

文章编号: 2095-4980(2017)05-0733-07

星载太赫兹主动云雷达探讨

王平^{1,2}, 王海涛^{1,2}

(1.上海无线电设备研究所, 上海 200090; 2.上海目标识别与环境感知工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 当前云遥感手段对于短期天气预报和长期气候研究起到举足轻重的作用, 但是在云遥感方面探测能力存在一定的不足。简单比较了当前云遥感手段的优点和缺点, 重点分析了星载微波云雷达发展现状。通过分析比较认为星载微波云雷达向高灵敏探测度、多功能、多频和高频方向发展。太赫兹波在高空衰减较小且对微小云粒子探测较为敏感, 因而适合于星载平台, 这将使其成为今后星载云雷达重要发展技术。最后, 基于气象探测需求和太赫兹技术特点, 提出了一种星载太赫兹主动云雷达系统方案。

关键词: 气象; 遥感; 太赫兹; 星载; 云雷达

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0733

Discussion of spaceborne Terahertz active Cloud Profiling Radar

WANG Ping^{1,2}, WANG Haitao^{1,2}

(1.Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China; 2.Shanghai Engineering Research Center of Target Identification and Environment Perception, Shanghai 200090, China)

Abstract: Remote sensing techniques have been improved in the representation of cloud processes in Global Climate(GCM) and Numerical Weather Prediction(NWP) models, nevertheless, there are still gaps in our ability to probe clouds. This paper concludes the advantages and disadvantages about remote sensing tools, especially microwave Cloud Profiling Radar(CPR). There are four trends of microwave cloud radar development: higher sensitivity, multifunction, multi-frequency and higher frequency. The terahertz wave followed in atmospheric window will be absorbed slightly and it is suitable for spaceborne platform. A scheme is proposed for spaceborne terahertz active CPR.

Keywords: atmosphere; remote sensing; Terahertz; spaceborne; Cloud Profiling Radar

云是地气系统中重要的气象要素, 既对短期天气预报起着重要的作用, 又对长期气候变化产生巨大的影响。更进一步说, 云是成云致雨的主要载体, 通过云、降水、大气循环, 进而影响整个地球的水循环; 云影响地气系统的辐射收支平衡, 通过反射太阳短波辐射和吸收地球表面长波辐射, 来控制地球能量的收支变化。云和降水是短期气象和长期气候模型中主要不确定性来源。因此, 气象研究和应用部门需要新的观测手段或先进的数据处理能力来提升气象和气候模型预报的准确性。

星载遥感手段缘于不受地区限制, 能够长期获取气象要素的信息而受广泛欢迎。星载云遥感传感器可分为被动云遥感和主动云遥感。星载被动云遥感传感器主要有微波、红外和可见光辐射计等, 是当前短期天气预报和长期气候预报模型最为重要的数据来源。该类传感器发展时间较早也较为成熟, 观测刈幅宽, 能够获取云系宏观信息, 如云高、亮度、云顶的反照率和云顶温度等。它们有助于了解云影响局地和大尺度范围的大气与辐射环境机制, 可确定包括降水和云光学性质在内的几乎所有的云属性信息, 可用于整个大气通量廓线和辐射加热率的计算。但是, 它们也存在一定的不足: a) 其空间分辨率一般; b) 在陆地上空对云雨定量测量能力较弱; c) 通常只能探测整个路径的辐射总量信息, 不能直接获取云的剖面信息和垂直分布, 或剖面分辨数据较差, 这在一定程度上影响了气象反演的精确度。星载主动云遥感传感器主要有微波和激光云雷达, 是定量了解云影响大气辐射特性、云-气溶胶演化以及标定其他观测传感器的重要手段。该类传感器空间分辨率较好, 能够测量云的剖面廓线信息, 也适合于陆地上空云的测量。其中, 微波云雷达测量云雨、冰雹等能力较强, 但对粒径较小的云粒子穿透性过强,

收稿日期: 2016-09-24; 修回日期: 2017-01-24

基金项目: 科工局民用航天项目; 上海市科学技术委员会 2015 年度上海工程技术研究中心建设立项项目(15DZ2250800)

回波强度较弱,对薄云和极薄云甚至无法探测;激光雷达对微小粒子探测能力较强,但是穿透能力较弱,易受云雨衰减的影响,仅可以测量厚度较小的云层表面信息。对于全球云观测,本文重点考虑微波雷达。全球唯一具备云观测的微波雷达是搭载于 2006 年美国 NASA 发射的 CloudSat 卫星的 94 GHz 云雷达^[1],该雷达探测能力达到 -30 dBZ。欧空局计划将于 2018 年发射载有 94 GHz 多普勒云雷达的 EarthCARE 卫星^[2],该雷达探测能力将达到 -35 dBZ。另外,美国 NASA 在论证研究 Ka/W 波段双频雷达以及太赫兹云雷达^[3]。太赫兹波长因为接近于云粒子而更适合探测云目标。近些年随着太赫兹技术的不断突破,太赫兹云雷达技术再一次被提起。然而,尚未有专门探讨星载太赫兹云雷达的公开资料。本文将对星载云雷达发展现状做一简单汇总归纳,介绍太赫兹波云探测优势并给出一种星载太赫兹云雷达方案。

1 星载主动云遥感载荷发展现状及趋势

1.1 典型的主动云遥感载荷

1.1.1 在轨 CloudSat 云雷达

CloudSat 卫星^[4]于 2006 年 4 月 28 日与 CALIPSO 卫星正式加入了已有 Aqua,PARASOL 和 Aura 3 颗卫星的 A-Train 星座。CloudSat 卫星轨道属太阳同步轨道,即卫星轨道平面和平均太阳子午线之间保持着基本固定的角度。该卫星携带的唯一载荷是第 1 颗对云层特征进行全球观测的云雷达(CloudSat/CPR),它可以测量从薄云到浓厚云的垂直剖面特征,包括云的厚度、云层顶部和云层底部的高度,观察云层的形成和演变过程,确定云对气候环境的影响程度;还可以测量云剖面上的液态水和冰水含量以及云的光学特征等。CloudSat/CPR 有 4 个科学目标^[5]: a) 评价云资料在天气和气候预报模式中的表现; b) 评价云中液态水和冰含量与云辐射性能之间的关系; c) 对利用现有卫星测量值推导的云属性资料进行评价,从而推动云遥感观测方法的发展; d) 通过研究气溶胶在成云过程中的作用,进一步理解气溶胶对云的间接影响。但是,长期数据研究表明它对海上层积云、雾、低空暖云或高空冰云探测能力不足。

1.1.2 在研 EarthCARE 多普勒云雷达

EarthCARE 卫星^[6]计划于 2018 年发射,载有大气探测激光雷达(Atmospheric Lidar, ATLID)、云雷达(CPR)、多光谱成像仪(Multi-Spectral Imager, MSI)和超宽带辐射计(Broadband Radiometer, BBR) 4 个气象遥感载荷。EarthCARE 搭载的 CPR 载荷选用太阳同步轨道星下点观测方式。其中,EarthCARE/CPR 是典型的窄脉冲多普勒雷达,用于获取顺轨云剖面信息,包括液态、过冷水、冰水、云层、云粒子尺寸和云消光系数等剖面信息。另外,CPR 用于获取对流层上升气流和冰粒子下落速度。它在雷达反射率因子和多普勒信息方面较 CloudSat/CPR 有较大提升,但是依然采取星下点观测方式。

1.1.3 论证的 ACE 双频云雷达

NASA 气溶胶-云-生态系统任务小组^[3](Aerosol/Cloud/Ecosystems, ACE)将选用新一代云雷达开展降低气候模型中云和气溶胶引起的不确定性的任务。为理解云-气溶胶之间相互作用过程,ACE 将选用雷达、激光雷达、偏振器和多波段成像仪或光谱仪。其中,云雷达选用 Ka 和 W 双频模式,用于探测雨滴尺寸、冰川高度和云高。另外为进一步提升云探测能力,该雷达将具备多普勒测速和交轨扫描的能力。同时,该研究小组也在进行 200 GHz 以上频段云雷达研究工作。

1.2 主动云遥感载荷发展趋势

典型的在轨、在研和论证的星载微波主动云遥感载荷的主要设计参数见表 1。目前公开文献仅给出了 ACE/CPR 相关气象观测参数,并无具体方案设计参数。另外,因缺乏公开披露的星载太赫兹云雷达方面资料,未能提供参数用于比较。CloudSat/CPR 的应用标志着全球云雷达观测进入崭新的阶段,大大提升了云剖面信息获取能力。但是,其垂直分辨力和探测能力的限制导致其对高空卷云、部分层积云等探测能力不足。新一代 EarthCARE/CPR 通过降低轨道高度和提升天线口径增强了云探测能力,同时引入了多普勒信息获取能力。更为先进的 ACE/CPR 则保有 EarthCARE/CPR 的探测能力,并引入双频技术。值得注意的是,气象研究单位所关心 -40 dBZ 探测能力^[7]给载荷研制带来了巨大的挑战。所以,目前所公开的文献并未把 -40 dBZ 的探测能力作为 ACE/CPR 最终指标,仅仅定位为指标。因此,这也对太赫兹云雷达有了迫切的需求。

从表 1 给出的典型云遥感载荷主要设计参数比较以及上述论述中,大致可将星载云雷达发展趋势总结为 4 个方面:

表 1 典型的主动云遥感载荷主要设计参数
Table 1 Main parameters of typical spaceborne CPR

	f/GHz	altitude/km	range resolution/m	cross-track resolution/km	along-track resolution/km	pulse width/ μs	peak power/kW	PRF/kHz
CloudSat/CPR	94.05	705	500	1.4	1.7	3.3	1.8	3.7-4.3
EarthCARE/CPR	94.05	400	500	0.8	0.9	3.3	1.8	6.1-7.5
ACE/CPR	Ka	/	250	1.0	1.8	/	/	/
	W	/	250	0.7	1.0	/	/	/

	PRF/kHz	antenna diameter/m	gain/dB	integration distance/km	data window/km	swath width/km	Min. detectable reflectivity/dBZ	Doppler accuracy
CloudSat/CPR	3.7-4.3	1.85	63.1	1.0	30	/	-30	/
EarthCARE/CPR	6.1-7.5	2.50	65.2	0.5/10.0	12-20	/	-35	1 m/s @10 km/-19 dBZ
ACE/CPR	/	/	/	/	25	25	-10/-15(goal)	1.0 m/s
	/	/	/	/	25	/	-35/-40(goal)	0.4 m/s

- 1) 载荷探测能力向高探测灵敏度发展。从 CloudSat/CPR 的 -30 dBZ 到 EarthCARE/CPR 的 -35 dBZ, 再到 ACE/CPR 期望的 -40 dBZ。
- 2) 载荷探测功能向多元化方向发展。从 CloudSat/CPR 获取剖面雷达反射率因子到 EarthCARE/CPR 获取剖面雷达反射率因子以及云粒子多普勒信息再到 ACE/CPR 获取宽刈幅剖面雷达反射率因子和云粒子多普勒信息。
- 3) 载荷向更高频段方向发展。从 94 GHz 到 200 GHz 以上频段方向发展。值得注意的是, 近年 237.9~238 GHz 频段被国际电信联盟划给卫星地球探测(有源)业务和空间研究(有源)业务, 该频段限于星载云层雷达。
- 4) 载荷工作频率向双频甚至多频方向发展。

2 太赫兹主动云雷达探测优点和可行性

短波用于气象探测主要弊端源于大气中气体和水汽的严重吸收^[8-9], 但处于 220 GHz 大气窗口的电磁波适用于星载平台冰云等气象遥感^[10-11]。这主要是因为星载平台避免了太赫兹波近地面大气衰减严重的问题, 太赫兹波对微小尺寸冰晶粒子的探测较为灵敏, 含太赫兹波的双频雷达观测有助于提升云反演精确度, 并且当前太赫兹技术的发展有望满足星载太赫兹云雷达研制需求。

2.1 太赫兹主动云雷达的优点

为研究从太空到地面观测的太赫兹波双程大气衰减问题, 首先在典型标准大气模型中距离地面 7~9 km 处和 0~5 km 区域分别加入含水量 0.1 g/m³ 的冰云和 0.25 mm/h 的弱降水, 然后通过 Hans J. Liebe 提出的大气毫米波传输模型(atmospheric Millimeter-wave Propagation Model, MPM)仿真计算获得 35 GHz, 94 GHz, 238 GHz 和 340 GHz 频段双程大气衰减结果。图 1(a)给出距地面 20 km 范围内卫星下点观测时双程大气衰减的情况, 图 1(b)表示大气模型中所设定的温度、水汽压力和大气压力分布。计算结果表明: a) 35 GHz, 94 GHz, 238 GHz 和 340 GHz 频段双程大气衰减随频率升高逐步增大; b) 238 GHz 在距地面 7 km 处双程大气衰减约 8 dB, 在接近地面双程大气衰减约 24 dB。因此, 初步理论计算表明 238 GHz 频段适合于星载平台高空冰云探测。这与 Hogan 和 Battaglia 的看法一致。1999 年, Robin 等分析表明^[10], 220 GHz 大气窗口电磁波适合星载平台云遥感, 尤其适合于冰云和极地地区云探测。2014 年, Battaglia 等^[11]分析表明 G 波段适合星载平台冰晶粒子以及含水量相对少的高纬度地区或高空区域气象遥感。

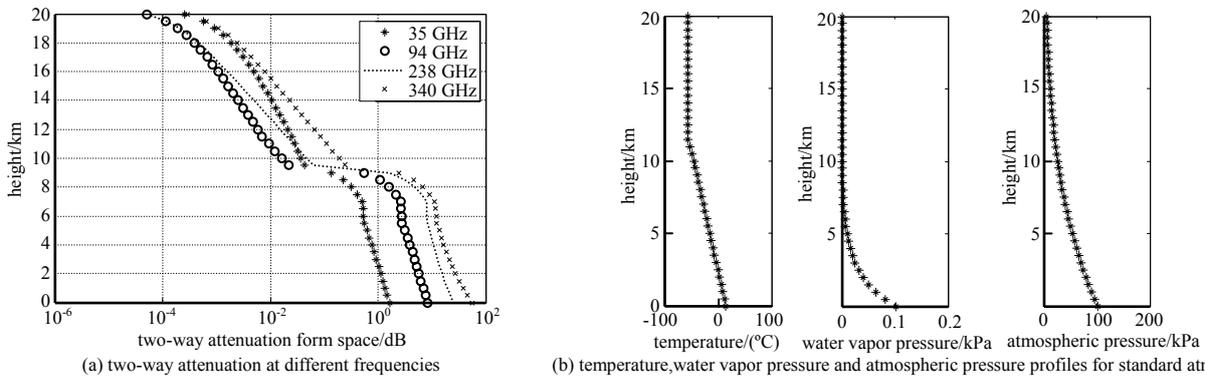


Fig.1 Two-way attenuation from space at the frequencies 35 GHz, 94 GHz, 238 GHz and 340 GHz for a standard atmosphere with cirrus and drizzle layers added at appropriate altitudes. The temperature, water vapor pressure and atmospheric pressure are shown to the right.

图 1 含冰云和弱降水情况下, 不同频段双程大气衰减计算结果

对于长波长云雷达,云粒子大多数处于瑞利散射区域,其后向散射截面与波长四次方成反比,则对于处于瑞利散射区域的云粒子探测波长越短,其探测敏感性越高。对于太赫兹波段,其波长更接近粒子尺度,云粒子会处于瑞利散射和米氏散射区域。利用 Timothy 等提出的非球形粒子后向散射理论^[12],通过离散偶极近似(Discrete Dipole Approximation, DDA)算法研究非球形粒子特性。为量化描述非球形粒子散射特性,选择子弹玫瑰状粒子和雪花状粒子作为分析的对象,其粒子尺度分布为 Gamma 分布。图 2(a)和图 2(b)分别给出 94 GHz 和 220 GHz 频段子弹玫瑰状粒子和雪花状粒子后向散射特性仿真结果。2 幅图横坐标都为 Gamma 分布下粒子最大尺度值,纵坐标则为电磁波照射到粒子所得到的后向散射截面,圆点和星形表示分别计算的选取点,选用平滑线给出散射趋势。同一频率电磁波粒子后向散射截面随粒子尺度增大而增大,但增大趋势逐步趋于平缓。这主要是因为随着粒子尺寸增大,粒子由瑞利散射区域过渡到米氏散射区域,后向散射截面由波长四次方反比关系逐渐转变至平方反比关系。对于同一尺寸不同粒子,频率高的后向散射截面大;粒子尺寸较小,处于瑞利散射区域时,220 GHz 后向散射截面比 94 GHz 时约高出 13~14 dB;粒子尺寸较大,处于米氏散射区域时,220 GHz 后向散射截面比 94 GHz 时大,但有波动。这种变化主要是因为非球形结构或米氏散射所造成。总之,同一粒子尺度下,高频电磁波比低频电磁波对粒子的探测更为灵敏。这也是云雷达技术向高频发展的一个重要原因。然而,并不是频率越高越好,通常频率越高,衰减越厉害,穿透云的能力越差。所以,太赫兹云雷达有望成为新一代云雷达发展方向。

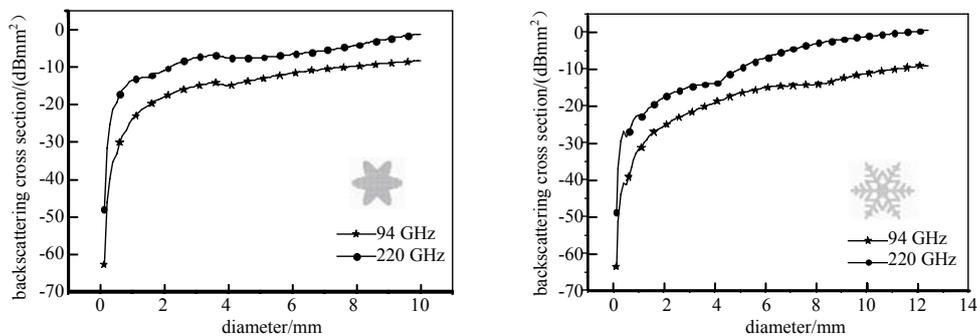


Fig.2 Mean backscattering cross section as a function of particle size for different frequencies
图 2 不同频率下,子弹玫瑰状粒子散射特性(左)和雪花状粒子散射特性(右)

另外,对于云数据反演相关内容可参看文献[10]和文献[13-15],这里仅引用其结果。基于高频电磁波相比低频电磁波对微弱粒子更为灵敏的特性,1993年 Matrosov^[16]提出利用双波长比率方法反演冰云平均粒子尺寸,2005年 Hogan^[17]等研究表明利用含 200 GHz 以上频段双频雷达,云反演精确度会有提升。综上所述,太赫兹波段适合于星载平台微弱冰云探测且有利于提升云反演精确度。

2.2 太赫兹主动测云雷达发展现状

人们早在 20 世纪 80 年代末就开始了太赫兹主动云雷达样机研制和外场试验工作。1989 年 Mead 等^[18]论述了 215 GHz 雷达系统,定量观测层积云(stratocumulus)和雾,天顶观测距离 97~1 900 m;1990 年 Mead 等^[19]研制了 225 GHz 非相参雷达系统,发射功率为 60 W,采用双极化天线,水平和垂直波瓣宽度都为 0.61°,动态范围为 70 dB,并且完成了降雪外场观测试验;2010 年 Essen 等^[20]研制了 220 GHz 全固态云雷达,用于对降雪和云进行探测,以及与现有的 35 GHz 和 94 GHz 雷达进行观测比较。另外美国 NASA 在开展 240 GHz 和 280 GHz 云雷达方面的研究工作,但尚无相关详细信息。我国在“十二五”期间也开展了太赫兹云雷达原理样机的研制。以上海无线电设备研究所为代表研制的地面原理样机具备地面天顶 1~5 km 观测能力。这些研究说明,太赫兹波可用于云观测,但受技术的限制还处在原理样机研制、外场数据获取和云反演研究阶段。

但值得注意的是,近年来太赫兹技术取得突飞猛进的发展。220 GHz 频段固态硬件输出功率已超过 100 mW,扩展互作用速调管功率放大器功率输出达到 150 W,低噪声放大器研制工作已有报道,准光环形器技术趋于成熟。因此,今后太赫兹技术的发展应能满足星载太赫兹主动有效载荷的研制需求,气象需求论证和应用技术也将随着外场试验数据的获取逐步得到突破。

2.3 一种星载太赫兹主动云雷达方案

综合前面信息,拟设计一种具备-40 dBZ 雷达反射率因子星载太赫兹主动云雷达方案。该系统组成包含电源模块、高压电源、波形产生器、频率综合器、数字信号处理模块、中频信号处理模块、太赫兹收发倍频链路、扩

展相互作用速调管放大器、准光环形器和天线等,见图 3。其中,波形产生器用于产生线性调频信号波形,与频率综合器一同为太赫兹收发倍频链路提供中频激励信号,以驱动太赫兹模块工作,太赫兹收发倍频链路用于产生太赫兹频段信号和接收混频本振信号以及回波中频信号,高压电源和扩展相互作用速调管将太赫兹信号功率放大,准光环形器用于隔离收发通道、太赫兹信号馈至天线反射面,中频信号处理模块和数字信号处理模块用于处理回波中频信号,电源模块为全系统提供所需稳压源。

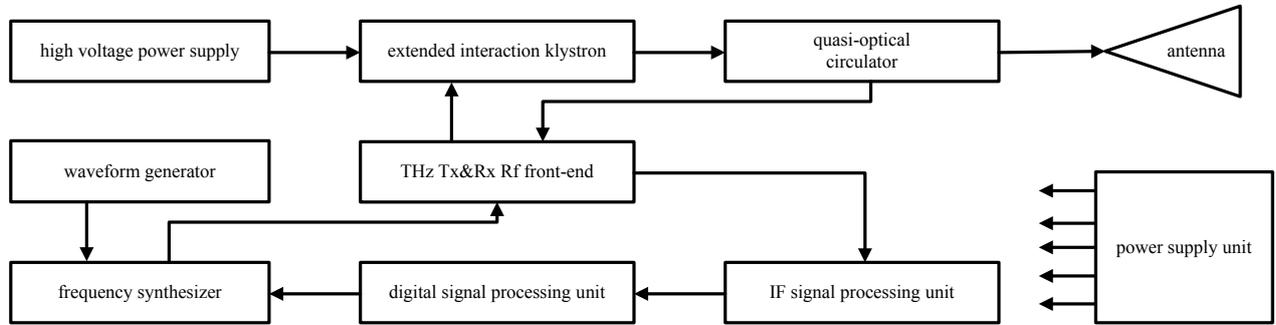


Fig.3 Block diagram of simplified terahertz CPR
图 3 星载太赫兹主动云雷达系统组成框图

根据 1962 年 Probert-Jones^[21]提出的式(1)气象雷达方程进行测云雷达参数设计。

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \left(\frac{P_t c \tau G^2 \theta \varphi}{\lambda^2} \right) \frac{|K|^2 10^{-18} Z}{R^2} \quad (1)$$

式中: \bar{P}_r 是雷达接收到的回波功率,单位为 W; P_t 是雷达发射脉冲的峰值功率,单位为 W; c 是电磁波传播速度,单位为 m/s; τ 是脉冲持续时间,单位为 s; G 是天线增益,单位为 dB; θ 和 φ 为天线俯仰和方位波束宽度,单位为 rad; λ 为雷达波长,单位为 m; R 是云体至雷达距离,单位为 m; $|K|^2$ 是云体的复折射指数因子,单位为 1; Z 是雷达反射率因子,单位为 mm^6/m^3 。

假定雷达搭载的卫星轨道高度为 600 km。在各参数权衡的基础上获得气象雷达作用距离与天线增益关系曲线。由图 4 可见,在天线增益约 65.4 dB 情况下,可满足作用距离为 600 km 的探测需要。系统具体设计参数见表 2。本系统工作频率采用太赫兹频段低端(G 波段: 110~300 GHz),大大降低天线的尺寸以及系统结构的复杂度,采用脉冲压缩方式,以降低对太赫兹源极高功率的需求,能满足极难实现的-40 dBZ 探测能力的需求。

需要说明的是,计算过程中未考虑大气衰减问题,选用云雷达有效载荷设计考虑云层顶部最小雷达反射率因子方式。对于实际探测,可根据大气衰减进行修订。因此,为推动星载太赫兹主动云雷达的工程化应用,需要解决 1 000 W 量级扩展相互作用速调管功率放大器瓶颈问题以及突破高功率固态源、低噪声放大器、高隔离度开关和系统标定等技术。

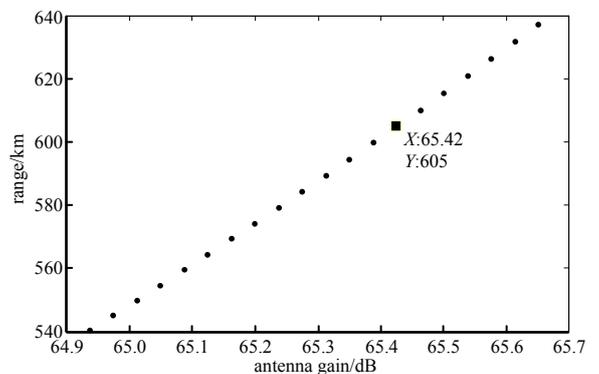


Fig.4 Maximum detection range as a function of gain of antenna
图 4 雷达作用距离与天线增益曲线图

表 2 星载太赫兹主动云雷达主要设计参数

Table 2 Main parameters of spaceborne terahertz CPR

f	altitude/km	range resolution/m	pulse width/ μs	peak power/kW	PRF/kHz	antenna gain/dB	Min. detectable reflectivity/dBZ
G-band	600	250	30	1.0	5	65.4	-40

3 总结与展望

太赫兹的大气吸收特性以及对微弱目标散射特性,决定其适合于星载平台云观测。因此,星载太赫兹主动云雷达作为当前云遥感手段的良好补充,可以在冰云等微弱目标探测方面发挥积极的作用。另外,当前遥感手段的融合以及数据处理能力的提升,也将促使太赫兹主动探测技术在气象遥感方面发挥不可估量的作用。本文分别阐

述了星载主动云雷达发展现状和趋势、太赫兹波云遥感优点、太赫兹主动云雷达研制现状,提出了一种星载太赫兹云雷达方案。值得注意的是,太赫兹主动云遥感是一个新的研究热点,需要在雷达系统方案、硬件研制、系统标定技术以及太赫兹波段云遥感需求分析和应用方面开展大量研究工作。

参考文献:

- [1] 周毓荃,赵姝惠. 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. (ZHOU Yuquan,ZHAO Shuhui. CloudSat satellite and its application in weather and cloud observation[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008,31(5):603-614.)
- [2] ALAIN Lefebvre,ARNAUD Heliere,ABELARDO Perez Albinana,et al. EarthCARE mission,overview,implementation approach and development status[C]// Earth Observing Missions and Sensors:Development,Implementation,and Characterization III. New Delhi,India:[s.n.], 2014,9264:926403-1.
- [3] SIMONE Tanelli,STEPHEN L Durden,EASTWOOD Im,et al. Next-generation spaceborne cloud profiling radars[C]// IEEE Radar Conference. Pasadena,CA:[s.n.], 2009:1-4.
- [4] SIMONE Tanelli,STEPHEN L Durden,DALE G Reinke,et al. CloudSat's cloud profiling radar after two years in orbit:performance, calibration,and processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(11):3560-3573.
- [5] 臧海佳,王旻燕,李占清. 美国对地观测系统卫星资料产品及服务[M]. 北京:气象出版社, 2011. (ZANG Haijia,WANG Minyan,LI Zhanqing. United States Earth Observing System,Satellite Data,Products and Services[M]. Beijing:Meteorological Press, 2011.)
- [6] ABELARDO Perez Albinana,ROBERT Gelsthorpe,LEFEBVRE Alain,et al. The engineering model for the multi spectral imager of the EarthCARE spacecraft[J]. Infrared Remote Sensing and Instrumentation XX, 2012,8511:1-10.
- [7] BROWN P R A,ILLINGWORTH A J,HEYMSFIELD A J,et al. The role of spaceborne millimeter-wave radar in the global monitoring of ice cloud[J]. Journal of Applied Meteorology, 1995,34(11):2346-2366.
- [8] LHERMITTE R. Attenuation and scattering of millimeter wavelength radiation by clouds and precipitation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990,7(3):464-479.
- [9] KILLAS P,CLOTHIAUX E E,ALBRECHT B A,et al. Millimeter-wavelength radars: new frontier in atmospheric cloud and precipitation research[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007,88(10):1608-1624.
- [10] ROBIN J Hogan,ANTHONY J Illingworth. The potential of spaceborne dual-wavelength radar to make global measurements of cirrus clouds[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999,16(5):518-531.
- [11] BATTAGLIA A,WESTBROOK C D,KNEIFEL S,et al. G-band atmospheric radars new frontiers in cloud physics[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014,7(6):321-375.
- [12] TIMOTHY L Schneider,GRAEME L Stephens. An update on the oceanic precipitation rate and its zonal distribution in light of advanced observations from space[J]. Journal of Climate, 2014,27(11):3957-3965.
- [13] O'CONNOR E J,HOGAN R J,ILLINGWORTH A J. Retrieving stratocumulus drizzle parameters using Doppler radar and lidar[J]. Journal of Applied Meteorology, 2005,44(1):14-27.
- [14] WESTBROOK C D,HOGAN R J,O'CONNOR E J,et al. Estimating drizzle drop size and precipitation rate using two-color lidar measurements[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010,3(3):671-681.
- [15] FIELD P R,BROWN R J,ILLINGWORTH A J,et al. Parameterization of ice particle size distributions for mid-latitude stratiform cloud[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005(131):1997-2017.
- [16] MATROSOV S Y. Possibilities of cirrus particle sizing from dual-frequency radar measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 1993,98(D11):20675-20683.
- [17] HOGAN R J,GAUSSIAT N,ILLINGWORTH A J. Stratocumulus liquid water content from dual wavelength radar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005,22(8):1207-1218.
- [18] JAMES B Mead,ROBERT E Mcintosh,DOUGLAS Vandemark,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.
- [19] JAMES B Mead,ROBERT E Mcintosh. A 225 GHz polarimetric radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1990,38(9):1252-1258.
- [20] ESSEN H,SIEGER S. A dual frequency millimetre wave radar for cloud characterization[C]// Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XV. Toulouse,France:[s.n.], 2010,7827:1-6.
- [21] PROBERT-JONES J R. The radar equation in meteorology[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1962, 88(378):485-495.

作者简介:



王 平(1988-),男,安徽省界首市人,工程师,从事太赫兹主动探测技术方面研究工作,主要开展太赫兹雷达系统方案设计、系统测试、系统仿真、云雷达信号处理和准光设计方面的研究工作。已发表太赫兹相关论文6篇,申请专利5项.email:wangpingxixing@163.com.

王海涛(1978-),男,山东省烟台市人,研究员,主要从事雷达和通信设备系统仿真和信号处理。先后主持或参与太赫兹主动探测技术相关项目十余项,曾获得国防科学技术进步二等奖1项、三等奖2项。

第十三届全国激光技术与光电子学学术会议征文通知暨 2017 中国光学重要成果发布会

中国激光杂志社和德国慕尼黑国际博览集团将于2018年3月11日-14日(11日报到)在上海举办光学前沿——第十三届全国激光技术与光电子学学术会议(LTO2018)。该学术会议将与2018年慕尼黑上海光博会同期举行。

会议面向全国高等院校、研究院所以及高新技术企业征集高水平中英文论文,被录用的每篇文章至少需要一名代表注册参会。(投稿要求与出版详情参见会议官方网站)。

会议主办单位: 中国激光杂志社 慕尼黑博览集团

大会名誉主席: 周炳琨院士 范滇元院士 姜会林院士

大会共主席: 陈卫标研究员 张镇西教授 钟敏霖教授 王璞教授 邱建荣教授

会议文章出版: *Chinese Optics Letters*(SCI, EI 收录)、《光学学报》(EI 收录)、《中国激光》(EI 收录)、《激光与光电子学进展》(中文核心期刊)、*High Power Laser Science and Engineering*(ESCI 收录)、*Photonics Research*(SCI 收录)、《光电工程》(中文核心期刊)、《光散射学报》(中文核心)、《光子学报》(EI)、《强激光与粒子束》(EI 收录)、*Frontiers of Optoelectronics*(SCI, EI 收录)、*Photonic Sensors*(EI 收录)、《光学技术》(中文核心期刊)、《激光技术》(中文核心期刊)、《光电子技术》(中文核心期刊)、《应用光学》(中国科技核心期刊)、《太赫兹科学与电子信息学报》(中国科技核心期刊)、《激光生物学报》(中文核心期刊)、《光学与光电技术》(中国期刊核心)、*Optoelectronics Letters*(SCI, EI 收录)、《光电子激光》(EI 收录)

投稿地址: 参会代表请先通过会议网站 <http://www.opticsjournal.net/Columns/LTO2018.htm> 将摘要上传,全文投稿请通过会议主页“期刊支持”栏目 <http://www.opticsjournal.net/Columns/LTO2018.htm?action=list&typen=LTO2018Journalsupport> 选择目标期刊在线投稿,并在备注栏中标明“参与2018LTO会议”。

投稿截止日期: 2018年1月14日

预注册截止日期: 2018年2月4日(需网上登记并交费)

会议主题/征稿范围:

- 1、激光物理与技术(激光物理、激光技术、超快激光物理与技术、阿秒物理与技术、强激光与物质相互作用)
- 2、先进全固态激光器及新型激光器(半导体泵浦固体激光器、高功率光纤激光器、超短脉冲激光器)
- 3、半导体激光器与先进光电子器件(宽禁带半导体激光器及相关研究、近、中红外半导体激光器及相关材料、照明用大功率高效半导体二极管及相关研究、新型可见光通信白光LED及其它新型半导体光电与能源器件、有机半导体光电器件与半导体量子点光电器件)
- 4、先进激光材料、薄膜及元器件,新型功能光纤与器件(激光光场新颖特性、光场调控及应用、光束传输与控制)
- 5、激光光场调控、传输及应用(激光光场新颖特性、光场调控及应用、光束传输与控制)
- 6、激光先进制造技术(激光微纳制造、激光增材制造、激光焊接)
- 7、生物医学光子学分析诊断技术与临床应用(精准医学中的检测新技术及仪器、纳米生物光子学在细胞及动物上的应用研究、新型光动力诊断药物及治疗、多模态生物医学光学成像技术、生物医学光子学新技术与方法在医学图像识别与处理中的应用、生物信息精准获取与传感技术)
- 8、空间激光通信及激光雷达(自由空间激光通信、大气激光通信、室内与可见光通信、激光雷达、精密激光测距)
- 9、红外技术(红外成像技术、红外材料与器件、红外探测技术、微光夜视技术)
- 10、量子光学(量子信息、量子模拟和量子计算、原子频标和精密测量物理、单光子探测及其应用)
- 11、太赫兹技术(太赫兹波与物质相互作用,太赫兹激光器,宽谱太赫兹光源,太赫兹检测,太赫兹功能器件与传输,太赫兹成像与通信,太赫兹天文应用等)
- 12、机器视觉(机器视觉、VR)

通信地址: 上海市嘉定区清河路390号 中国激光杂志社 201800

学术会议联系: 彭一莱: 021-69918691 pengyizhu@siom.ac.cn 马代明: 021-69918426 madaiming@siom.ac.cn

赵峻锋: 021-69918166 zhaojunfeng@siom.ac.cn

赞助联系人: 高福海: 021-69918011 gfhai@siom.ac.cn

网站: <http://www.opticsjournal.net/Columns/LTO2018.htm>