

文章编号: 2095-4980(2015)05-0712-06

## 星载太赫兹雷达测云散射特性及辐射源分析

边明明<sup>1</sup>, 王世涛<sup>1</sup>, 胡伟东<sup>2</sup>, 麻丽香<sup>1</sup>, 刘 帅<sup>1</sup>, 安大伟<sup>3</sup>

(1.中国空间技术研究院, 北京 100094; 2.北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081; 3.国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘 要:** 阐述云对气候变化的重要影响, 介绍云测量的常用遥感手段, 分析太赫兹波段大气吸收谱线以及云粒子对太赫兹波的散射特性。在此基础上结合太赫兹波自身所具有的特点, 通过与传统云探测技术手段进行对比, 分析星载太赫兹雷达测云的优势。最后给出星载太赫兹测云雷达的辐射源可行性分析。

**关键词:** 星载太赫兹雷达; 测云; 散射特性; 应用价值

**中图分类号:** TN959.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201505.0712

## Radiation source and scattering characteristics analysis of space-borne terahertz cloud radar

BIAN Mingming<sup>1</sup>, WANG Shitao<sup>1</sup>, HU Weidong<sup>2</sup>, MA Lixiang<sup>1</sup>, LIU Shuai<sup>1</sup>, AN Dawei<sup>3</sup>

(1.China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 2.School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3.National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The important influence of cloud on climate change, and the common remote sensing method of cloud measurement are introduced, then the absorption spectra of THz wave and the scattering characteristics of cloud particles are studied. By comparing with the traditional cloud detection technology, the advantages of space-borne terahertz cloud radar are analyzed. Finally, the feasibility analysis of the radiation source for space-borne terahertz cloud radar is presented.

**Key words:** space-borne THz radar; cloud measurement; scattering characteristics; application value

太赫兹(Terahertz, THz)波是介于微波和红外辐射的电磁波, 太赫兹技术已在航天领域展示了其巨大的应用前景。云是全球气候模型中最重要的也是最难确定的气象要素之一, 它对地球能量平衡、气候变化以及天气演变具有重要的影响。云通过影响太阳短波辐射和地球长波辐射, 来控制地球能量的收支。云的分布、特性及其演化运动过程的监测对于研究全球气候变化、天气预报等具有非常重要的作用<sup>[1-2]</sup>。毫米波测云雷达是一种测云的有效手段, 它可以连续观测云从而获得具有重要意义参数, 这些参数包括宏观上的云厚、云高、云层数, 微观上云粒子的大小、滴谱分布、冰水含量等。相对于红外辐射计、激光雷达和厘米波雷达, 毫米波雷达可以穿过多层云, 因为毫米波接近云粒子的尺度, 它利用云粒子对电磁波的散射特性, 通过对云的雷达回波来分析云的宏微观特性。对云粒子具有更灵敏的探测精确度, 具有穿透云的能力, 能描述云内部物理结构, 并且可以连续监测云的垂直剖面变化<sup>[3]</sup>。国际上依托各种类型星载雷达对云结构进行了三维成像探测, 如美国 CloudSat 云雷达提供了深对流核的冰云结构, CALIPSO 激光雷达提供了大量对流层顶的薄冰云信息。近年来, 随着太赫兹源技术的不断发展, 太赫兹成像技术在地球环境监测等应用中具有潜在而重要的科学与应用价值, 引起了相关学者的兴趣。如, 1988 年 Robert E McInTosh 和 James B Mead 等人开发了 215 GHz 雷达系统, 并开展了垂直向上观测云和雾的地面试验, 给出了观测的云和垂直廓线图<sup>[4]</sup>。国内, 钱学森空间技术实验室王世涛、边明明等人在民用航天经费的支持下首次对太赫兹雷达测云进行了详细论证, 并开展了太赫兹测云雷达原理样机总体方案详细设计和研制工作, 预计 2015 年可以获得太赫兹雷达测云的第一手宝贵数据资料。由于太赫兹波与云的相互作用机理对设计太赫兹雷达具有重要的理论指导作用, 因此本文主要研究云粒子对太赫兹波的吸收作用, 并对太赫兹波段的云粒子散射特性进行深入分析, 进而总结星载太赫兹雷达测云的优点, 给出星载太赫兹雷达测云的应用价值。

收稿日期: 2014-11-04; 修回日期: 2015-01-06

基金项目: “十二五”民用航天资助项目

### 1 大气吸收谱线及云散射特性分析

#### 1.1 太赫兹大气吸收谱线

太赫兹(Terahertz, THz)波是介于微波和红外辐射的电磁波,典型频率范围为 0.1 THz~10 THz(波长 3 mm~30 μm)。见图 1,在太赫兹低端的大气窗口处(35 GHz,94 GHz,140 GHz,225 GHz 和 350 GHz 等),衰减相对较小,每公里的单程衰减约为 5 dB~6 dB,且随着海拔高度的增加,大气中水分含量迅速降低,太赫兹波段的大气衰减也快速下降,如太赫兹低端的电磁波,在海拔 0.1 km 处,太赫兹波段的衰减系数为 4.80 dB/km;在 7 km 的高空,太赫兹波段的衰减系数降为 0.06 dB/km;在 7 km 以上的高空,大气对太赫兹频段电磁波衰减更小,可以忽略不计。

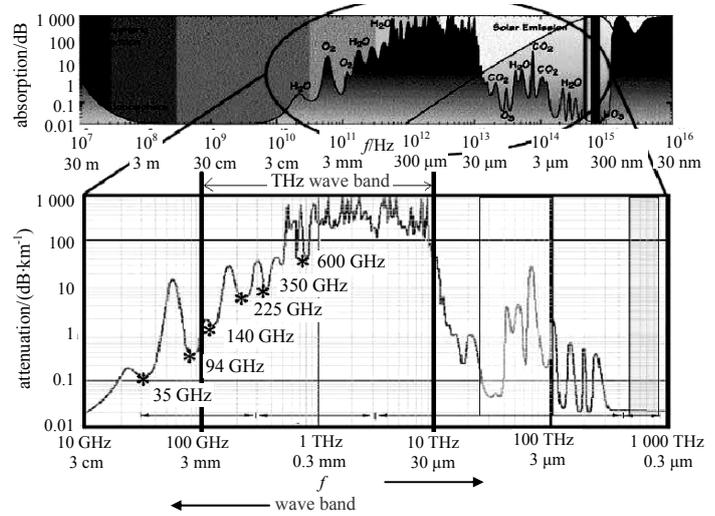


Fig.1 Atmospheric absorption spectrum of Terahertz band

图 1 太赫兹频段大气吸收线

#### 1.2 单次散射特性分析

大气中粒子按照其形状和尺度,大致分为 3 种类型<sup>[5]</sup>: a) 小粒子:粒子远远小于波长,如大气气体分子,该类粒子散射问题可以用瑞利(Rayleigh)近似理论进行分析,其散射呈对称分布,前向散射与后向散射趋于相等。b) 球形大粒子:粒子与波长相当或远大于波长的球形粒子,如雨滴粒子。该类粒子散射问题可用经典的 Mie 散射理论(米氏散射)来处理。c) 非球形大粒子:粒子形状为规则或不规则非球形,尺度等于或大于入射波长,如卷云云滴粒子。该类粒子散射问题需要用非球形粒子散射理论来处理。

对于小粒子和球形粒子的散射研究已比较完整,而对于非球形粒子还没有一种方法可以求解任意形状、任意尺寸的非球形粒子散射特性。实际应用中,只能根据粒子的实际特征来选取适合该类粒子的计算方法,主要包括几何光学法、时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法、离散偶极子近似(Discrete Dipole Approximation, DDA)方法、T(Transition)矩阵方法以及等效球方法的米氏散射理论等<sup>[5-7]</sup>。

1) 云粒子模型:朱士超、郭学良等人在 2009 年 4 月~5 月期间对张家口地区某锋面系统进行了观测,云中主要含有柱状、板状和辐枝状的冰粒子,且大部分粒子直径小于 1 000 μm。在云层外部主要为柱状和板状冰晶,随着不断深入云层内部,发现了更多的辐枝状冰晶<sup>[8]</sup>。针对朱、郭等人的观测结果,本文建立柱状、板状以及辐枝状粒子的模型,并对其散射特性进行仿真,柱状冰晶和板状冰晶为六棱柱,底面六边形对角线  $d$  与柱高  $L$  比值分别为  $d/L=4$  和  $d/L=1/5$ ,最大尺度为 1 000 μm。粒子模型见图 2。

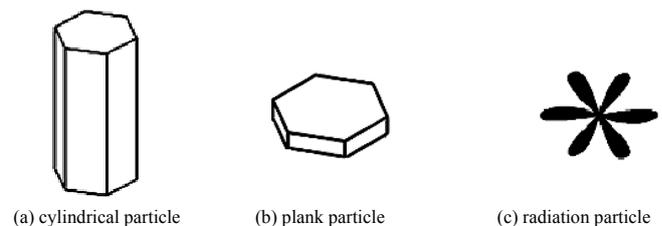


Fig.2 Diagram of particle model

图 2 粒子模型示意图

2) 不同雷达频率对冰粒散射特性的影响:对这 3 种粒子(柱状、板状和辐枝状,最大尺度 1 000 μm)在-10 °C 的环境温度,35.6 GHz,94 GHz,220 GHz 和 340 GHz 几个频段的雷达波照射下进行仿真。当雷达频率较高时,其波长与粒子尺度可比拟,冰粒子不能近似为球形,米氏散射的计算本质是由麦克斯韦方程推导出来的均质球形粒子在电磁场中对平面波散射的精确解,因而不能使用米氏散射理论计算,而需使用 DDA 法、T 矩阵法或 FDTD 法等计算方法。本文采用 DDA 法对这 3 种粒子的散射特性进行仿真,得到的散射相位函数、吸收截面与后向散射截面仿真结果分别见图 3 和图 4。

根据图 3 仿真结果可知,当雷达工作频率相对较低时(如 35.6 GHz),此时不规则的冰晶粒子尺度远小于雷达波长,因此云粒子可以近似看作球形粒子,其前后对称的散射相位函数也符合瑞利散射的情况,故对其散射特性的计算也可参照瑞利散射的情形进行。当雷达工作频率逐渐升高时,其散射相位函数随着散射角压缩,形状“高而瘦”,从而具有更好的方向性。从图 4 各仿真结果中可看出,随着雷达工作频率的提升,云粒子对雷达波的后向散射能力逐渐增强,340 GHz 下的后向散射截面约为 220 GHz 下的 2.5 倍,220 GHz 下的后向散射截面约为 94 GHz 下的 2~8 倍。在到达目标粒子处功率密度相同的情况下,提升工作频率也将拥有更窄的波束,其能量更集中,因而提升雷达工作频率将有可能探测到更加微弱的目标,从而揭示微粒子的内部剖面结构特征。

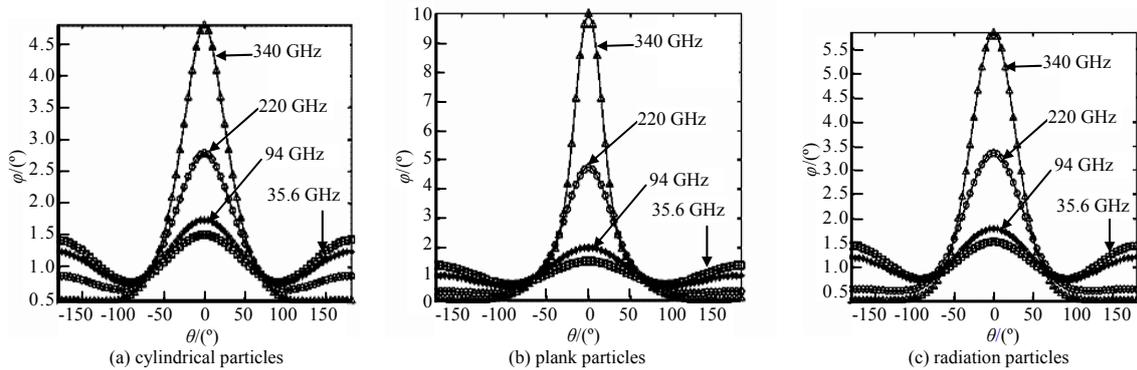


Fig.3 Scattering phase functions of three kinds of cloud particles in different frequency bands

图 3 三种云粒子在不同频段下的散射相位函数

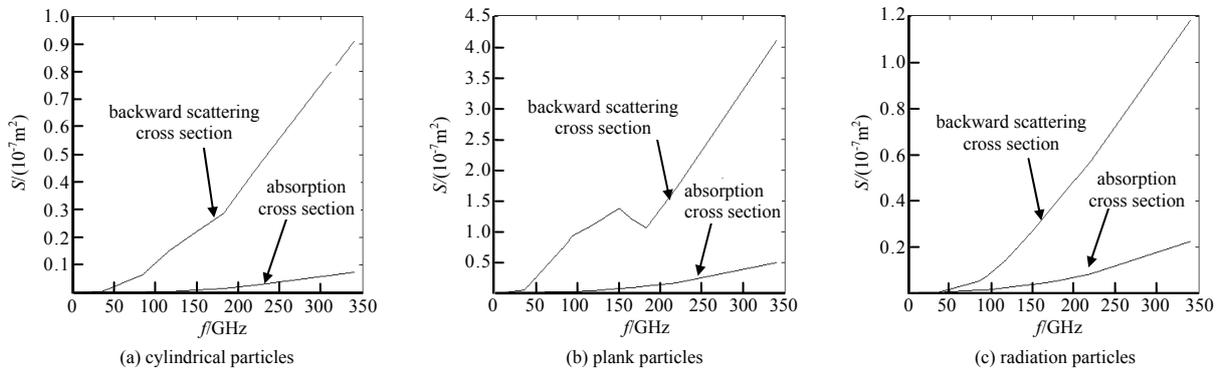


Fig.4 Absorption cross section and backward scattering cross section of three kinds of cloud particles in different frequency bands

图 4 三种云粒子在不同频率下的吸收截面和后向散射截面

## 2 太赫兹雷达测云的优势

根据太赫兹波的单次散射特性分析,对于云微粒子变化,如云晶体结构分类、晶体尺度、冰水含量进行高精度的探测和反演,太赫兹雷达系统的频率更高而波长更接近微粒子尺度,其后向散射能力相比微波得到增强,探测云微粒子在理论上具有更高的分辨力和灵敏度。1988年 Robert E McInTosh 和 James B Mead 等人开发了 215 GHz 雷达系统,并开展了垂直向上观测云和雾的地面试验,给出了观测的云和垂直廓线图。图 5 展示了 2 位学者以上工作的实测结果<sup>[4,9-10]</sup>。

图 5 是国外在轨星载 94 GHz 雷达和激光雷达实际测云三维结构示意图,图 5 (a)表示 94 GHz 雷达的垂直测云三维结构,可以看到对流层云系三维结构能够清晰成像,雷达的不同反射率特性反映了不同的云微物理特性,这种能力是微波辐射计难以具备的,同时低频的降水雷达也由于大波长对微细粒子不敏感而难以观测云粒子微细结构;图 5 (b)表示激光雷达垂直测云三维结构图,可以看到激光的大气穿透性较弱,因此清晰地反映了对流层顶的大气三维结构信息,但由于云层的遮挡,低层云难以成像。图 5 (c)表示星载 94 GHz 雷达和激光雷达测量交叠区域展示,由于激光在厚云和云辐射较重的区域衰减较大,因此对于 94 GHz 雷达+激光雷达联合定量测量云粒径尺度难以实现。图 6 是国外开展的 215 GHz 雷达外场地基垂直测云三维结构示意图,图 6(a)表示测量层积云反射率的示意图,横坐标表示时间,纵坐标表示测云高度(1 km),可以看到不同的灵敏度(dBZ)对应不同层积云系结构廓线;图 6(b)表示测量雾反射率的示意图,横坐标表示时间,纵坐标表示测云高度(1 km),可以看到对应不同的灵敏度(dBZ),反映了不同雾结构廓线。经过分析,相对于毫米波雷达系统,太赫兹雷达系统所具有的优势总结见表 1<sup>[11]</sup>。

1) 更高的灵敏度:在固定的天线尺寸条件下,高频雷达针对云测量的反射回波能量大大提高,从而使其具有更高的探测灵敏度。Mead 等人在 1989 年实现 215 GHz 的探测灵敏度净增加 2.2 dB,该系统和 94 GHz 的系统非常相似,虽然输出功率降低 12.2 dB,由于云微粒子高频散射效率较高,探测灵敏度却增加 14.4 dB。

2) 更小的波束宽度和足迹:在给定的天线尺寸条件下,高频具有更小的波束宽度和足迹。例如 94 GHz 雷达天线,天线直径约 2 m,其地面波束足迹 700 m(-3 dB,单向),在相同的天线尺寸下,215 GHz 产生的波束足迹仅为 305 m。

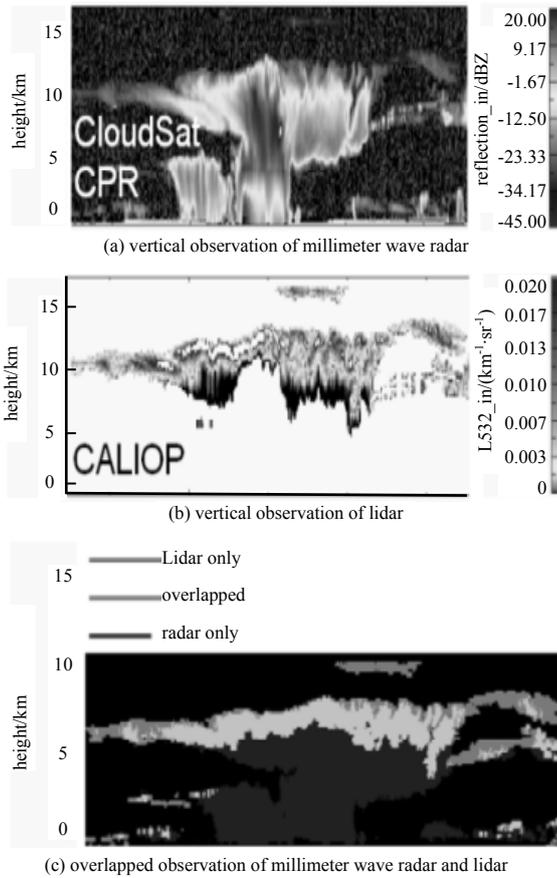


Fig.5 Vertical observation of lidar and millimeter wave radar  
图 5 毫米波雷达与激光雷达的垂直观测图

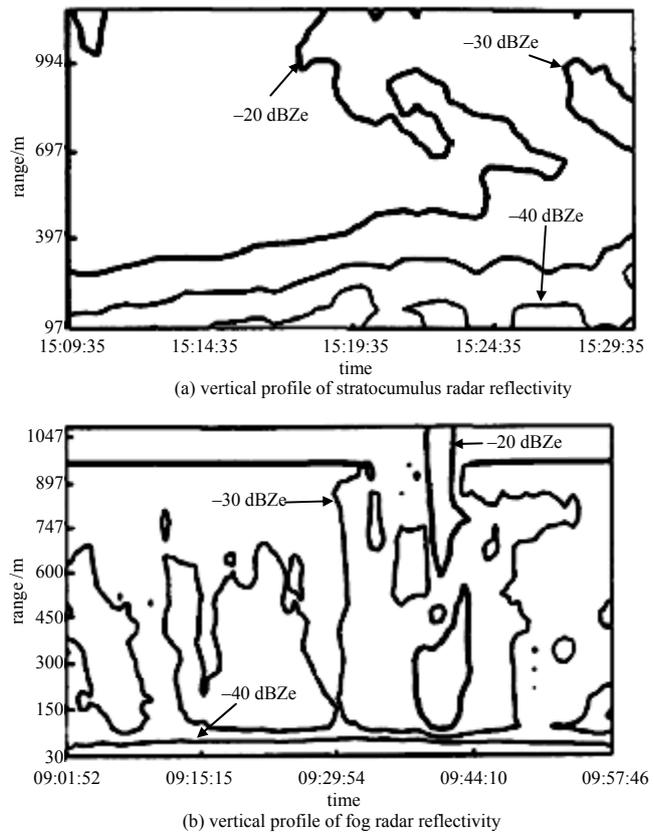


Fig.6 Vertical profile of stratocumulus and fog radar reflectivity  
图 6 层积云/雾反射率因子垂直廓线图

表 1 太赫兹与毫米波雷达测云对比表

Table1 Comparison table of THz and millimeter-wave cloud radar

|  | $f=215\text{ GHz}$  | $f=94\text{ GHz}$   |
|--|---|---|
| effective radius of cloud particle       | the precision at 215 GHz is increased by 20% than that at 94 GHz                |   |
| detection sensitivity                    | it is increased by 14.4 dB when output power is decreased by 12.2 dB            |   |
| footprint of beam (2 m antenna diameter) | 305 m   | 700 m   |
| the error of IWC(ice water content)      | +140%/-60%(IWC~0.001 g/m <sup>3</sup> )<br>+50%/-35%(IWC~0.1 g/m <sup>3</sup> ) | +200%/-65%(IWC~0.001 g/m <sup>3</sup> )<br>+65%/-40%(IWC~0.1 g/m <sup>3</sup> ) |

3) 更好的相关性: 单独更高频率的雷达使得冰水含量(Ice Water Content, IWC)和反射率(Z)之间具有更好的相关性。这是因为粒子直径从 6  $\mu\text{m}$  到云水含量尺度的范围内, 由于能量的增加从而降低了对反射率的依赖性。

4) 更高的精确度: 对于单一频率的系统, 单独从反射率 Z 反演, 215 GHz 比 94 GHz 在冰水含量(IWC)反演时具有更高的精确度, 即可以更准确地估计 IWC。例如: 在 215 GHz, IWC 误差从+140%/-60%(IWC~0.001 g/m<sup>3</sup>) 下降到+50%/-35%(IWC~0.1 g/m<sup>3</sup>); 而在 94 GHz, IWC 误差从+200%/-65%(IWC~0.001 g/m<sup>3</sup>) 下降到+65%/-40%(IWC~0.1 g/m<sup>3</sup>)。

### 3 太赫兹源可行性初步分析

在星载太赫兹测云雷达系统中, 小型、高功率、宽带太赫兹源是最核心的技术, 它是决定系统是否可实现的关键性因素, 因此本文对太赫兹源技术国内外发展水平进行简单的归纳总结, 见表 2<sup>[12-18]</sup>。

从表 2 对比可以看出, 回旋管和自由电子激光器功率比较高, 但体积太大; 返波管和量子级联激光器体积虽然小, 但功率太小; 折叠波导行波管和扩展相互作用速调管国外水平较高, 国内折叠波导行波管在“十三五”末也能达到几十瓦的水平。因此从太赫兹源技术发展趋势来看, 折叠波导行波管和扩展相互作用速调管是备选的星载太赫兹发射源产生手段。

表2 太赫兹源体制对比表  
Table2 The comparison table of THz radiation source

| style of THz source                  | domestic specifications   | abroad specifications                              | volume |
|--------------------------------------|---|--|--------|
| Gyrontron                            | 220 GHz@3 kW peak power   | 650 GHz@16 kW peak power                           | big    |
| FEL                                  | frequency 1 THz–3 THz, Pulse power 24 kW–171 kW, average power 10 W | frequency 0.12 THz–4.8 THz, pulse power 500 W–5 kW | huge   |
| Carcinotron                          | average power 360 GHz@4 mW  | average power 1 THz@20 μW, 0.1 THz@100 mW          | small  |
| QCL                                  | 3.09 THz@9.4 mW   | 3.5 THz@20 mW                                      | small  |
| folded waveguide traveling wave tube | pulse power 220 GHz@20 W  | pulse power 220 GHz@50 W                           | small  |
| EIK                                  | pulse power 220 GHz@100 W   | pulse power 220 GHz@100 W                          | small  |

#### 4 结论

本文主要分析了太赫兹波段大气吸收谱线以及几种云粒子的太赫兹波单次散射特性,通过与传统毫米波云探测技术手段进行对比,分析了星载太赫兹雷达测云的优势,并对太赫兹源的技术发展水平进行了总结。值得一提的是,云的散射特性研究是国际热点,介于其理论体系的复杂性,本文只简单地考虑了太赫兹波的云单次散射特性。为了得到更加准确的结论,针对太赫兹波的云多次散射特性进行研究是非常有必要的。此外星载太赫兹雷达系统参数的设计也需要进行深入的研究,而这些也是下一步研究工作的重点。

#### 参考文献:

- [1] 仲凌志,刘黎平,葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2009,24(4):383–391. (ZHONG Lingzhi,LIU Liping,GE Runsheng. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad[J]. Advances in Earth Science, 2009,24(4):383–391.)
- [2] 马占山,刘奇俊,秦琰琰,等. 云探测卫星 CloudSat[J]. 气象, 2008,34(8):104–111. (MA Zhanshan,LIU Qijun,QIN Yanyan, et al. Introduction to a new type cloud detecting satellite–CloudSat[J]. Meteorological Monthly, 2008,34(8):104–111.)
- [3] 仲凌志. 毫米波测云雷达系统的定标和探测能力分析及其在反演云微物理参数中的初步研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2009. (ZHONG Lingzhi. Calibration and capability analysis of China new generation of cloud radar–HMBQ and its preliminary application in retrieving cloud microphysics parameters[D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2009.)
- [4] Robert E McInTosh,James B Mead. Design and performance of a 215 GHz pulsed radar system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technics, 1988,36(6):994–1001.
- [5] 张琳. 卷云的辐射传输与散射特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. (ZHANG Lin. The radiative transmission and scattering properties of cirrus clouds[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2010.)
- [6] 贺秀兰,吴健,杨春平. 冰晶粒子散射理论模型[J]. 红外与激光工程, 2006,35(s):385–389. (HE Xiulan,WU Jian,YANG Chunping. Model of scattering theory of ice crystal particles[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006,35(s):385–389.)
- [7] 杨春平,贺秀兰,吴健. 卷云散射的蒙特卡罗法模拟[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(1):144–147. (YANG Chunping,HE Xiulan,WU Jian. Numerical simulation of cirrus scattering with the Monte Carlo method[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009,38(1):144–147.)
- [8] 朱士超,郭学良. 环北京地区云中冰粒子形态及增长过程分析[C]// 第30届中国气象学会年会. 南京:[s.n.], 2013. (ZHU Shichao,GUO Xueliang. Analysis of ice crystal habits and growth process around Beijing area[C]// The 30th Annual Conference of Chinese Meteorological Society. Nanjing,jiangsu,China:[s.n.], 2013.)
- [9] James B Mead,Robert McInTosh. A 225 GHz polarimetric radar[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Technics, 1990,38(9):1252–1258.
- [10] James B Mead,Robert McInTosh. Observation of cloud and fog with a 1.4 mm wavelength radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technics, 1988,36(6):521–523.
- [11] 焦中生,沈超玲,张云. 气象雷达原理[M]. 北京:气象出版社, 2005. (JIAO Zhongsheng,SHEN Chaoling,ZHANG Yun. The Principle of Meteorological Radar[M]. Beijing:China Meteorological Press, 2005.)
- [12] 赵青. 140 GHz回旋管关键技术的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014. (ZHAO Qing. The study of the key technology in 140 GHz gyrotron[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)

- [13] 曾造金. W 波段扩展相互作用速调管高频结构的理论研究与数值模拟[D]. 成都:电子科技大学, 2014. (ZENG Zhaojin. Theoretical research and simulation of a W-band extended interaction klystron amplifier[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)
- [14] 徐证清. 220 GHz 耦合腔扩展相互作用速调管研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014. (XU Zhengqing. Study of 220 GHz couple-cavity extended interaction klystron[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)
- [15] 周泉丰,徐翱,周磊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):166-170. (ZHOU Quanfeng,XU Ao,ZHOU Lei,et al. Study of designing 0.22 THz folded waveguide traveling wave tubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):166-170.)
- [16] 高少文. 太赫兹量子级联激光器电子动力学研究[D]. 上海:中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2004. (GAO Shaowen. Electron kinetics in Terahertz quantum cascade laser[D]. Shanghai,China:Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,China Academy of Science, 2004.)
- [17] 陈洪斌,周传明,胡林林,等. 0.14 THz 返波管器件[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(4):865-869. (CHEN Hongbin,ZHOU Chuanming,HU Linlin,et al. 0.14 THz backward wave oscillator device[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(4): 865-869.)
- [18] 殷勇. 360 GHz 返波管的研究[J]. 真空电子技术, 2010(5):1-3. (YIN Yong. Study of a 360 GHz backward wave oscillator[J]. Vacuum Electronics, 2010(5):1-3.)

#### 作者简介:



边明明(1985-), 男, 江西省吉安市人, 博士, 高级工程师, 研究方向为卫星微波遥感、太赫兹成像、星载 SAR 成像、高速实时信号处理。申请专利 4 项, 均已获得授权。在 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Electronics Letters 等国内外权威期刊发表 SCI 期刊论文 3 篇, 在 EUSAR, ICSP, IET International Radar Conference, ICCASM, IASP、兵工学报、信号处理、计算机工程与应用、航天器工程等国际学术会议及国内核心期刊上发表学术论文 20 余篇。email:bianmingming2008@163.com.

王世涛(1966-), 男, 山东省莱州市人, 博士, 资深研究员, 从事遥感理论与技术研究。

胡伟东(1975-), 男, 山西省应县人, 博士, 副教授, 从事毫米波与太赫兹技术研究。

安大伟(1982-), 男, 湖北省荆门市人, 博士, 副研究员, 从事星载微波遥感仪器和产品设计工作。