radius
7	325.15±3.50	2 400	1.2	1.5	
8	325.15±1.50	1 600	1.4	1.5	
9	448.0±7.2	3 000	1.3	1.5	cloud ice water path and cirrus
10	448.0±3.0	2 000	1.5	1.5	
11	448.0±1.4	1 200	1.9	1.5	
12/13	664.0±4.2(H/V)	5 000	1.5	1.5	cirrus clouds,cloud ice water path

ICI 将是第 1 个专门用于冰云探测的卫星有效载荷系统，将提供全球冰云信息，包含高精确度的冰水路径分布、冰云平均海拔、冰晶极化和等效半径分布等重要的探测要素，大大提升气候和数值天气预报等研究和应用水平，具有重大意义。

5) 小卫星搭载太赫兹冰云探测仪

IceCube 是 NASA 设计的一款小卫星搭载的太赫兹冰云探测仪。仅采用冰云小冰晶最敏感的 874 GHz 一个探测频点，体积、质量大大减小，非常容易形成微纳型的立方体卫星。Ice-Cube 的概念图和所采用的 874 GHz 频段探测模块分别见图 3 和图 4^[18]。

基于 ICI，ESA 设计了可用于小卫星搭载的太赫兹冰云探测仪^[19]。该仪器相比 ICI 增设 157 GHz 和 874 GHz 2 个通道。其中增设 157 GHz 是为了提升大气窗口频段 Stoke 参数的精确测量，而增设 874 GHz 通道是为了拉近太赫兹低频段和远红外的频率差距。另外一个不同点是，为了实现所有通道的双极化探测能力，该仪器采用卡塞格伦天线作为主反射面，但是又会面临高频段天线过大的问题，因此将 664 GHz(包含)以上和以下频段的通道分开。该方案设计通道多，每个通道都采用双极化探测方式，搭载于多颗小卫星上，可以实现优于 ICI 的探测结果和更高的时空分辨力。

经过近 20 年的原理研究、系统论证、系统研制和机载实验验证等，国外太赫兹冰云探测仪技术的发展已接近成熟。一系列研究和实验结果充分证明了冰云探测的必要性和太赫兹波在探测冰云方面的优越性。未来国外将紧紧围绕其机载验证样机 ISMAR 的实验和分析以及 ICI 的研制，并注重太赫兹冰云探测系统和其他云探测系统的验证对比和联合反演应用。另外，小型化太赫兹冰云探测载荷研究和小卫星搭载应用也将是重要发展方向。

而国内太赫兹冰云探测技术才开始获得用户的重视，将更多地借鉴国外发展经验和技术，首先研制相应仪器和系统，形成我国的冰云探测能力，然后将更深入地研究反演技术，充分利用系统的探测结果。未来，不排除也会大力发展轻小型化系统，以获取快速响应和高空时分辨力的冰云探测能力。

3 面临问题和技术突破

太赫兹冰云探测技术采用的频率较高，毫无疑问，相关研究将极大地推进我国太赫兹器件和技术的发展，从另外一个角度来看，发展所面临的问题也是非常突出的，亟需突破太赫兹冰云探测系统设计、正反演、天线、接收和定标等关键技术。

1) 星载太赫兹冰云探测方案和系统设计

利用太赫兹频段进行冰云探测是国外气象研究的前沿技术，国内虽然也在研究 425 GHz 以下辐射计和 220 GHz 的太赫兹测云雷达系统^[20]，并开展有关冰晶参数探测的设计和理论仿真研究，但频点设置、通道设计 and 应用都不是专门针对冰云探测，因此需要根据我国气象卫星微波探测仪、微波和激光雷达等载荷规划进行设计。目前国外已出现多个类型的系统方案，分别可作为气象卫星主载荷、小卫星甚至是微纳卫星载荷。我国应该充分考虑这几类载

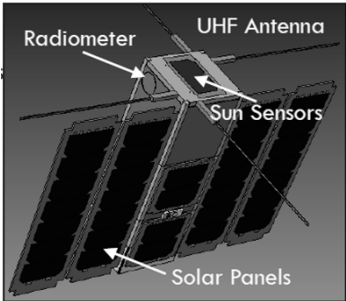


Fig.3 Schematic of the IceCube^[18]
图 3 IceCube 概念图^[18]

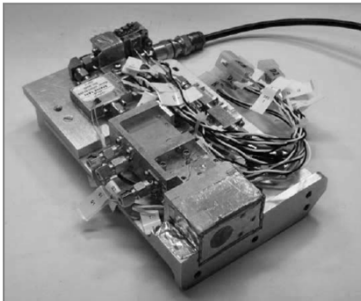


Fig. 4 Photo of the 874 GHz receiver^[18]
图 4 874 GHz 通道模块^[18]

荷的优缺点,根据探测通道设置、时空分辨力和覆盖等需求合理设计,发展与我国大气探测体系相适应的载荷系统。

2) 太赫兹冰云探测正反演技术

太赫兹冰云探测反演技术联接探测信号和冰云参数之间关系,是探测仪设计、研制和应用中不可缺少的技术环节。在给定大气状态下,采用正演技术可对冰云探测仪观测的辐射亮度值进行估算,以便对比修正理论或系统配置,是太赫兹冰云探测仪系统设计和指标论证的基础。在探测仪完成探测后,通过反演技术可以提取冰云重要参数信息。由于冰云参数反演需要采用大量先验知识,使其必须以正演研究作为基础。冰云中冰晶形状复杂多样,太赫兹辐射传输和散射过程复杂,因此,未来需要通过模拟冰云分布并研究辐射传输和散射特性,借鉴国外研究经验,继承已有辐射探测反演基础,形成完整的冰云探测正演和反演产品,为实验和未来星载应用提供支撑。

3) 太赫兹高面形精确度反射面天线技术

太赫兹冰云探测技术涉及的频点高达 874 GHz,远高于国内目前在轨(183 GHz)和在研(425 GHz)的星载太赫兹应用系统所使用的频点,这对天线的形面精确度和热形变等关键指标提出了新的要求。为此,天线系统需要采用方向性系数较高的天线设计方案,通过提升反射面加工成型技术的精确度和采用热变形量小的材料来满足星载应用要求。另外,需要健全和完善反射面天线测试技术,进一步提高覆盖频率和测试效率,保障所研制的反射面天线的性能。

4) 高频段高灵敏度太赫兹接收技术

近年来,我国太赫兹器件技术快速发展,已经形成了几个较为典型的太赫兹应用系统^[21-22]。但相比国外来说,接收机的性能差距仍然很大,关键症结在于所研制的混频和本振模块在指标上存在较大差距。特别是太赫兹冰云探测技术,需求的探测频率高达 874 GHz,探测灵敏度要求也高,混频和本振模块的研制是遏制技术发展的主要瓶颈。这需要国内相关器件研制单位在已有的技术基础上通过对设计方案和工艺的突破或对外合作等方式加快提升器件和模块的设计、加工和测试水平,以满足研究和应用要求。

5) 宽频覆盖的太赫兹定标技术

太赫兹冰云探测仪一般采用全功率型辐射计方式,利用周期定标消除系统长期工作带来的慢飘移所引起的误差。定标源和后续数据处理与分析关系到探测仪测试数据的有效性和真实性。要满足太赫兹冰云探测技术的定标要求,定标源最低应覆盖到 700 GHz。如果考虑更高频点,如 874 GHz,则需将定标源的覆盖频率提升到 900 GHz。考虑到探测仪最低频点可能为 183 GHz,甚至 118 GHz,如此宽的频谱覆盖显然对定标源中的吸收体设计和研制提出了很高的要求,需要提前进行技术布局和研究。

4 结论

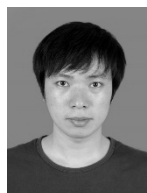
上对流层冰云的观测对提升气候研究水平和数值天气预报精确度等有重大意义。由于太赫兹波波长与冰云尺寸相近,通过探测太赫兹波辐射来获取冰云参数信息已被认为是最佳途径。国外对太赫兹冰云探测技术进行了深入研究,并将作为气象卫星的主载荷进行发射应用。我国存在着同样的冰云探测需求,但在载荷系统研制方面将面临一系列难题,如针对冰云的太赫兹辐射探测载荷系统设计和正反演技术、高频段的太赫兹反射面天线、接收和定标技术等,未来需要提前进行技术布局,深入研究,各个突破。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] LIU R J, ZHANG L, WANG H B, et al. Cirrus cloud measurement using lidar over semi-arid areas[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(5): 863-870.
- [3] LIOU K N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: a global perspective[J]. Monthly Weather Review, 1986, 114(6): 1167-1199.
- [4] WALISER D E, LI J F, WOODS C P. Cloud ice: a climate model challenge with signs and expectations of progress[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(D00A21): 1-27.
- [5] MIAO J, ROSE T, KUNZI K, et al. A future millimeter/sub-millimeter radiometer for satellite observation of ice clouds[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 23(8): 1159-1170.
- [6] WU D, JIANG J, DAVIS C. EOS MLS cloud ice measurements and cloudy-sky radiative transfer model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(5): 1156-1165.

- [7] IM E,DURDEN S L,TANELLI S. CloudSat:the cloud profiling radar mission[C]// 2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai,China:[s.n.], 2006:1-5.
- [8] WINKER D M,PELON J,McCORMICK M P. The CALIPSO mission:spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds[J]. Proceedings of SPIE, 2003,4893:1-11.
- [9] EVANS K F,STEPHENS G L. Microwave radiative transfer through clouds composed of realistically shaped ice crystals. Part I:single scattering properties[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1995,52(11):2041-2057.
- [10] NOLTI G,VANEK M D,TAPPAN N D,et al. Far infrared measurements of cirrus[C]// Remote Sensing of Clouds and Atmosphere. Firenze,Italy:[s.n.], 1999:28-38.
- [11] 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]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions,European Geosciences Union, 2002,2(5):1403-1427.
- [12] DEFER E,JIMENEZ C,PRIGENT C. Sub-millimetre wave radiometry for cloud and rain characterization: from simulation to earth observation mission concept[J]. Comptes Rendus Physique, 2012,13(1):54-61.
- [13] 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(6): 839-859.
- [14] 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(2):2277-2306.
- [15] FOX S,LEE C,RULE I,et al. ISMAR:a new submillimeter airborne radiometer[C]// 2014 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment(MicroRad). Pasadena,CA:[s.n.], 2014:128-132.
- [16] KANGAS V,D'ADDIO S,KLEIN U,et al. Ice cloud imager instrument for MetOp Second Generation[C]// 2014 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment(MicroRad). Pasadena,CA:[s.n.], 2014:228-231.
- [17] MENDROK J,KASAI Y,WU D L,et al. Sub-millimeter wave radiometer for observation of cloud ice: a proposal for Japanese mission[C]// Proceedings of SPIE,Sensors,Systems,and Next-Generation Satellites XIII. Berlin,Germany:[s.n.], 2009:7474.
- [18] ESPER J,WU D,PIEPMEIER J,et al. Ice-cube:spaceflight validation of an 874 GHz sub-millimeter wave radiometer for ice cloud remote sensing[C]// 10th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation. Berlin,Germany:[s.n.], 2015.
- [19] GOUTOULE J M,SANSON D,CRESCENCE P,et al. Ice cloud imager with polarimetric capabilities[C]// 2014 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment(MicroRad). Pasadena,CA:[s.n.], 2014:136-138.
- [20] 边明明,王世涛,胡伟东,等. 星载太赫兹雷达测云散射特性及辐射源分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(5): 712-717. (BIAN M M,WANG S T,HU W D,et al. Radiation source and scattering characteristics analysis of space-borne terahertz cloud radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(5):712-717.)
- [21] 张健,邓贤进,王成,等. 太赫兹高速无线通信:体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):1-13. (ZHANG J,DENG X J,WANG C,et al. Terahertz high speed wireless communications: systems,techniques and demonstrations[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):1-13.)
- [22] 成彬彬,江舸,陈鹏,等. 0.67 THz 高分辨力成像雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):7-11. (CHENG B B,JIANG G,CHEN P,et al. 0.67 THz high resolution imaging radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):7-11.)

作者简介:



王 虎(1986-),男,江苏省连云港市人,博士,工程师,主要从事空间太赫兹应用技术研究,目前已在 Optics Letter 和 Optics Express 等国内外相关期刊上发表了多篇学术论文, email:nwuw@126.com.

雷红文(1985-),男,湖北省随州市人,博士,工程师,主要从事空间微波、亚毫米波、太赫兹技术研究.

朱忠博(1980-),男,山东省德州市人,硕士,高级工程师,主要从事太赫兹通信技术应用基础研究.

段崇棣(1972-),男,西安市人,硕士,研究员,主要从事空间微波遥感技术研究.

吕容川(1983-),女,山西省吕梁市人,硕士,高级工程师,主要从事星载微波辐射计系统设计与应用技术研究.

陈 刚(1980-),男,江苏省宿迁市人,博士,工程师,主要从事空间太赫兹雷达系统、成像和目标特性技术研究.