

# 毫米波技术在测云雷达中应用与发展

葛俊祥<sup>1,2</sup> 李家强<sup>1,2</sup> 于兵<sup>1,2</sup> 周勇<sup>1,2</sup> 王金虎<sup>1</sup>

(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)<sup>1</sup>

(南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044)<sup>2</sup>

jxge@nuist.edu.cn

**摘要:** 随着毫米波技术发展, 如毫米波器件、集成电路成熟化, 毫米波测云雷达近年来在国内外得到了深入的研究和应用。借助其对云的雷达回波资料分析, 能够获取云的相关特性, 如云的宏观和微观结构, 为气象预防预报提供科学分析依据。本文对毫米波测云雷达系统的基本原理及国内外发展研究进行了综述, 并对毫米波测云雷达发展趋势做一探讨。

**关键词:** 毫米波测云雷达, 毫米波器件, 集成电路, 双线极化

## Millimeter Wave Technology Application and Development in Cloud Radar

Junxiang Ge<sup>1,2</sup>, Jiaqiang Li<sup>1,2</sup>, Bing Yu<sup>1,2</sup>, Yong Zhou<sup>1,2</sup>, Jinhu Wang<sup>1</sup>

(School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044)<sup>1</sup> (Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing, 210044)<sup>2</sup>

**Abstract:** With the development of millimeter wave technology, such as millimeter wave device and integrated circuit maturation, millimeter wave cloud radar is studied and applied at home and abroad in recent years. By analysis of the cloud radar echo data with related properties, clouds of macroscopic and microscopic structure can be obtained, which can provides scientific prevention for the weather forecast based on the analysis. In this paper, the basic principle and the development of millimeter wave cloud radar system are reviewed. And the development trend of millimeter wave cloud radar is also to be discussed.

**Keywords:** Millimeter wave cloud radar; Millimeter wave device; Integrated circuit; Dual—polarization

## 1 引言

近年来, 随着毫米波器件水平、电路设计技术<sup>[1-2]</sup>, 天线技术<sup>[3-6]</sup>等日益发展和不断成熟, 极大地推动了毫米波技术在相关领域的发展和应用, 诸如雷达探测、高速通信、导弹制导、卫星遥感、电子对抗等。且由于毫米波具有波长短(频率高)、频带宽等特点, 使得毫米波雷达具有波束窄、分辨率高、天线尺寸小、抗干扰强等优点。正是由于这些特点和优点, 作为一种重要的气象探测装备, 毫米波测云雷达对于云的探测弥补了其它遥测手段的不足, 为气象研究部门对云内部机理研究提供信息。

毫米波测云雷达是利用云粒子对电磁波的散射

特性, 通过对云的雷达回波分析了解云的各种特性, 包括云的宏观和微观结构。如探测云高、云厚和云状的外形特征; 反演云粒子大小、浓度、分布的内部特征; 以及分析云内微物理过程的结构和演变特征等<sup>[7]</sup>。利用毫米波测云雷达可以连续观测云的水平垂直结构变化, 获得准确的云内宏微观参数, 使我们更好地研究云的特性及其在气候变化中重要的作用。

本文主要介绍毫米波测云雷达系统, 及其国内外发展状况与应用, 并对毫米波测云雷达的发展趋势做一探讨。

## 2 毫米波测云雷达系统

毫米波是指介于微波与红外之间的一段电磁波,其频率通常是指 30GHz 到 300GHz,相应波长为 1mm 到 10mm 之间。由于受到大气吸收衰减等因素影响,当前大多数的应用研究主要集中在几个频率,即: 35GHz、45GHz、94GHz、140GHz、220GHz 四个电磁波传播衰减小的“窗口”频段,以及: 60GHz、120GHz、183GHz 三个电磁波传播衰减大的“吸收峰”频段。目前国内外作为气象云探测的毫米波雷达,常用有两个工作频段,即 35GHz(波长 8mm)的 Ka 频段和 94GHz(波长 3mm)的 W 波段。

图 1 为某毫米波测云雷达系统的简化框图,它主要由天馈、发射机、接收机、频综器、信号处理系统、天线伺服、数据处理与显示控制等组成。由频率综合器产生的射频信号经放大送入发射机,推动行波器放大,经极化选择开关选择极化方向,再由天馈系统向外发射。天线采用了高增益的抛物面天线,具有较一致的垂直与水平波瓣性能,发射机背附于天线上,以减少天馈系统的损耗。返回信号由同一天线接收,经由天馈系统送入双路接收机、分别接收垂直或者水平极化信号。接收信号经射频放大、混频,变频成中频信号,送入信号处理器。信号进入信号处理器后,进行 A/D 转换、解压、信号积累,然后采用 FFT 或者 PPP 方式对信号的谱参数进行估算以及极化参数的处理,得到回波强度、径向速度、谱宽及极化信息。最终,数据处理与显示控制分机对信号处理器送来的气象目标回波的数据进行采集、处理,并在终端显示器上显示。该雷达系统的主要特点在于:

(1) 采用频综行波管全相参技术,对回波信号能够进行有效的相干积累,增强微弱信号的检测能力,提高输出信噪比,从而增加雷达系统的探测能力;

(2) 脉冲压缩技术,解决了探测距离与距离分辨率之间的矛盾;

(3) 双线极化技术,即采用单路发射,双路接收,发射水平或垂直线性极化波,分别同时接收返回信号的垂直和水平极化的分量,获得目标的极化参数,如由雷达接收目标后向散射功率的垂直和水平的分量计算返回信号的退极化因子(Linear Depolarization Ratio,简称 LDR)。由于退极化因子

与目标粒子的形状、大小、取向和介电质等有关,因此可以通过对退极化因子的分析,研究雷达获取云粒子相态和形状等信息。

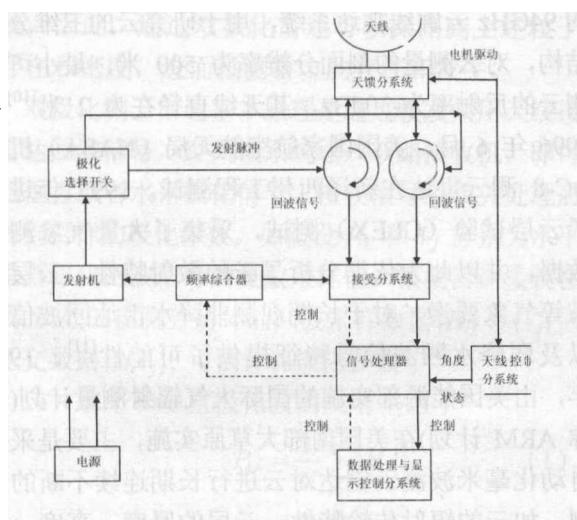


图 1 毫米波测云雷达系统框图

## 3 毫米波测云雷达发展与应用状况

早在 1945 年二战结束以后,英、美等国在军用雷达改装成气象雷达的同时,开始了毫米波气象雷达的研制,如 1947 年,美国空军研制出了用于测量云层高度的 Ka 频段 AN/TPQ 的雷达。随着毫米波磁控管和毫米波速调管的出现,气象学家开始用毫米波测云雷达进行云和降水过程的研究,早期测云雷达工作频率为 24GHz,后来 Harper 和 Petrocchi、Paulson 首次论证了 37GHz 雷达在探测云变化过程中的作用,主要采用的是速调管<sup>[8]</sup>。受当时技术发展制约,尤其是发射机发射功率的限制,测云雷达仅可以探测到回波信号较强的云,如浓积云、积雨云、层积云等,而含水(或冰晶)量少的薄云(薄层积云、透光高层云、淡积云、薄卷云),由于反射率较低,则很难探测到。之后的发展中<sup>[9]</sup>,由于 TUBE 磁控管的研发成功,使得雷达发射机功率大大增加,其峰值功率最高能够达到 50 千瓦,平均功率也有 50 瓦。在 20 世纪 70 年代初,美国空军部研制出基于机载的毫米波测云雷达,其主要功能能够测出云的结构,具有灵敏度高,探测距离远的特点,但由于其硬件设备的笨重及强辐射,限制其进一步应用。到了 80 年代,集多普勒测速和双极化功能于一体的改进型 Ka 波段毫米波测云雷达由美国国家海洋大气局 NOAA 研制

出。到了 90 年代初,毫米波测云雷达已逐渐成为各个发达国家气象研究部门作为云探测的重点发展方向之一。如 1994 年美国研制出基于机载和空载的 94GHz 云廓线雷达系统,用于研究云的三维分布结构,对云测量的剖面分辨率为 500 米,最小可检测云的反射率为 -30dBz,其天线直径在为 2 米<sup>[10]</sup>。1996 年 6 月,美国国家航空航天局(NASA)机载 DC-8 测云雷达在新泽西州工程测试,1997 年进行了云层试验(CLEX)测试,采集了大量气象测量数据,并以此为依据分析了云的散射特性、云层分布等气象要素,对于长期观测非降水雷达回波信号以及弱降水回波信号特征提供了可能性<sup>[11]</sup>。1998 年,由美国能源部实施的国际大气辐射测量计划(简称 ARM 计划)在美国南部大草原实施,主要是采用自动化毫米波测云雷达对云进行长期连续不断的观测,如云的辐射传输特性、云层的厚度、高度、范围等宏观特性,以及云的粒子大小、浓度、冰晶和液态水含量等微观理特性。

日本近些年来也在毫米波测云雷达投入了大量研究,主要针对飞机飞行安全的预警以及云的基本物理特性的研究。2004 年,英国里丁大学研发了工作频率为 35GHz 的地基毫米波测云雷达,该款雷达主要用来研究层积云底端微弱水滴的微观物理结构特征。俄罗斯,法国和德国,也不同程度的研发并投入使用了毫米波测云雷达。

在国内,毫米波测云雷达研究起步相对国外发达国家起步较晚。我国第一部具有毫米波雷达特性的雷达系统是在 1979 年由中国科学院大气物理研究所和安徽井冈山机械厂合作研发,从 1980 年起首次利用该部雷达进行气象观测,连续几年对云和降水作了系统的观测,并对该毫米波雷达的测云能力作了理论估计<sup>[12]</sup>,通过对微波波段气象雷达和毫米波雷达观测云和降水结构的理论和观测对比,分析表明,Ka 波段毫米波气象雷达在探测垂直方向近距离的高层云、层积云等云的结构上,明显优于 X 波段的气象雷达。2006 年,空军第七研究所与安徽四创电子有限公司联合研发了 35GHz 的毫米波测云雷达,其主要用途在于监测云内积冰情况,为飞机安全飞行保驾护航,它没有双极化和多普勒测速功能。2007 年,中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室与中国航天研究二院第二十三研究所联合研发出具有多普勒和极化功能的 8.6mm 测云雷达<sup>[13]</sup>。该部雷达的最大特点在于具有极化和多普勒功

能,对于提高气象探测的灵敏度有着重要意义。近年来,随着短毫米波技术的发展,尤其是短毫米波器件的发展,国内开始重点研制 94GHz 毫米波测云雷达,包括地基、机载等,部分研制样机已进入工程实验阶段。南京信息工程大学在国家科技部公益性行业专项的支持下,正在研制 94GHz 地基毫米波测云雷达系统。

## 4 毫米波测云雷达技术的发展趋势

影响毫米波测云雷达发展的关键因素在于毫米波器件的研发进展,研制频带宽、噪声低、功率大、效率高、可靠性强、寿命长、功能多的毫米波器件是毫米波测云雷达的必要条件。与微波雷达相比,毫米波雷达的发射功率较小,毫米波测云雷达的性能有所下降,雷达探测距离有限;且工作频率高,能量在波导器件中的损耗较大;在恶劣的天气环境中,如在降雨时电磁波衰减严重;相对而言,毫米波器件昂贵,无法大批量生产装备等等。

### 4.1 毫米波元器件与集成电路的发展

毫米波大功率发射器件主要包括两种类型:一种是基于传统微波扩展的毫米波频段器件,如调速管、磁控管、行波管等,它们工作时电子与慢相速波同步,也称慢波型器件;另一种是近几十年间发展起来的新型快波器件,如回旋管、奥罗管(Orotron)、潘尼管(Peniotron)、自由电子激光(FEL),它们的工作原理与传统微波管完全不同。在这些快波器件中,发展较为成熟的一种是回旋管,有振荡型、行波放大型、返波振荡型。回旋管的特点是需要非常高的工作电压(50-100KV),为此需要采用超级导磁材料以保证所需的高磁场,国外回旋管效率已可达到 40%。

目前毫米波雷达发射机主要采用磁控管和行波管,前者虽然发射功率较大,但由于磁控管频率和相位不稳定,通常只用于非相干毫米波雷达中。而要充分发挥毫米波云雷达的探测能力,获取高分辨率云层构造、探测不同云内部结构以及获得云运动信息,就需要采用频率和相位稳定性好的后者一行波管放大器发射机。目前,在毫米波发射机领域内,有几种先进的器件正在研制,其中包括:高效固态组件、快波器件、螺旋形行波管。如国外大功

率三毫米行波管的脉冲输出功率已达 200 瓦-250 瓦, 实验室研究指标可达 300 瓦。国内, 在行波管研制还有一定的差距, 尤其是高功率和高平均功率大功率短毫米波器件。

随着新材料、新工艺、新技术出现与微波、毫米波集成电路规划的实施, 毫米波雷达正向集成化方向发展, 毫米波集成电路的集成能力越来越高, 功能越来越强。小型化一直是集成电路领域的重要研究方向, 一方面可以降低成本, 另外一方面可以提高产品的成品率以及系统的集成度。以 GaAs 为基础的单片微波集成电路技术<sup>[14-16]</sup> (Monolithic Microwave Integrated Circuit, 简称 MMIC) 一直以来倍受关注, 已研究开发出多种功能电路芯片, 其中包括毫米波低噪声放大器、功率放大器、混频器、上变频器、检波器、调制器、压控振荡器、移相器、开关、混合收发前端、发射/接收(T/R)组件等。由于 MMIC 衬底材料(如 GaAs、InP)的电子迁移率较高、禁带宽度宽、工作温度范围大、微波传输性能好, 所以 MMIC 具有电路损耗小、噪声低、频带宽、动态范围大、功率大、附加效率高、抗电磁辐射能力强等特点。短毫米波 MMIC 功率放大器, MMIC 振荡器, MMIC 倍频器以及 MMIC 混频器, 近年来都得到了迅猛地发展。

## 4.2 双极化

双极化天气雷达有“交替发射、交替接收”, “交替发射、同时接收”和“同时发射、同时接收”三种技术体制。双极化毫米波测云雷达是在毫米波天气雷达的基础之上增加双极化功能的气象雷达。它可以进一步利用云、雨等目标中不同散射体之间的退极化特性的区别, 增强雷达对云中微物理凝聚物分析和气象判别等方面的能力, 主要用途包括如下几个方面:

(1) 用于识别云中粒子的相态, 例如识别冰相、水相、混合相云等, 它对定量测量降水、准确探测目标物理特性具有重要意义, 同时正是由于双极化雷达(特别是高频段短波长测云双极化雷达)固有的特性, 能在了解云发展过程中, 分析一系列微物理变化特征方面发挥重要作用, 在人工影响天气工作, 如人工降雨起到辅助作用。

(2) 用于测量局部区域降水量, 双极化雷达能够获得实时高精度的降雨量的测量数据, 能够起到

预测预防洪水泥石流自然灾害的重要作用。

(3) 用于雷电探测与防护。由于云中粒子电荷产生的主要原因是冰相粒子和强烈上升气流的存在所致, 因此, 通过双极化雷达可以探测到上述粒子的存在和密度, 进而预测雷电的存在和发生。

双极化测云雷达基本原理是通过收发共用天线接收雷达回波信号, 经天馈系统送入双路接收机, 即可得到垂直或者水平极化信号。接收信号经相关处理后可得到目标的极化参数。如假设  $H_i$  和  $V_i$  分别为水平和垂直极化回波信号的复数采样值。根据雷达接收在距离  $r$  处的被测分辨体的回波采样数据  $\{H_i\}$ 、 $\{V_i\}$  以及正交数据  $\{H_i V_i\}$ , 可估计各极化参数<sup>[17-18]</sup>。

(a) 水平和垂直极化波的反射率因子

$$\hat{P}_{hh} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_i|^2 \quad (1)$$

$$\hat{P}_{vv} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_i|^2 \quad (2)$$

$$\hat{P}_{hv} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_i V_i|^2 \quad (3)$$

根据雷达方程  $Z = \hat{P} R^2 / C$ , 求出反射率因子  $Z_H$ 、 $Z_V$ 、 $Z_{HV}$ 。这里  $R$  为雷达至被测目标的距离,  $C$  为光速。

(b) 差分反射率因子

差分反射率因子是反映云雨目标特征的主要参数之一, 差分反射率因子测量误差是双极化天气雷达的一个关键技术指标, 其定义如下:

$$Z_{dr} = \frac{10 \lg \sum_{i=1}^N |H_i|^2}{\sum_{i=1}^N |V_i|^2} \quad (4)$$

(c) 双程差分传播相位  $\Phi_{dp}$

表示雷达回波信号在水平极化和垂直极化时, 在某一个特定距离处往返到达天线的双程角, 即:

$$\Phi_{dp} = \Phi_{HH} - \Phi_{VV} \quad (5)$$

(d) 差分传播相位常数  $K_{dp}$

$$K_{dp} = \frac{\Phi_{dp}(r_1) - \Phi_{dp}(r_2)}{2(r_1 - r_2)} \quad (6)$$

式中, 相差  $\Phi_{dp} = \Phi_{hh} - \Phi_{vv}$ ,  $\Phi_{hh}$ 、 $\Phi_{vv}$  分别为接收到的水平和垂直极化波的相位,  $r_1$  和  $r_2$  是测量点 1 和测量点 2 离雷达的距离。

(e) 线性退极化比

当云粒子的主轴与发射电磁波的电场方向不平行时, 小部分能量将会被退极化而以与发射极化波

正交的极化状态出现,可用线性退极化比来度量其退极化的程度,即:

$$LDR_{vh} = 10 \lg \frac{\hat{P}_{HV}}{\hat{P}_{VH}} \quad (7)$$

### 4.3 双频段毫米波雷达

除了单一波长毫米波气象雷达外,双波长、多波长毫米波气象雷达的应用研究也有一定的发展,不同的频段和极化可以带回更多的目标信息<sup>[19-21]</sup>,赋予雷达更多手段探测和分辨目标。如美国发展的Ka/W双频段毫米波测云雷达观测系统,主要用于观测冰云和过冷水的位置以及云滴谱的研究。基于Ka和W双频段在测云雷达探测中有着更大的用途,其关键技术之一就是天线的设计,尤其是设计体积小、重量轻、增益高、副瓣低的天线系统很有必要,难点之一就是在双馈源的前提下,如何有效提高双频天线的隔离度和双频相位中心的控制。

南京信息工程大学基于导波正交模技术,已在Ka和W双频段设计出优于35dB的高隔离馈元天线单元,目前基于该馈元天线的双频共面天线正在设计中。

### 4.4 云粒子散射电磁计算

对云粒子的探测手段主要有卫星遥感、天气雷达、激光雷达、云幕测量仪以及高空气球等。卫星遥感探测间隔时间长,空间分辨率低;天气雷达对浅薄云不敏感;激光测云雷达、云幕测量仪以及气球只能探测空间某一点的云信息。因此,常规的探测云手段虽然可以获取云信息,但是时间分辨率和空间分辨率都较低,不能探测云内部结构,难以准

确反映时刻变化的云参数信息。作为新型的云探测工具,毫米波测云雷达具有很高的灵敏度和分辨率,可以探测云的内部结构,弥补了常规云探测的不足。

为利用毫米波测云雷达的回波特性评估云的特性,必须对毫米波波云中冰粒子的电磁散射特性进行理论和实验研究<sup>[22]</sup>。实验探测表明,云粒子群的电磁散射特性随云的状态和高度等的不同,其模型十分复杂,无法用简单的数学模型来描述。理论研究卷云中冰晶粒子散射的方法多集中在FDTD<sup>[23]</sup>、DDA<sup>[24]</sup>、T矩阵<sup>[25]</sup>等。在云粒子散射理论计算中,目前还没有一种方法可以精确而快速地求解任意形状、尺寸的非球形粒子云群的电磁散射特性,因此设计一种混合的算法具有十分重要的意义。常用的实验方法主要有微波后向散射测试方法、FP腔法、双站RCS快速测量方法、微波暗室测量方法等。

## 5 结论

毫米波测云雷达系统具有波束窄、分辨率高、频带宽、设备小的特点,对于研究云的特性有着其它遥测手段所不具备的优越性,近年来在气象应用部门有着广泛的需求和业务应用。本文阐述了毫米波测云雷达系统的基本原理及国内外发展现状,并对引领其发展趋势的相关毫米波技术做了介绍,如毫米波元器件与集成电路、双线极化技术以及双波段技术等。可预知,随着毫米波技术的成熟,毫米波测云雷达必将具有更加广阔地用武之地。

### 参考文献

- [1] Martin Jahn, Reinhard Feger, Christoph Wagner, "A Four-Channel 94-GHz SiGe-Based Digital Beamforming FMCW Radar"[J], IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques, VOL.60(3), MARCH, 2012, pp:861-869.
- [2] Larry W. Epp, Daniel J. Hoppe, Abdur R. Khan, et al, "A High-Power Ka-Band (31-36 GHz) Solid-State Amplifier Based on Low-Loss Corporate Waveguide Combining"[J], IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, VOL.56(8), August, 2008, pp:1899-1908.
- [3] De Villiers D I L, Van der Walt PW, Meyer P, et al, "Design of a Ten-Way Conical Transmission Line Power Combiner" [J]. IEEE Transactions On Microwave Theory Technology, 2007, Vol.55 (2), pp:302-308.
- [4] Li Guang, Huang Jian, Pei Naichang, "AKa-Band Quasi-Optical Power-Divider Basing On Talbot Effect of Phase Grating"[J], Microwave and Optical Technology Letters, 2011, Vol.53(6), pp:1331-1336.
- [5] 恽小华, 陈春红, 楚然, 孙琳琳, "一种自适应的毫米波多波束天线"[J], 电子学报, 2004年3月, Vol.32(3), pp:522-524.

- [6] 向博, 孟洪福, 窦文斌, 何敏敏, 陈森, “8毫米波均匀介质球透镜多波束天线的研究”[J], 电波科学学报, 2012年4月, Vol.27(2), pp:315-320.
- [7] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生等, “毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究”, 气象学报, 2011年, Vol.69(2), pp: 352-362.
- [8] Paulsen W H, Petrocchi P J, Mclean G, “Operational Utilization of the AN/TPQ-11 Cloud-detection Radar”, Air Force Cambridge Research Laboratories, Instrumentation, 1970.
- [9] Danne, “Relationships Between Doppler Spectral Moments Within Large-Scale Cirro- and Altostratus Cloud Fields Observed By a Ground-Based 95GHz Cloud Radar”[J], Journal of Applied Meteorology, 1999, Vol.38, pp:175-189.
- [10] Fuk Li, Eastwood Im, Stephen Durden, William Wilson, “Airborne and Spaceborne Cloud Radar Designs”, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994, 72-674.
- [11] Gregory A. Sadowy, Robert E. McIntosh, “The NASA DC-8 Airborne Cloud Radar: Design and Preliminary Results”, Geoscience and Remote Sensing, 1997, pp:1466-1469.
- [12] 魏重, 林海, 忻妙新, “毫米波气象雷达的测云能力”[J], 气象学报, 1985年8月, Vol.43(3), pp:378-383.
- [13] 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年10月, Vol.37(5), pp:569-571.
- [14] Weinreb, S. “High-gain 150-215-GHz MMIC amplifier with integral waveguide transitions”[J], Microwave and Guided Wave Letters, IEEE, Jul 1999, Vol.9(7), 282-284.
- [15] Jung Gil Yang, “Ka-Band 5-Bit MMIC Phase Shifter Using InGaAs PIN Switching Diodes”[J], Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, March 2011, Vol.21(3), pp:151-153.
- [16] Campbell, C.F. “High Efficiency Ka-Band Power Amplifier MMIC Utilizing a High Voltage Dual Field Plate GaAs PHEMT Process”, Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2011 IEEE, Oct. 2011, pp:1-4.
- [17] 董振贤, 李妙英, “双偏振多普勒天气雷达的偏振参量及其应用”[J], 解放军理工大学学报, 2004年6月, Vol.5(3), pp:98-102.
- [18] 魏洪峰, 薛震刚, “偏振多普勒天气雷达差分反射率因子的测量误差”, 气象科技, 2008年4月, Vol.36(2), pp:223-227.
- [19] 孙竹, 钟顺时, 孔令兵等, “宽带双波段双极化共口径 SAR 天线设计”[J], 电子学报, 2012年3月, Vol.40(3), pp:542-547.
- [20] Nakamura K, Inomata H. “Dual-polarization rain observation by X- and Ka-band dual-wavelength radar”[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1992, Vol.8(70), pp:1085-1095.
- [21] Sekelsky S M, McIntosh R E. “Cloud observation with a polarimetric 33GHz and 95GHz radar”[J]. Meteorology and atmospheric physics 1996, Vol.59, pp:123-140.
- [22] Assen, K., Z. Wang, V.I. Khvorostyanov et al. “Cirrus cloud ice water content radar algorithm evaluation using an explicit cloud microphysical model”[J]. J. Appl. Meteorol. 2002, Vol.41, pp:620-628.
- [23] Yang, P., and K. N. Liou. “Finite-difference time domain method for light scattering by small ice crystals in three-dimensional space”[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1996a, Vol.13, pp:2072-2085.
- [24] Draine, B.T., and P.J. Flatau. “Discrete-dipole approximation for scattering calculation”[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, Vol.11, pp:1491-1499.
- [25] Mishchenko, M. I., L. D. Travis, and D. W. Mackowski. “T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: A review”[J]. J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer, 1996, Vol.55, pp: 535-575.