

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.
doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2018.01.016

天基太赫兹云雷达需求指标分析与论证

商 建,吴 琼,窦芳丽,安大伟

(中国气象局国家卫星气象中心,北京 100081)

摘 要:云对大气起着重要的动力和热力作用,对地球能量平衡、气候变化及天气演变具有重要影响,但云是全球气候模型中最重要也是最难确定的气象要素之一。太赫兹(Terahertz,THz)波是介于微波和红外辐射的电磁波,具有方向性好、能效高、可全天候工作、对云系微物理结构有更高的灵敏度等优点。天基云雷达是测量全球尺度云的有效手段,它能够直接测量云的三维结构,还可以为被动微波遥感测量提供订正参考,目前天基雷达是获取全球云的垂直运动、粒子相态和中尺度物理结构等信息的唯一设备。综合太赫兹波与雷达探测的优势,采用天基太赫兹雷达进行云雾探测,能够获得目前其他技术手段无法获得的独特信息。从应用需求的角度,综合考虑探测目标的垂直与水平分布特性、目标测量所受的杂波干扰、测量精度、分辨率拖影、天线尺寸和衰减等方面的要求,对天基太赫兹测云雷达的探测频段、灵敏度、分辨率、扫描范围、探测距离等重要需求指标进行分析论证,给出合理的需求指标,推进国内天基太赫兹测云雷达的开发建设及应用,为主动遥感气象探测增加一支生力军。

关键词:太赫兹;测云雷达;需求指标分析
中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-7148(2018)01-0125-07

引 言

云对大气起着重要的动力和热力作用,对地球能量平衡、气候变化及天气演变具有重要影响。云可以通过影响太阳短波辐射和地球长波辐射控制地球能量收支。云在数量或分布上的很小变化都能改变气候,云对气候的影响要大于温室气体、人为气溶胶或其他因素对气候的影响。云中水凝物三维结构的定量监测在云-辐射相互作用、人工影响天气、气候变化及空基微波遥感的大气订正等问题的研究中具有重要意义^[1-2]。

雷达作为一种主动遥感设备,在气象探测中具有其他测量手段所不能及的特点。例如雨量计直接测量地面附近的降雨量,只能代表降雨的点分布,从点到面的统计方法计算一个地区的降雨量具有很

大的误差;微波辐射计通过云雨区域的微波热辐射进行测量,在陆地背景下探测云雨非常困难。雷达技术正广泛应用于雨、云、风等关键气象要素的探测^[3-8]。

毫米波雷达是目前对云层进行观测的一种有效手段。世界上第一颗对云层特性进行全球主动遥感测量的卫星 CloudSat 的有效载荷就是工作在 94 GHz 的云剖面雷达(cloud profiling radar, CPR),CPR 自 2006 年发射以来提供了丰富的云层剖面信息^[1,9]。对于薄云和晴空大气微粒子变化,如云冰晶结构分类、冰晶尺度、冰水含量进行高精度的探测和反演,需要波长更接近微粒子尺度的雷达系统,如太赫兹雷达系统。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 0.1~10 THz(波长 3~0.03 mm)。采用太赫兹波进行大

收稿日期:2016-11-04;修订日期:2017-05-12
基金项目:国防科工局民用航天技术预先研究项目子课题(201402KY140);国防科工局民用航天专业技术预先研究项目(D040110);清华大学项目(412412)资助
作者简介:商建(1983-),女,山东济宁人,副研究员,博士,从事雷达气象与微波遥感方面的研究. E-mail:shangjian@cma.gov.cn

气观测能够获得目前其他技术手段无法获得的独特信息。应用太赫兹波对大气云粒子的散射特性进行云层探测成像,通过相应的反演算法分析可以得到诸如云冰晶类型分析、云粒子有效半径和冰水含量等量化信息,这对于气象和气候的定量化分析是至关重要的。

目前国际上还没有星载太赫兹气象雷达,但是国内外已经开展了相关的地面研究,最具代表性的是美国早在 20 世纪 80 年代末就已经开始的太赫兹雷达的开发^[10-11],并进行了云雾观测、区分云冰晶结构类型、晴空大气湍流、大气漩涡和降雪观测试验研究。大量地面研究充分论证了太赫兹雷达由于波谱特点能够探测毫米波雷达和激光雷达所不能探测的气象要素——云雾的精细三维结构和量化信息,具有一定的创新性和实用性。国内关于雷达方面的研究主要集中在利用雷达观测资料开展天气过程分析、成因分析、云和降水特性分析等应用领域^[12-16]。

本文从应用需求的角度对天基太赫兹测云雷达的重要指标需求进行初步分析论证,核心指标包括测云雷达的探测频段、灵敏度/最小可探测反射率、分辨率、天线波束宽度、扫描方式和扫描范围、探测距离等。探测频段的选择需要考虑空间分辨率、天线尺寸和衰减等方面的要求;灵敏度的选择需要考虑目标云能够达到的最小雷达反射率因子;雷达的垂直分辨率需通过分析气象目标的垂直结构来确定,水平分辨率需要考虑的环节更为复杂,包括目标测量所受的杂波干扰和对目标的测量精度等;扫描方式和扫描范围的选取需要考虑目标观测的分布特性及扫描角度对分辨率拖影的影响;探测范围的确定则需要综合考虑各个云族云属的高度范围。从应用需求出发提出太赫兹雷达测云的重要指标需求,再将应用需求指标转化为雷达技术指标后,可用于指导研制部门开展有针对性的仪器研制工作。

1 天基太赫兹测云雷达需求分析概述

天基太赫兹测云雷达需要的功能主要包括:回波测量功能、定标功能和测试功能。雷达系统首先需要能够按照既定指标对目标开展有效探测,同时考虑到随着卫星定量化遥感技术和遥感资料定量化应用技术的迅速发展,微波遥感器的定标愈发重要,所以雷达系统还需具有内定标和外定标功能。雷达通过利用自身的内定标回路,实现对雷达系统中发射机和接收机系统的校准,通过实时监测雷达系统内部的各个参量,消除内部性能参数变化所引起的

误差。外定标用于确定目标的绝对后向散射,可以利用已知目标的后向散射系数对雷达系统进行绝对定标,同时可以监测雷达的发射信号和方向图等参数。为了保证对云目标的精确测量,定标精度应达到 1 dB。测试功能主要是对雷达收发通道特性及接收机噪声进行测试。天基太赫兹测云雷达信号处理要求包括雷达信号的检测、雷达杂波的抑制和低副瓣脉冲压缩等,主要技术指标包括回波测量精度、内定标精度、外定标精度、脉冲压缩模式下的距离旁瓣、天线旁瓣、处理时效性等。主要产品包括雷达反射率因子、液水含量、冰水含量和有效粒子半径等。本文从应用需求的角度对天基太赫兹测云雷达的重要指标需求进行初步分析论证。

2 雷达指标需求分析

2.1 探测频段

雷达探测频段的选择需要考虑空间分辨率、天线尺寸和衰减等方面的要求。鉴于太赫兹波段的频率足够高,空间分辨率和天线尺寸不受太大制约。下面从太赫兹频段的衰减情况和双频段联合探测方面对探测频段进行分析。

(1) 太赫兹频段的衰减情况

太赫兹波的方向性和穿透性等特性优于可见光和近红外光的,能够描述云雾内部的物理结构,监测云雾的垂直剖面变化,而且太赫兹波的来源不受时间的影响,探测器可以全天候工作。另一方面,相比于微波雷达,由于太赫兹波长较短,所以探测器件的尺寸和重量远小于微波器件的,适合卫星平台搭载。此外,太赫兹雷达系统容易实现窄天线波束,并且更适合实现较大的信号带宽,有利于获得更高的水平分辨率和距离分辨率,对云雾结构更精细地成像。

但不容忽视的是,在太赫兹频段,水汽和氧气的衰减影响比较严重,极化分子与入射波作用会产生强烈的吸收,同时空中的水凝物(雨、雾、雪、霜、云等)会引起附加的衰减。大气中的水分对太赫兹频段电磁波的衰减最严重的可达到 100 dB/km 以上。但是在太赫兹的低频段存在多个大气窗口,其衰减相对较小。从太赫兹频段大气吸收曲线(图 1)中可以看出,在太赫兹低端的大气窗口处,每 km 的单程衰减约为 5~6 dB,且随着海拔高度的增加,大气中的水分含量迅速降低,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,衰减系数为 4.8 dB/km,在 7 km 的高空,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^[17]。

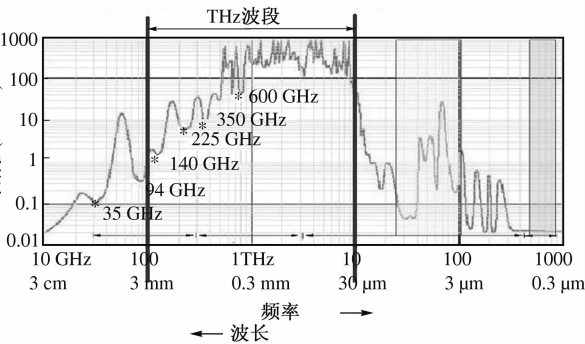


图 1 太赫兹频段大气吸收曲线

综上,根据太赫兹频段的大气吸收特性,工作频率可选取太赫兹低频段的大气窗口 140 GHz 或 225 GHz 左右,以控制衰减并保持较好的穿透性。

(2) 双频段联合探测

美国航空航天局 (NASA) 和加拿大航天局 (CSA) 共同研制的世界上第一颗主动遥感测云卫星 CloudSat,自 2006 年发射以来提供了丰富的云层剖面信息。欧洲航天局 (ESA) 与日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 联合研制的 EarthCare 预计于 2019 年发射,将对云等气象目标的垂直结构和水平分布进行全球测量,改进对其相互作用的理解^[18-19],其云雷达 (cloud profiling radar, CPR) 的工作频率也是 94 GHz。

相比于 94 GHz 的云雷达,我国未来发展天基太赫兹云雷达具有很大的应用价值。一方面,太赫兹雷达系统可以以更高的水平分辨率和距离分辨率对云雾结构精细成像,并且探测器器件的尺寸和重量小于 94 GHz 器件的,更适合卫星平台搭载;另一方面,未来我国的太赫兹云雷达可以与已有的云雷达协同观测,联合反演更多、更准确的气象参数。观测给定平均尺寸的云晶粒时,太赫兹雷达所组成的双频段雷达的反射率比 DWR (dual wavelength ratio) 大幅增加,可以更准确地反演晶粒尺寸,并能够探测更小的晶粒。研究表明,联合 215 GHz 的 94/215 GHz 双波长雷达系统用于测量云有效半径和冰水含量,较之单频 94 GHz 均有 20% 的提高^[20]。从这个意义上讲,太赫兹雷达的工作频率选择 225 GHz 左右优于选择 140 GHz。图 2 给出了 94/140 GHz 和 94/225 GHz 不同频率组合的双波长比 (DWR), D_0 为粒子中体积直径。由图 2 可见,两部雷达的工作频率相隔越远,可获得的双波长比越大。

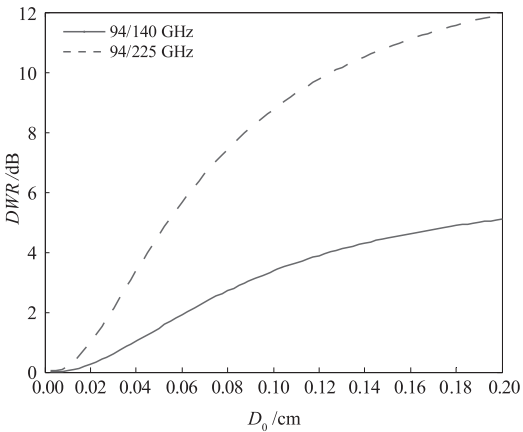


图 2 不同频率组合下的双波长比

进一步从等效雷达反射率因子对粒径尺寸的敏感性方面对不同频段进行分析。图 3 给出了 94 GHz、140 GHz、225 GHz 3 个频点的雷达反射率因子 (Ze) 与粒子中体积直径 (D_0) 之间的关系,设置冰晶的冰水含量为 1.0 g/m^3 。对于直径小于约 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 的粒子,3 个频率的敏感性相似,这是由于小粒子的散射满足瑞利散射条件, Ze 值不随频率变化。当粒子直径超过约 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 时,满足米散射条件。在米散射区域,随着粒子直径的增加,高频的雷达反射率因子值落在低频的雷达反射率因子值之下,这也是双频反演算法的基础。选择不同的粒径区域对频段敏感性进行分析,结果如图 3 所示,分为区域 A ($100\text{--}300 \text{ }\mu\text{m}$)、区域 B ($300\text{--}600 \text{ }\mu\text{m}$)、区域 C ($600\text{--}800 \text{ }\mu\text{m}$)、区域 D ($>800 \text{ }\mu\text{m}$)。在区域 A, Ze 对粒径的敏感性以 94 GHz 最强、225 GHz 最弱;在区域 B, 225 GHz 对粒径的敏感性最强,粒径增加 $200 \text{ }\mu\text{m}$ 对应的 Ze 增加了 4 dB 左右;在区域 C, 140 GHz 对粒径的敏感性略强,94 GHz 和 225 GHz 的敏感性基本一致;在区域 D, 225 GHz 对粒径变化不再敏感,出现“饱和”效应,94 GHz 和 140 GHz 的敏感

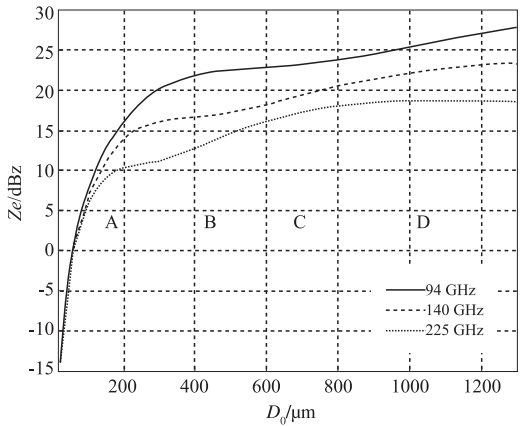


图 3 不同频段下等效雷达反射率因子对粒径的敏感性

性相似,94 GHz略强。综上所述,94 GHz 在区域 A、区域 D 都具有较强敏感性,225 GHz 在区域 B 具有较强敏感性,而在区域 C 3 个频段的敏感性相近。因此,94/225 GHz 频段配合使用比 94/140 GHz 频段配合使用更为合适。

综上所述,太赫兹测云雷达的探测频段优先选择太赫兹低频段的大气窗口 225 GHz 左右。

2.2 灵敏度/最小可探测反射率

对太赫兹测云雷达的最小可探测雷达反射率因子的需求主要考虑以下方面:

a)对于非降雨云,小于 -40 dBz 的 Ze 值都是值得关注的。

b)水云的反射率因子在 -35 ~ 0 dBz,冰云的反射率因子在 -40 ~ -10 dBz。

综合以上考虑,测云雷达的最小可探测反射率应优于 -40 dBz。

针对目前国内在太赫兹测云雷达方面开展的工作,从工程可实现性的角度,可给出最低可接受的最小可探测反射率指标。太赫兹探测的一个巨大优势可能在于探测卷云一类的微弱回波信号。卷云对气

候的影响很大,但目前对卷云缺少有效的探测,被动探测无法获取有用信息,降水雷达实现了主动探测却又因波段太低而观测不到卷云。可尝试使用太赫兹测云雷达来弥补对卷云观测的不足。

卷云(Cirrus,Ci)指由细小冰晶组成的层状、钩状、带状或纤维状的高云,且冰晶比较稀疏,故云比较薄而透光良好,色泽洁白并具有冰晶的亮泽。在气象观测中卷云分为 4 类,即毛卷云、密卷云、钩卷云、伪卷云。卷云是在全球范围内最经常出现的云型之一,全球平均卷云覆盖量在 20% ~ 50%,因此卷云在全球热量收支中起着重要作用^[21]。

按云的高度可以将云分成高云、中云和低云 3 族,这 3 族云又由 10 类构成,称为 10 属^[21]。表 1 中搜集整理了各个云族云属的反射率因子范围,包括雷达反射率因子的均值与最常出现的雷达反射率因子极大值。综合考虑各种云型及重点探测目标——卷云的探测需求,确定最小可探测反射率指标为不大于卷云中最常出现的反射率值 -25 dBz。

通过雷达方程及雷达系统温度等参数,可以将最小可探测反射率进一步换算为雷达的灵敏度。

表 1 云分类及其反射率因子

云族	云属	主要成分	Z 均值/dBz	最常出现 Z/dBz
高云 (云底高度一般 >6 km)	卷云(Ci)	冰晶	< -3.0	-25
	卷积云(Ce)			
	卷层云(Cs)			
中云 (云底高度一般为 2 ~ 6 km)	高积云(Ac)	冰晶、雪花、 水滴混合组成	-31.5	-25
	高层云(As)			-10
低云 (云底高度一般 <2 km)	层云(St)	水滴	-31.2	-25
	层积云(Sc)			
	雨层云(Ns)	水滴	-10.0 < Z < 15.0	5
	积云(Cu)	水滴	-24.4	-25
	积雨云(Cb)			10

2.3 分辨率

太赫兹测云雷达的分辨率指标包括垂直分辨率和水平分辨率。雷达的垂直分辨率需求与气象目标的垂直结构有关,需通过分析气象目标的垂直结构来确定垂直分辨率。雷达的水平分辨率对测量气象目标的影响表现在若干方面。雷达水平分辨率的大小会影响目标测量所受的杂波干扰。在雷达系统其他性能指标、卫星高度及降雨、海况等外部条件不变的情况下,各个扫描角上地表杂波所能干扰的目标测量的高度与雷达的水平分辨率成正比。更重要的是,雷达的水平分辨率影响对目标的测量精度,因为云雷达测得的雷达反射率因子是真实目标场的加权平均结果。只有当目标场在水平分辨率量级的区间

内保持在水平方向的均匀性时,云雷达测得的反射率因子值才等于真实值。

如前所述,太赫兹探测的一个巨大优势可能在于探测卷云一类的微弱回波信号。卷云的云底高度一般为 4.5 ~ 10 km,云顶往往接近对流层顶。卷云的厚度为几百米到几千米,一般为 1.5 ~ 2.5 km。水平尺度从几千米到上千千米^[21]。为了避免天线波束内气象目标覆盖不均一(波束不均匀充塞)而导致反演误差,并且获得足够多的采样点,测云雷达的距离分辨率和水平分辨率分别应在数十米和数百米的量级上,期望能够达到 10 m 和 100 m。

2.4 天线波束宽度、扫描方式和扫描范围

根据卫星轨道高度和所需的星下点水平分辨

率,可以得到对应的天线半功率波束宽度。气象雷达需要覆盖较宽的三维区域,因此采用扫描观测最佳。雷达进行交轨方向的扫描时,在扫描边缘展开的天线波束会造成垂直分辨率拖影。测云雷达的扫描角范围(即最大扫描角度)主要考虑扫描角度对分辨率垂直拖影的影响。需要对不同扫描角度下分辨率垂直拖影的高度进行仿真计算。

(1)波束宽度

以卫星轨道高度 $H = 800\text{ km}$ 、星下点水平分辨率 $\rho_a = 100\text{ m}$ 为例,根据式(1)计算得到所需的天线半功率波束宽度 θ_0 约为 0.0072° 。以卫星轨道高度 $H = 400\text{ km}$ 、星下点水平分辨率 $\rho_a = 100\text{ m}$ 为例,根据式(1)计算得到所需的天线半功率波束宽度 θ_0 约为 0.0143° 。

$$\rho_a = 2H \cdot \tan \frac{\theta_0}{2} \tag{1}$$

(2)扫描方式

气象雷达需要覆盖较宽的三维区域,因此采用扫描观测。考虑到以下几个方面,优先选择使用垂直航向的电扫描。

a)垂直航向扫描提供的垂直分辨率优于圆锥扫描。圆锥扫描天线始终指向一个非天底角度,分辨体积是倾斜的,恶化了垂直分辨率。

b)波束扫描经过天底时可以获得最佳垂直分辨率。

c)在近天底角度上,受到地表杂波严重污染的目标区域较小。

(3)扫描范围

较宽的测绘带有利于对大范围目标的观测及保持足够的采样数目。主要探测目标卷云的水平尺度从几千米到上千千米。初步考虑 1000 km 的测绘带宽,以卫星轨道高度 $H = 400\text{ km}$ 为例,根据式(2)计算得到所需的天线扫描范围 θ 约为 $\pm 51.34^\circ$,即星下点左右两侧各扫描 51.34° 范围。

$$W = 2H \cdot \tan \theta \tag{2}$$

较大的扫描角度可以获得较宽的测绘带,但扫描边缘的水平分辨率与垂直分辨率由于恶化而低于天底波束的分辨率,太大的扫描角会加剧恶化分辨率。水平分辨率与垂直分辨率拖尾的定义式分别为

$$r_x = \frac{H\theta_0}{\cos \theta}, \quad r_y = \frac{H\theta_0}{\cos^3 \theta}, \quad \Delta r_h = \frac{H\theta_0 \tan \theta}{\cos \theta} \tag{3}$$

其中, H 为卫星高度, θ 为天线扫描角, θ_0 为天底的波束宽度,其他入射角的天线波束宽度为 $\theta_0/\cos \theta$ 。

天线波束宽度依赖于 $1/\cos \theta$,每项定义都考虑了天线波束的展宽。图 4 给出了分辨率恶化量的示意图。图 5 给出了在 400 km 轨道高度下,波束宽度为 0.0143° 时水平分辨率与垂直分辨率拖尾的计算结果,最大拖尾只有几百米,故太赫兹测云雷达选择 $\pm 51.34^\circ$ 扫描范围是合理的。

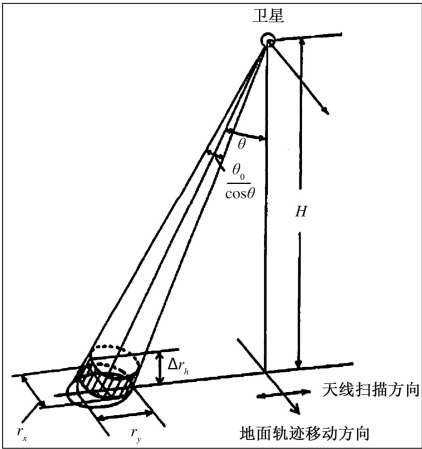


图 4 水平分辨率与垂直分辨率拖尾示意图

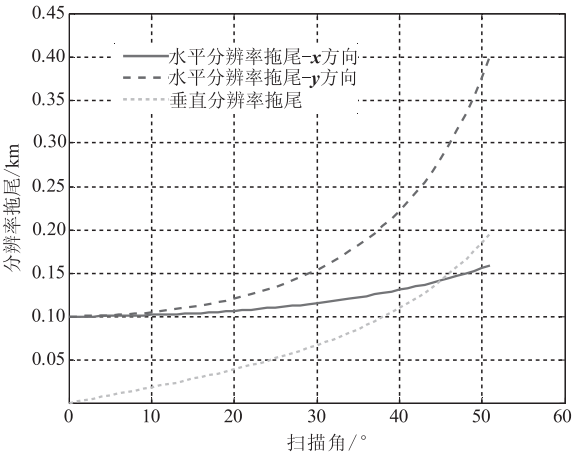


图 5 水平分辨率与垂直分辨率拖尾仿真结果

2.5 探测距离范围

表 2 中搜集整理了各个云族云属的高度范围。太赫兹测云雷达可以尝试用于探测高层卷云、淡积云、薄层云等非降水云和雾、沙尘等气象目标。一方面,雾由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴组成,出现于近地面层;霾是大量微小尘粒、烟粒或盐粒等均匀浮游在空中,伸展的高度有时比雾高些,所以雷达的最低探测高度应为地表。另一方面,云的发展高度可以达到很高。高云族中的卷云有时产生在能生成云的最高高度上,其云底高度一般为 $4.5 \sim 10\text{ km}$,云顶往往接近对流层顶。探测目标的分布情况决定了期望太赫兹测云雷达的探测距离范围能

够覆盖地表至 20 km 高度。但太赫兹波段衰减较强,无法穿透对流层下部,因此主要探测范围更可能为对流层中部以上的冰云区域。

表 2 云分类及其高度范围

云族	云属	主要成分	高度范围/km
高云 (云底高度一般 >6 km)	卷云 (Ci)	冰晶	4.5 ~ 对流层顶
	卷积云 (Cc)		4.5 ~ 8.0
	卷层云 (Cs)		5.5 ~ 8.0
中云 (云底高度一般为 2 ~ 6 km)	高积云 (Ac)	冰晶、雪花、 水滴混合组成	2.5 ~ 4.5,有时可高达 8.0 左右
	高层云 (As)		2.5 ~ 4.5,有时可高达 7.0 左右
低云 (云底高度一般 <2 km)	层云 (St)	水滴	<2.5
	层积云 (Sc)		0.15 ~ 2.50
	雨层云 (Ns)		0.6 ~ 6.0 以上
	积云 (Cu)		0.6 ~ 6.0 甚至更高
	积雨云 (Cb)		0.4 ~ 最高可超过对流层顶

2.6 天基太赫兹测云雷达的主要指标需求

通过上述分析计算,从测云应用需求的角度,得到天基太赫兹测云雷达的主要指标需求(见表 3)。进一步根据需求灵敏度、最大探测距离、工作波长、波束宽度等应用指标,计算了对测云雷达发射功率的要求。在 450 km 的卫星轨道上,雷达发射功率需要达到 87 W 才能够满足探测需求。

表 3 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 400 km、星下点水平分辨率 100 m 为例

3 结 语

本文从应用需求的角度对天基太赫兹测云雷达的指标需求进行初步分析论证。在国防科工局民用航天技术预先研究项目的支持下,近期开展了对太赫兹雷达测云的需求调研和仪器研发工作。本文从工程可实现性的角度补充了地基太赫兹测云雷达的指标需求,以期推进国内太赫兹测云雷达的开发建设及后续应用。

参考文献

[1] 马占山,刘奇俊,秦琰琰,等.云探测卫星 CloudSat[J].气象,2008,34(8):104-112.

[2] 雷恒池,洪延超,赵震,等.近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J].大气科学,2008,32(4):967-974.

[3] 邵颖,史岚,张狄,等.雨量计与星载测雨雷达资料结合的降水估算方法[J].气象科学,2014,34(4):390-396.

[4] 蒋义芳,尹东屏,刘安宁,等.一次特大暴雨过程的多普勒天气雷达资料分析[J].气象科学,2011,31(3):347-353.

[5] 高留喜,王彦,万明波,等.山东特大暴雨雷达回波及地形作用分析[J].大气科学学报,2011,34(2):239-245.

[6] 樊雅文,黄兴友,李锋.毫米波雷达测云个例研究[J].大气科学学报,2013,36(5):554-559.

[7] 刘红艳,魏鸣,管理.多普勒雷达风场资料在临近预报中的应用[J].大气科学学报,2015,38(4):483-491.

[8] 牟容,余君,张亚萍,等.一次飑线过程的雷达回波分析及其反演风场研究[J].气象科学,2012,32(2):153-159.

[9] 周毓荃,赵姝慧.CloudSat 卫星及其在天气和云观测分析中的应用[J].南京气象学院学报,2008,31(5):603-614.

[10] Mead J B, Mcintosh R E, Vandemark D, et al. Remote sensing of clouds and fog with a 1.4-mm radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1989, 6(6): 1090-1097.

[11] Clothiaux E E, Miller M A, Albrecht B A, et al. An evaluation of a 94-GHz radar for remote sensing of cloud properties [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1995, 12(2): 201-229.

[12] 张彩英.基于风廓线雷达资料的暴雪天气过程分析[J].气象与环境科学, 2016, 39(4): 80-85.

[13] 耿建军,李浚河,杜佳,等.2013 年北京地区一次强对流降水天气成因分析[J].气象与环境科学,2016,39(1):52-58.

[14] 费烨,夏祥鳌.1980-2009 年中国大陆中东部气溶胶-云-辐射变化及其关系[J].气象与环境科学,2016,39(2):1-9.

[15] 吴紫煜,姚雯,李超,等.京津冀地区中 α 尺度飑线过程中大风特征分析及成因初探[J].气象与环境科学,2016,39(2):90-98.

[16] 曹楚,王忠东,刘峰,等.2013 年“菲特”台风暴雨成因及湿位涡诊断分析[J].气象与环境科学,2016,39(4):86-92.

[17] 李晋.太赫兹雷达系统总体与信号处理方法研究[D].成都:电子科技大学,2010.

[18] Aida Y, Tomita E, Nakatsuka H, et al. EarthCARE/CPR design results and PFM performance [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8889:

88890A – 1 – 4.

[19] Okada K, Kimura T, Nakatsuka H, et al. EarthCARE/CPR design and verification status[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8533: 85330D – 1 – 6.

[20] Hogan R. 215 GHz for monitoring ice clouds: comparison with ra-

dar/lidar synergy [EB/OL]. (2000 – 03 – 01) [2016 – 11 – 01].
http://www.met.rdg.ac.uk/clouds/publications/synergy.pdf.

[21] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.

Requirements Index Analysis and Demonstration of Spaceborne Terahertz Cloud Measuring Radar

Shang Jian, Wu Qiong, Dou Fangli, An Dawei

(National Satellite Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: Cloud plays an important role in atmospheric dynamic and thermal activities, which has significant effects on the earth’s energy balance, climate change and weather variations. But cloud is one of the most important and most difficult to determine elements in global climate model. Terahertz (THz) band lies between microwave band and infrared band, which has many advantages such as good directionality, high energy efficiency, all-weather working ability and high sensitivity to cloud microphysics structure. Spaceborne cloud measuring radar is an effective way measuring global cloud, which can directly measure the three-dimensional structure of cloud and provide revised reference for passive microwave remote sensing measurement. Spaceborne radar is currently the only equipment could obtain the vertical movement, particle phase and mesoscale physical structure of global cloud. Spaceborneterahertz radar combining the advantage of terahertz band and radar detection used in cloud and fog detection can obtain unique information that cannot be acquired by other current technical means. The important requirements index of spaceborneterahertz cloud measuring radar, including frequency range, sensitivity, resolution, scanning range and observation distance, are analyzed and demonstrated in terms of application requirements, comprehensive considering the vertical and horizontal distribution characteristics of targets, clutter jamming, measuring accuracy, resolution smear, antenna size, attenuation, and so on. The proper requirements index is provided and it is hoped to promote the development and application of domestic terahertz cloud radar, and add a new member of active remote sensing meteorological detection.

Key words: terahertz; cloud measuring radar; requirement index analysis