

W 波段毫米波云雷达技术的研究进展

王金虎^{1,2,3,4} 魏鸣^{1,2,3} 张其林^{1,2,3} 李祥超³

(1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 2 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044; 3 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044; 4 南京信息工程大学大气科学与环境气象国家级实验教学示范中心, 南京 210044)

摘要 毫米波雷达相比于厘米波雷达对非降水云的观测具有更高的灵敏度, 因此世界发达国家已经广泛利用毫米波雷达进行云的观测实验。国内的毫米波云雷达受器件及加工工艺的限制仍处于发展阶段, 在此背景下本文从地基、机载以及星载 3 个方面对国内外 W 波段毫米波云雷达进行总结, 根据毫米波雷达的天线、发射电路、接收电路以及信号处理 4 个方面分析其原理框图及性能参数, 最后利用英国 Chilbolton 观测场的 94 GHz Galileo 雷达对 2008 年 4 月 4 日的非降水云进行回波数据的分析, 结果表明 Galileo 毫米波雷达能够很好地对云以及雾进行探测, 其结论为国内 W 波段毫米波云雷达的设计提供借鉴。

关键词 W 波段; 毫米波雷达; 云; 射频电路

中图分类号: P415.2 DOI: 10.19517/j.1671-6345.20160526 文献标识码: A

引言

云不仅在气候系统的能量平衡中起到关键作用而且也以其他方式影响着大气^[1], 如云是地球水循环的关键链路; 云以及降水重新分配地球的水资源; 云中存在着大量的化学反应, 其对于对流层化学产生重要的作用; 地表辐射的微量气体大多发生在云中, 但降水云返回了特定的物质以及水溶性气体到地球表面; 通过云的散射能够提高主动紫外太阳辐射的光化学反应^[2]。云分类中的高空卷云通常覆盖地球表面 20%, 其通过辐射效应对气候变化以及大气结构起到重要的作用^[3], 地球与卫星通讯的质量会因大气冰晶粒子而降低, 即传输的极化电磁波会发生差分相移(differential phase shift)、衰减(attenuation)以及去极化(depolarization)^[4], 但是由于冰云的介电常数远小于水云粒子的介电常数, 因此探测冰云的难度更大^[5-9]。在冰云探测手段中, 毫米

波雷达以其较高的时间和空间分辨率而得到广泛的应用^[10-13], 但国内的毫米波雷达尤其在 94 GHz 频率以上均未得到广泛地应用, 原因在于其设计的难度和加工工艺的限制。本文将在地基、机载以及星载 3 种方式下对 W 波段毫米波雷达的系统进行综述并分析其设计的原理及性能参数, 以期国内毫米波云雷达的设计提供参考。

1 国外 W 波段毫米波云雷达技术发展

气象雷达的使用最早可追溯到第 2 次世界大战结束之后, 当时云雨回波被视为军事目标的杂波信号, 后来气象学家意识到雷达具有大范围探测降水的潜在应用并进行军事雷达向气象雷达的改造工作。毫米波云雷达系统按照搭载的平台可分成地基毫米波云雷达、机载毫米波云雷达以及星载毫米波云雷达, 下面分别进行论述。

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家重点研发项目(2014CB441405)、国家自然科学基金项目(41675029; 41575004)、电网雷电预警技术研究及雷电预警系统开发(K-YN2013-186)、配电网综合防雷体系研究与工程示范(YNKJQQ00000274)、南京信息工程大学人才启动基金资助项目(2016r028)、江苏省自然科学基金资助项目(BK20170945)、2017 年大气科学与环境气象实验实习教材建设项目(SXJC2017B03)、南京信息工程大学 2017 年度地球科学虚拟仿真实验教学课程建设项目(XNFZ2017C02)、中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室开放基金项目(KDW1703)资助

作者简介: 王金虎, 男, 1987 年生, 博士, 主要从事毫米波雷达系统、粒子散射理论计算与测量以及微波遥感的研究, Email: goldtigerwang@nuist.edu.cn

收稿日期: 2016 年 9 月 9 日; 定稿日期: 2017 年 3 月 9 日

1.1 地基毫米波云雷达系统的设计

1.1.1 CPRS 雷达

CPRS(Cloud Profiling Radar System; 云廓线雷达系统)为携带式,全极化多普勒雷达(工作在 W 波段以及 Ka 波段),其实物照片如图 1 所示^[14-15]。

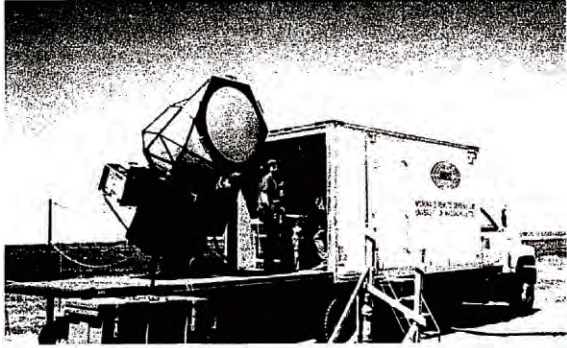


图 1 CPRS 云廓线雷达

CPRS 中 W 波段子系统的原理框图如图 2 所示,图 2 中的 95 GHz 雷达子系统使用 1.5 kW 峰值功率的 EIK 放大器以及自锁环形器构成网络以实现发射极化的灵活控制,该设计允许雷达在单天线下工作。类似 33 GHz 的子系统,95 GHz 雷达子系统能够发射水平以及垂直极化的脉冲。1.5 kW 分布互作用(或扩展)速调管(EIK: Extended Interaction Klystron)放大器能够实现高功率输出要求。铁氧体转换开关(Ferrite switches)具有较高转换速度 (<100 ns)以及较小的插入损耗 (<0.3 dB)。不同于 33 GHz 雷达子系统,95 GHz 雷达子系统的所有源都参考到同一个 120 MHz 恒温晶振,因此 95 GHz 雷达子系统全相干,双通道接收机以及 IF 处理器与 33 GHz 雷达子系统完全一致。

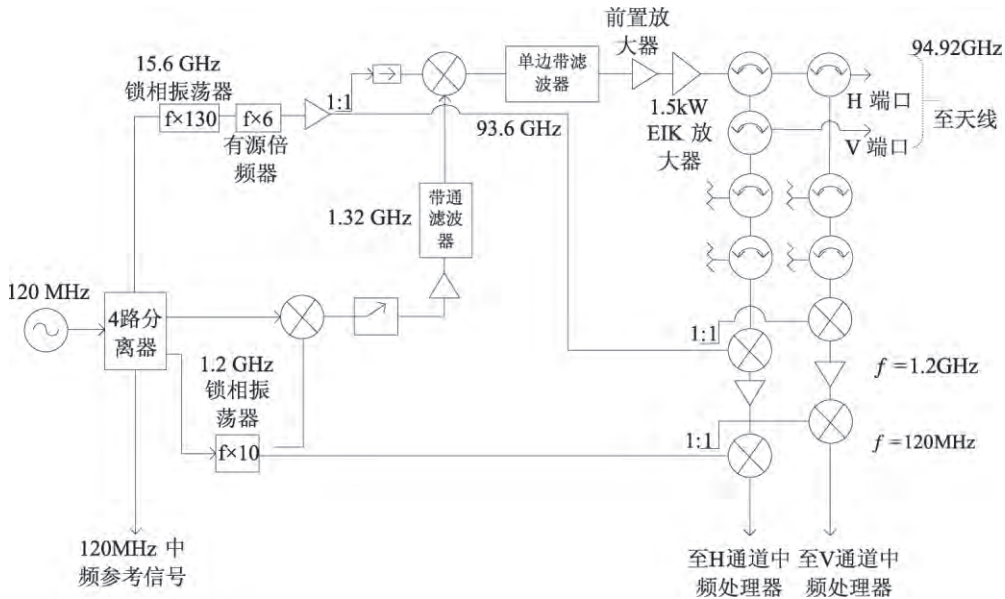


图 2 CPRS 中 W 波段子系统原理

1.1.2 W 波段 ARM 云雷达

WACR(W-band ARM Cloud Radar)包含 8 个主要的子部分:RF 单元包含的毫米波部分、IF 部分以及电源供电部分;被安装在聚丙烯天线罩内的 24 英寸(60.96 cm)直径的卡塞格伦天线;保证天线罩内无降水的横流风机;满足角反射器定标要求的远程可调平面反射器;配备数字接收机的主机;用于监测探测的 RF 信号的示波器;确保射频单元温度稳定的冷却装置;不间断电源供电装置(UPS)。WACR 的原理框图如图 3 所示^[16],其中发射机采

用了扩展相互作用速调管放大器(EIKA: Extended Interaction Klystron Amplifier),该放大器既有传统速调管的高功率、高效率、自激振荡易于抑制等优点外还有磁场简单、结构紧凑和易于加工等技术优势,雷达采用低噪声系数的噪声放大器。

1.1.3 MMCR 云雷达

MMCR(Millimeter Wave Cloud Radar; 毫米波云雷达)的基本原理框图如图 4 所示^[17],其中主要部件的特征以及功能如下:

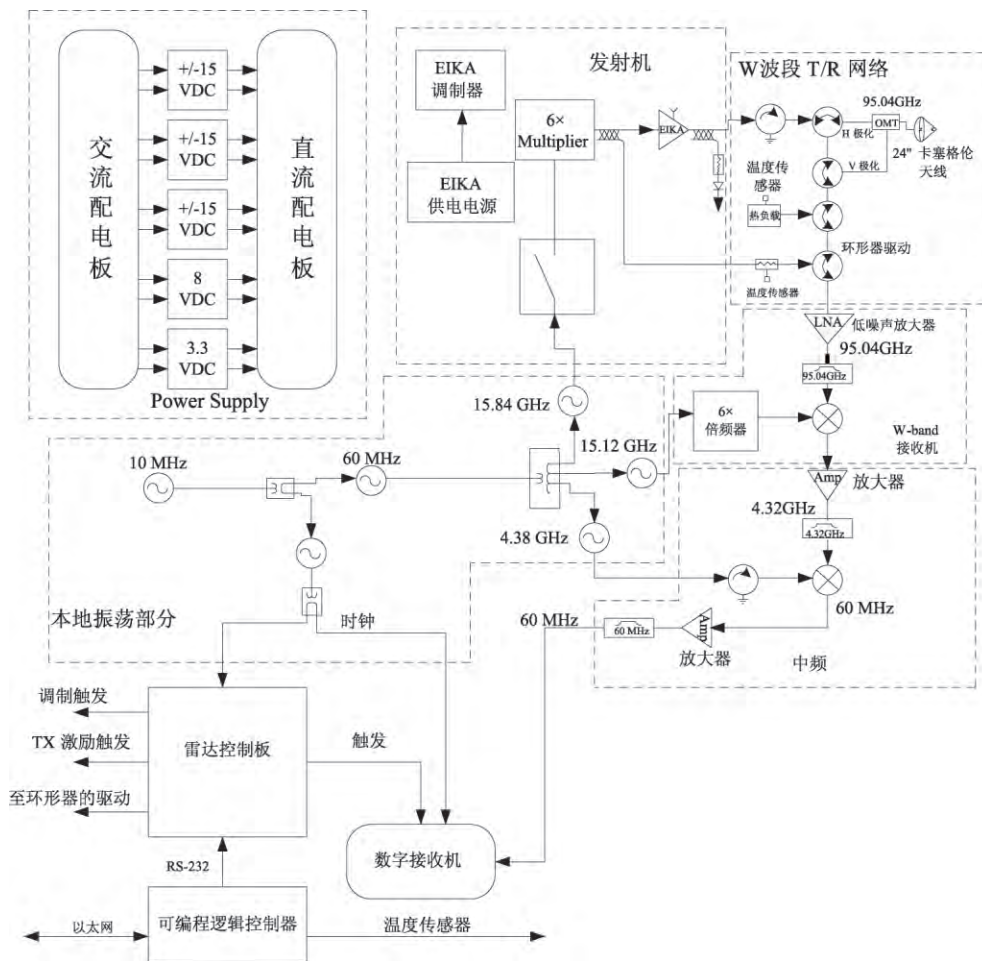


图 3 WACR 系统原理

中频接收机/调制器机箱 (Intermediate Frequency Receiver/Modulator Chassis): 调制器包括了脉冲幅度调制器和二进制相位调制器(用于脉冲的编码)。60 MHz 的中频信号输出功率为 10 dBm。接收机具有数字控制的消隐电路、高增益中频放大器以及单独的 I、Q 基带通道, 每个带宽具有单独的模拟增益控制。消隐电路的设计是用来防止瞬态信号对接收机的 Bessel 滤波器产生干扰, 其隔离度优于 70 dB。IF 以及接收机放大器具有大约 72 dB 的组合增益, 噪声系数小于 12 dB。

射频相干上/下变频 (Radio Frequency Coherent Up/Down Converter): 60 MHz 的基带输入信号通过超外差上变频链路后被转换为 34.86 GHz 的 RF 输出信号。上变频链路采用二级变频(本振频率为 2 GHz 以及 16.4 GHz)。32.8 GHz 信号是由一个倍频器产生。下变频器使用同样的 IF 信号

混频到 60 MHz 输出, 该下变频过程可以抑制边带噪声。整个接收链路的增益大约为 7 dB, 噪声系数为 5 dB, 所有的 RF 信号使用 WR-28 型波导进行传输。

行波管放大器(TWTA: Traveling Wave Tube Amplifier): 发射机为一具有高相位稳定性和低纹波幅度的高增益放大器。射频峰值功率为 100 W, 在使用最长脉冲宽度的相位编码脉冲波形时的最大占空比为 25%。该管子运行在饱和状态下并且具有多个 RF 测试接口用于检测发射脉冲(用于校准)。IEEE-488 控制总线在计算机的命令下控制各个单元。具有数字显示功能的前面板可用于检测内部的电压, 电压值可以通过 IEEE-488 总线来获得, 该单元的保护电路在 RF 端输出不匹配时关断脉冲。

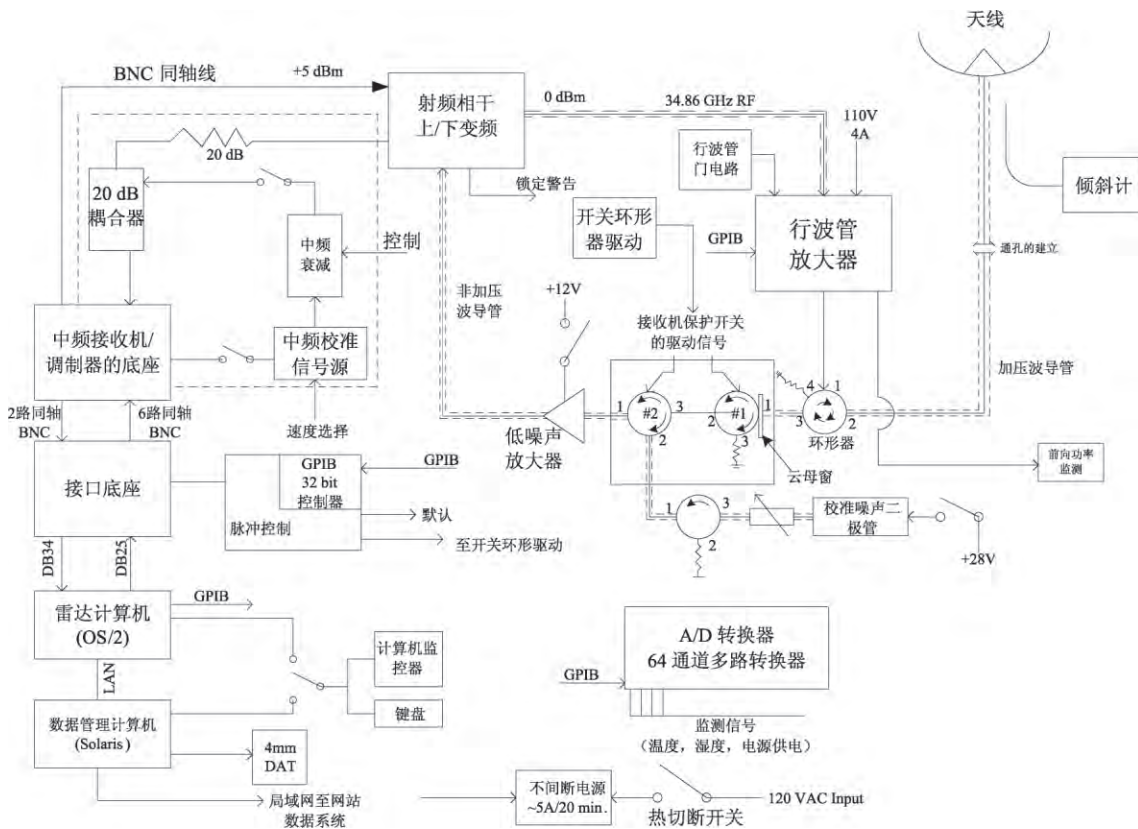


图 4 NOAA ETL 设计的 ARM MMCR 系统原理

天线:天线为垂直指向的抛物面,具有后置的馈源以及卡塞格伦副反射器。在 SGP (Southern Great Plains)部署的 10 英尺(25.4 cm)直径天线具有 57.2 dB 的增益和 0.19°的波束宽度,而在 NSA (North Slope of Alaska)和 TWP(Tropical Western Pacific)部署的天线直径为 6 英尺(15.24 cm),增益为 53.4 dB,波束宽度为 0.29°。这些站点的 MMCRs 第一旁瓣电平优于 18 dB。当天线在热带地区使用时,吹风装置使天线仓内空气流通以减少湿气对雷达的影响。倾斜仪被安装到天线上以测量倾斜的程度。

发射/接收/定标波导部分(Transmit/Receive/Calibration Waveguide Sections):传输用的波导被密封在 5 平方英寸(32.26 cm²)空间内。TWTA (行波管放大器)的射频输出功率直接通过波导环形器(被动的 TR 转换开关)送到天线端,天线的接收能量直接通过环形器及其后的一组主动开关环形器后送至前置放大器。开关环形器在发射脉冲工作时作为主动式隔离器,其转换时间约为 600 ns,每一个开关提供大约 25 dB 的隔离度,以避免敏感的前置

放大器遭到损坏。在校准过程中,开关也能够被用于将定标的噪声源注入到接收机中。

低噪声前置放大器(LNA:Low Noise Pre-Amplifier):前置放大器是一个高增益、低噪声放大器,用来提高接收机的灵敏度。LNA 具有 33 dB 的增益,噪声系数大约为 3 dB,LNA 的最大输入电平为 +15 dBm。

中频接收机校准:中频信号源被注入到接收机中以参数化中频放大器(其作为校准的一部分)。

1.1.4 Lhermitte 研制的地基毫米波云雷达

图 5 显示了迈阿密大学的 Lhermitte 研制的地基 W 波段毫米波云雷达的实物图^[18],其原理框图^[19]如图 6 所示,雷达的工作频率为 93.95 GHz,使用的卡塞格伦天线口径为 3 英尺(0.9144 m),天线 3 dB 波束宽度为 0.27°,两个天线的隔离度超过 80 dB。由于卡塞格伦天线馈电结构的特点使得发射机以及接收机能够直接连接到各自天线的后端,该连接方式能够最小化波导对信号传输产生的损耗(3 dB/m),雷达天线能够倾斜以及沿着任意方位角旋转。虽然当时 94 GHz 磁控管(10 kW 的峰值功



图 5 Lhermitte 研制的地基 W 波段雷达

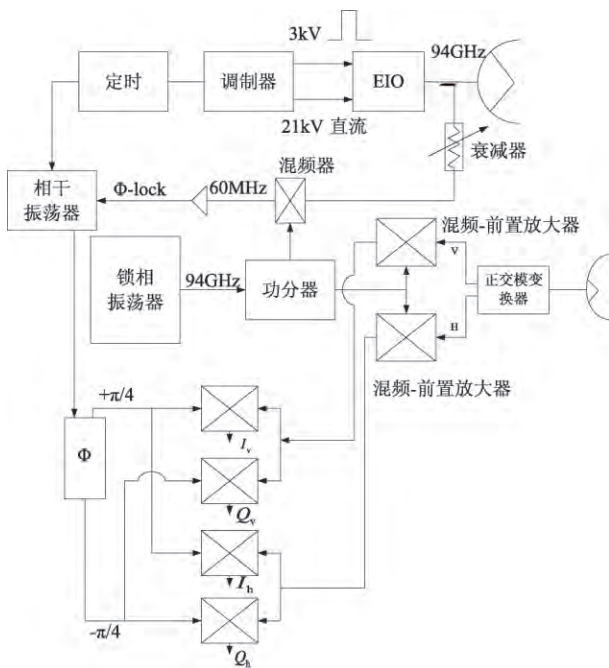


图 6 Lhermitte 研制的地基 W 波段雷达系统原理

率)能够获得,但是 Lhermitte 并没有采用这类磁控管,原因在于其寿命较短且很难获取脉间的相位噪声。Lhermitte 也没有采用 EIA (Extended Interaction Amplifier;分布作用放大器),虽然其具有高峰值功率(1 kW 峰值功率,5 W 平均功率)、低相位噪声以及脉冲相干放大的优点,但 EIA 的价格昂贵。相比而言,EIO(Extended Interaction Oscillator;分布作用振荡器)能够获得与 EIA 相同的功率但价格便宜,并且 EIO 可以辅助相位锁相电路。接收机中

的低噪声混频前置放大器将 RF 回波信号转换为 55 MHz 的中频信号,混频信号为 94 GHz 本地振荡器 (STALO: Stable Local Oscillator) 的稳定输出,STALO 为耿氏二极管锁相振荡器 (PLO: Phase Locked Oscillator),PLO 信号的频率稳定性较高并且以具有低相位噪声的晶体振荡器作为参考。混频前置放大器的双边带噪声系数为 6.5 dB,等效接收机噪声功率为 -93 dBm。

1.1.5 千叶大学 FMCW 94 GHz 云廓线雷达

图 7(彩页)显示的 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave;调频连续波)雷达可探测微弱云的散射^[20]。两个 1 m 直径的抛物面天线分隔间距为 1.4 m,分别用来发射和接收电磁波,天线的方向均固定垂直向上。该雷达观测云的高度范围为 0.3~15 km,距离分辨率为 15 m,探测的多普勒速度小于 10 m/s。采用调频连续波雷达的原因在于其比脉冲雷达具有更高的灵敏度。图 8 为发射机以及接收机的原理框图,表明所有的信号(包括发射的 FMCW 信号以及本地频率)均参考于两个信号发生器(140 MHz 范围)。该雷达具有高功率、高灵敏度的特点,前置放大器的噪声系数为 5.5 dB。

1.2 机载毫米波云雷达系统的设计

1.2.1 小型机载全固态 95 GHz FMCW 雷达系统

图 9(彩页)为 ProSensing 公司发展的低功率全固态 W 波段雷达^[21],该雷达可用于云和降水的机载测量,该系统应用了简单的同步检波接收机,将其设计在一个手掌大小的封装内以最小化元件以及减少系统的功率损耗。基于 FPGA 的数字接收机/信号处理器能够快速计算反射率并且得到脉冲对反演速度产品。该小型 FMCW 雷达系统的原理框图如图 10 所示,发射机中频信号从 15.8 GHz 上变频至 94.8 GHz,之后被 300 mW 的 IMPATT 二极管放大器进行放大。毫米波 I/Q 检波器被用来替代简单的混频器,以避免无用的上边带噪声。中频偏移通过发射机和接收机的本地振荡分别偏移 4 MHz 来实现。毫米波接收机包括了 LNA(低噪放)、同步检波探测器、x6 的本振发生器以及 IF 放大器,该接收机被封装在一个微波集成电路中,总的重量不超过 120 g。雷达的射频和 IF 部分被安装在玻璃纤维的吊舱内,其制造商为 Zivko Aeronautics,吊舱以及射频部分的重量为 36kg。

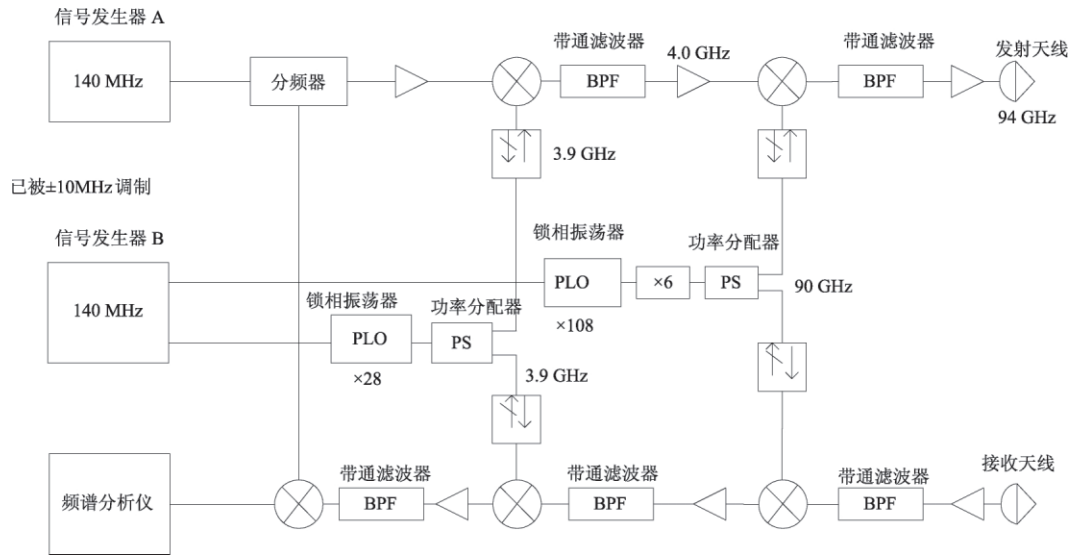


图 8 FMCW 云雷达发射机以及接收机部分原理

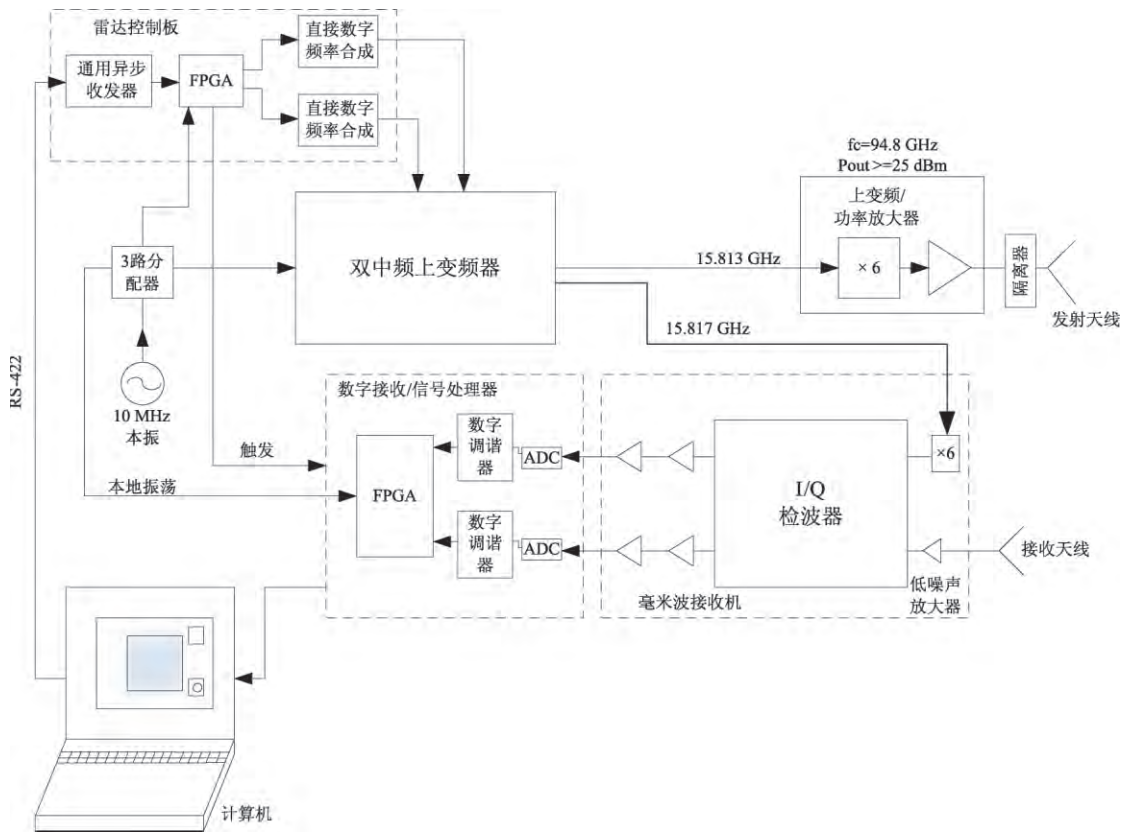


图 10 FMCW 云雷达系统原理

1.2.2 SPIDER 95 GHz 机载云廓线雷达系统

日本通信实验室 2000 年研制的机载 W 波段 CPR 雷达工作在 95 GHz,该雷达被命名为 SPIDER (Super Polarimetric Ice-crystal Detection and Ex-plication Radar:冰晶探测与反演的高性能极化雷

达),SPIDER 雷达的系统框图如图 11 所示^[22],SPI-DER 雷达包含单个天线、RF 单元、IF 单元、数据处理系统以及其他的子系统,该雷达具有全极化以及多普勒探测能力。天线系统对正交极化信号具有较高的隔离度,天线的馈电部分采用铁氧体开关环形

器网络,两个相同的接收机通道可实现多参数测量的能力,天线为偏馈的格里高利(Gregorian)天线,其主反射面的直径为 40 cm,天线具有 49 dBi 的增

益,半功率波束宽度为 0.6° ,该天线能够实现两种极化的探测方式。

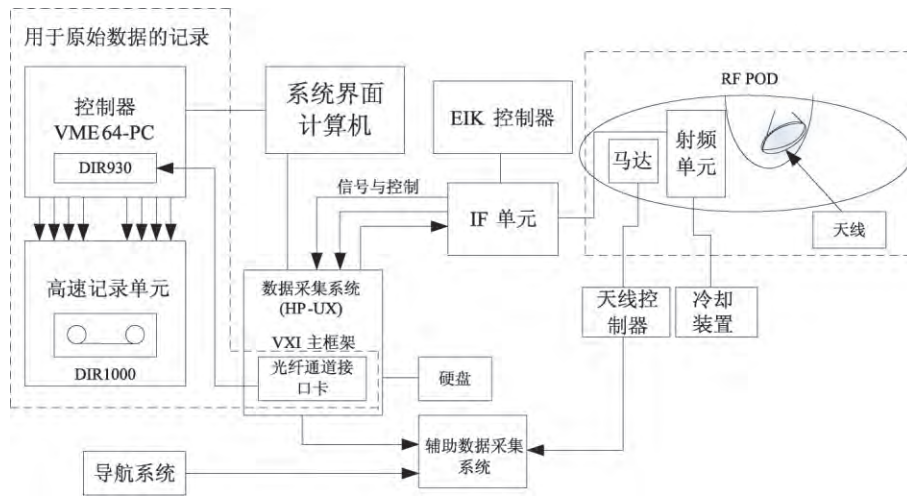


图 11 SPIDER 雷达系统原理

1.2.3 HIAPER 云雷达

图 12(彩页)为 NSF/NCAR 的 GV HIAPER (Gulfstream-V High-performance Instrumented Airborne Platform for Environmental Research)飞机^[23],HIAPER 云雷达的系统框图如图 13(彩页)所示,飞机的吊舱内放置天线以及底座、接收机、发射机以及大部分的数据系统。空间扫描通过旋转的反射器平板(安装在天线平面的斜 45° 方向上)加以实现,该方法能够减少损耗、费用以及复杂的旋转关节问题,反射平板不仅能够将雷达的波束从水平变到垂直,而且允许雷达的波束在方位方向上变化。在设计 HIAPER 雷达天线时主要考虑了以下几种天线:包含主焦点的抛物面天线;卡塞格伦天线以及偏馈的格里高利天线;lens(透镜)天线。注意到平面阵列天线不能被考虑,原因在于这类天线不能实现快速转换极化的能力。毫米波频率 lens 天线相比于所有的抛物面天线(不含偏馈的格里高利天线)在峰值旁瓣电平以及交叉极化隔离度上具有优越的性能,而偏馈格里高利天线的复杂度以及排列精度的要求使得该天线无法用在机载雷达设计中,因为飞机吊舱容易振动以及受到外界温度变化的影响。虽然 lens 天线通常更重而且具有更大的 f/D 的比率,但是飞机吊舱内有足够的空间,且承重能力也较强。

1.3 星载毫米波云雷达系统设计

搭载毫米波云雷达的 Cloudsat 卫星如图 14(彩页)所示,Cloudsat 是由 NASA(National Aeronautics and Space Administration;美国国家航空航天局)的 JPL(Jet Propulsion Laboratory;喷气推进实验室)以及 CSA(Canadian Space Agency;加拿大太空局)联合设计的卫星仪器,搭载的云雷达(CPR)能够获取全球的垂直云结构及其变化特征^[24]。CPR 云廓线雷达包含以下几个子系统:射频电路子系统(RFES:Radio Frequency Electronics Subsystem);高功率放大器(HPA:High-Power Amplifier);天线(Antenna);数字化子系统(DSS:Digital Subsystem)。CPR 雷达的简化框图如图 15 所示,上变频

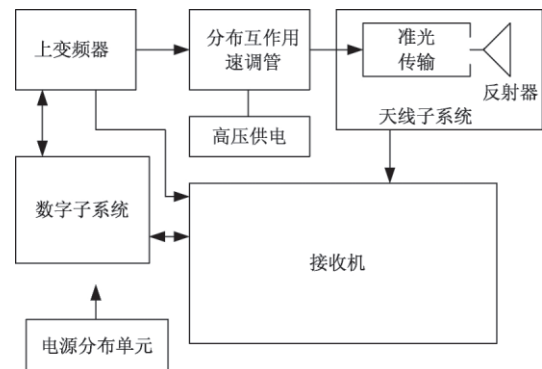


图 15 CPR 简化的框图

器将 DSS 产生的 10 MHz 振荡信号上变频到 94 GHz 脉冲调制信号。MMIC 功率放大器将发射的信号放大到约 200 mW。接收机从天线处获得接收的回波信号后下变频至中频信号。MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit; 单片微波集成电路) 低噪声放大器 (LNA) 提供初级放大, 由于采用第一级 LNA 的增益足够大以至于后面放大器对系统的噪声贡献很小。下变频后的中频放大器采用对数放大器, 其能够提供较高的动态范围^[25]。

2 国内 W 波段毫米波云雷达技术发展

国内的毫米波云雷达起步相比国外较晚。安徽四创电子股份有限公司基于 863 项目“机载气象雷达云雨探测应用系统”研制了我国首部机载 94 GHz 毫米波云雷达, 该雷达采用全相参多普勒体制, 固定的水平极化发射, 同时接收回波的水平极化 (同极化) 分量和垂直极化 (正交极化) 分量, 即采用“单发-双收”极化体制, 双路接收机同时接收后向散射回波的同极化和正交极化分量, 经处理后可同时给出云目标的反射率因子、线性退极化比、平均径向速度和速度谱宽等重要参数, 为云目标探测和大气科学研究工作提供更加有效的探测手段。机载 W 波段雷达的示意图如图 16 (彩页) 所示。

南京信息工程大学“雷达与卫星导航团队”在国家科技部公益性 (气象) 行业专项“毫米波云雷达关键技术研究”项目支持下, 自主研制了 94 GHz 毫米波测云雷达系统, 目前正处于紧张的调试以及定标阶段。除了 94 GHz 毫米波云雷达以外, 中国航天科工二院 23 所固态毫米波测云雷达 (35 GHz) 赶赴西藏自治区那曲地区的国家气象基准站, 作为主力设备参与了 2015 年度青藏高原科考试验, 该雷达利用云、雾、弱降水对电磁波的散射作用, 对 30 km 范围内的云、雾、雨等气象目标的空间位置与分布、强度、速度等气象数据进行探测^[10], 中国电子科技集团公司第十四研究所国睿集团研制的 35 GHz 毫米波测云雷达也已广泛应用于气象业务中。

3 W 波段毫米波云雷达探测数据分析

利用英国 Chilbolton 观测场的 94 GHz Galileo

雷达对 2008 年 4 月 4 日的非降水云进行观测 (时间单位均采用世界时 (UTC))。图 17 (彩页) 为 94 GHz 雷达的观测结果, 由图可知 94 GHz 雷达仅探测到 1 km 以及 7 km 处很少量的云, 与此同时给出了近地面处存在 -40 dBz 反射率因子、其速度场比较杂乱、正负速度交错的具有湍流特征的气象目标物, 分析认为近地面处为雾。

4 结论与展望

按照 W 波段毫米波云雷达系统搭载平台的不同分别对地基毫米波云雷达、机载毫米波云雷达以及星载毫米波云雷达进行了国内外研究进展论述, 总结给出国内外 W 波段毫米波云雷达设计的原理框图及实物照片, 国内外毫米波云雷达设计时主要考虑天线、发射链路、接收链路以及信号处理 4 个部分, 雷达性能参数的优劣也主要由这几个部分决定, 最后给出英国 Chilbolton 观测场的 94 GHz Galileo 雷达对非降水云的观测与结果分析。国外在更高频率雷达 (大于 220 GHz) 的探索研究上已经取得了一定的成果, 比如日本国家信息和通信技术研究所 (NICT; National Institute of Information and Communications Technology) 开发的大气 THz 辐射分析和仿真模型软件 AMATERASU (model for atmospheric terahertz radiation analysis and simulation) 分析认为 THz 是遥感反演水汽的最佳频段, 并且进一步推测 THz 波可能是观测冰云的最佳方法, NICT 的研究人员分析认为由于 THz 频段的波长 (30 μm ~ 3 mm) 和冰云粒子的典型尺寸处于同一个量级, 因此在冰云的观测上, THz 波可能比 94 GHz 毫米波雷达具有更大的优势。通过进一步的分析表明, 亚毫米波仪器对于尺寸大于 100 μm 的粒子很敏感, 而 THz 雷达则可以探测到冰晶粒子尺寸小到 10 μm 的量级。但目前而言, THz 气象雷达仍然不会像毫米波雷达那样广泛使用, 原因在于 THz 波通过大气层时衰减更严重, THz 器件的成本更高且大功率辐射源较难获取。国内毫米波雷达尤其在 94 GHz 雷达的硬件设计、软件仿真等领域仍需不断地探索与改进, 提高毫米波雷达的使用寿命、降低研制的费用、提高毫米波雷达探测数据的可靠性等问题仍需几代气象工作者做出不懈的努力。

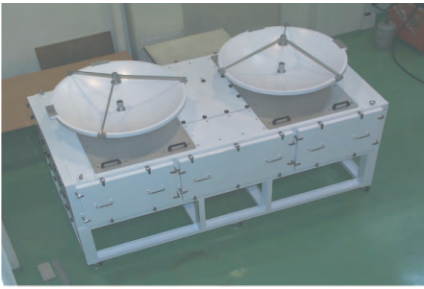


图 7 94 GHz FMCW 云廓线雷达



图 9 95 GHz 云雷达搭载在 CIRRAS Twin Otter 的飞机机翼



图 12 HIAPER 云雷达

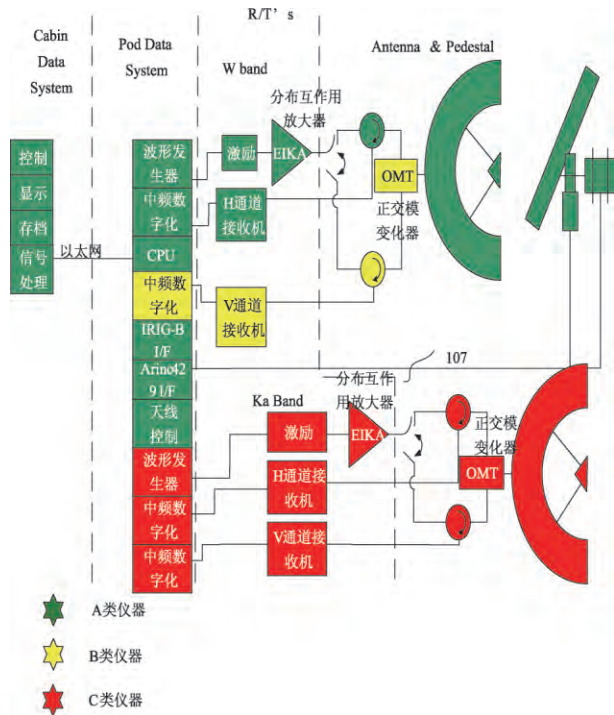


图 13 HIAPER 云雷达系统原理

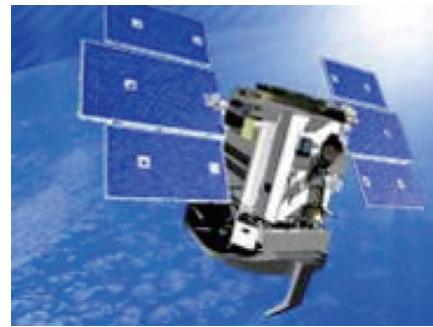


图 14 Cloudsat 卫星

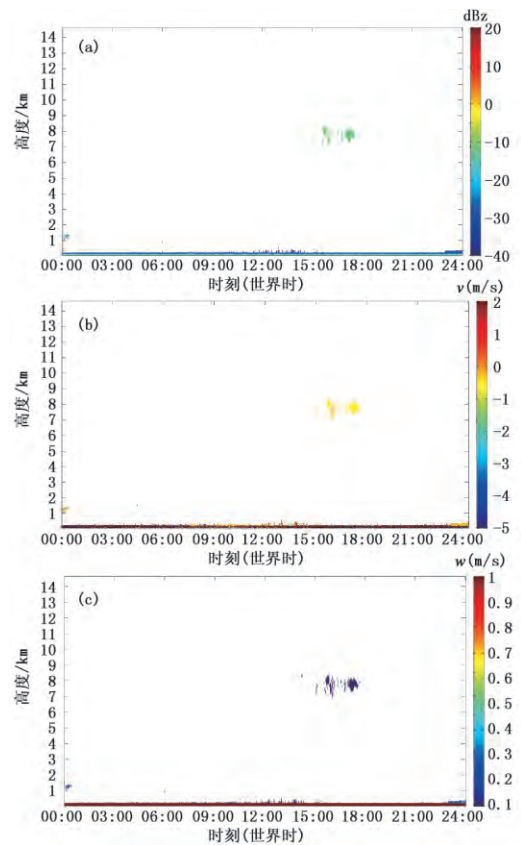


图 17 2008 年 4 月 4 日 94 GHz Galileo 雷达探测非降水云: (a) 雷达反射率因子, (b) 多普勒速度, (c) 速度谱宽

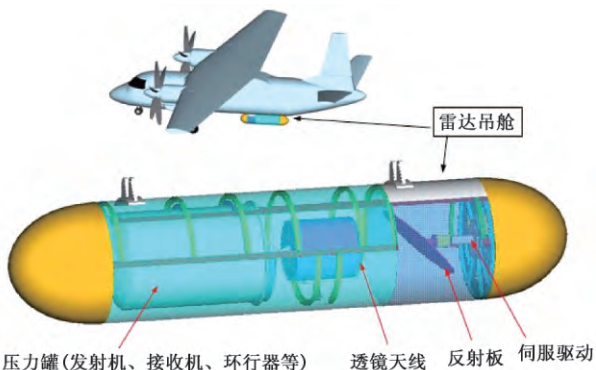


图 16 机载 W 波段雷达示意

参考文献

- [1] 汪宏七,赵高祥.云和辐射 I 云气候学和云的辐射作用[J].大气科学,1994(S1):910-932.
- [2] Madronich S. Photodissociation in the atmosphere: 1 Actinic flux and the effects of ground reflections and clouds [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1987, 92(D8): 9740-9752.
- [3] Stephens G L, Tsay S C, Stackhouse Jr P W, et al. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback [J]. Journal of the atmospheric sciences, 1990, 47(14): 1742-1754.
- [4] Oguchi T. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors [J]. Proceedings of the IEEE, 1983, 71(9): 1029-1078.
- [5] 王金虎,葛俊祥,祝潇,等.粒子取向以及空气含量对卷云雷达反射率因子的影响分析[J].红外与毫米波学报,2016,35(1):78-86.
- [6] Wang Jinhu, Ge Junxiang, Wei Ming, et al. Study of the relationship between IWC and Z for nonspherical ice particles at millimeter wavelength [J]. J Trop Meteorol, 2016, 22(S1): 78-88.
- [7] Wang Jinhu, Ge Junxiang, Wei Ming. Theoretical Study on Single-Scattering Properties of Ice Particles of Different Orientation at 94 GHz [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2014, 36: 39-46.
- [8] 王金虎,葛俊祥,魏鸣,等.卷云冰晶粒子散射特性的理论计算与实验测量研究进展[J].计算技术与自动化,2013,32(3):128-131.
- [9] 王金虎,葛俊祥,魏鸣,等.等效球理论计算冰晶粒子毫米波散射的误差分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2014,42(5):40-44.
- [10] 刘黎平,仲凌志,江源,等.毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析[J].气象科技,2009,37(5):567-571.
- [11] 宋立雪,魏鸣,宋继堂.毫米波多普勒雷达 RHI 退速度模糊研究[J].气象科技,2012,40(4):542-547.
- [12] 陈超,孟辉,靳瑞军,等.基于 CloudSat 云分类资料的华北地区云宏观特征分析[J].气象科技,2014,42(2):294-301.
- [13] 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.
- [14] Sekelsky S M, McIntosh R E. Cloud observations with a polarimetric 33 GHz and 95 GHz radar [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1996, 59(1-2): 123-140.
- [15] Lihua Li. Retrieval of atmospheric attenuation using ground-based and airborne millimeter-wave cloud radar measurements [D]. University of Massachusetts Amherst,2000.
- [16] Widener K B, Mead J B. W-Band ARM cloud radar-Specifications and design [C]//Proc. 14th ARM Science Team Meeting, 2004.
- [17] Clothiaux E E, Miller M A, Perez R C, et al. The ARM Millimeter Wave Cloud Radars (MMCRs) and the Active Remote Sensing of Clouds (ARSCL) Value Added Product (VAP). US Department of Energy [R]. Tech Memo ARM VAP-002 1, 2001.
- [18] Lhermitte R M. Centimeter & Millimeter Wavelength Radars in Meteorology [M]. Miami, Florida: Lhermitte publications, 2002.
- [19] Lhermitte R. A 94-GHz Doppler radar for cloud observations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1987, 4(1): 36-48.
- [20] Takano T, Suga Y, Takei K, et al. Development of a cloud profiling FM-CW radar at 94 GHz [C]//Proceedings of the 27nd General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI) (Maastricht, The Netherlands), FP-11, p1789, 2002.
- [21] Mead J B, Popstefanija I, Kollias P, et al. Compact airborne solid-state 95 GHz FMCW rADAR system [C]//31 st International Conference on Radar Meteorology, Extended Abstract, 2003.
- [22] Horie H, Iguchi T, Hanado H, et al. Development of a 95-GHz airborne cloud profiling radar (SPIDER) - Technical aspects [J]. IEICE transactions on communications, 2000, 83(9): 2010-2020.
- [23] Vivekanandan J, Lee W C, Loew E, et al. HIAPER Cloud Radar Feasibility Study [R]. Earth Observing Laboratory, National Center for Atmospheric Research, 2005.
- [24] Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. The CloudSat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(12): 1771-1790.
- [25] Kozu T, Kawanishi T, Kuroiwa H, et al. Development of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2001, 39(1): 102-116.

Advances in W-band Millimeter Wave Cloud Radar

Wang Jinhui^{1,2,3,4} Wei Ming^{1,2,3} Zhang Qilin^{1,2,3} Li Xiangchao³

(1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 3 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 4 National Demonstration Center for Experimental Atmospheric Science and Environmental Meteorology Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract : Compared with centimeter-wave radar, the millimeter wave radar has higher sensitivity while detecting non-precipitating clouds, and thus the developed countries have conducted extensively cloud observation experiments using millimeter wave radar. In China, millimeter-wave cloud radar is still at the developing stage due to the difficulty in designing radar system and manufacturing capability. Against this background, the advances in the W-band millimeter wave cloud radar are summarized in respect of the ground radar system, airborne radar system, and space-borne radar system, and the system principle diagrams and performance parameters are analyzed in terms of antennas, transmitting circuits, receiving circuits and signal processing units. The radar echoes of non-precipitation cloud detected by 94 GHz Galileo at Chilbolton Observatory are analyzed and the results show that the cloud and fog can be excellently detected, which can provide guidance for the W-band millimeter wave cloud radar design in China.

Keywords : W band; millimeter wave radar; cloud; RF circuit