

文章编号: 1672-8785(2016)01-0023-08

# 机载毫米波测云雷达定标技术

文 韬 赵增亮 姚志刚 林龙福 匡帅帅

(解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

**摘 要:** 作为云探测的主要遥感手段, 毫米波测云雷达能够为云宏微观参数的反演提供及时、准确和可靠的信息。毫米波云雷达探测器定标技术研究不仅能够充分发挥其观测数据的使用效益, 而且还可以提高观测质量。尽管毫米波测云雷达内定标系统具有对主要工作参数进行自动检测和对探测结果进行修订的功能, 可以保证探测结果的稳定性和真实性, 但是内定标系统并没有考虑天线特性以及不同部件之间的相互影响。因此, 针对外定标技术的研究工作显得尤为迫切。在国外机载毫米波测云雷达外定标实验的基础上, 介绍和分析了外定标技术, 并拟制了外定标技术流程, 为将来我国自行开展机载外定标实验提供了参考和借鉴。

**关键词:** 毫米波测云雷达; 机载; 外定标

**中图分类号:** P415.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.01.005

## Calibration Technology of Airborne Millimeter Wave Cloud Radar

WEN Tao, ZHAO Zeng-liang, YAO Zhi-gang, LIN Long-fu

(Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University  
of Science and Technology, Nanjing, 211101, China)

**Abstract:** As the main remote sensing means for cloud detection, millimeter wave cloud measurement radars can provide timely, accurate and reliable information for the inversion of macroscopic and microscopic parameters of cloud. The study of the calibration technology for millimeter wave cloud radars is not only helpful to the full use of their observation data, but also is helpful to the improvement of observation quality. Although the internal calibration systems for millimeter wave cloud radars can automatically detect the main operation parameters and revise the detected results so as to keep the stability and authenticity of the detected results, they do not take the antenna characteristics and the interaction among different components into consideration. Therefore, it is particularly urgent to study the external calibration technology for millimeter wave cloud radars. On the basis of the external calibration experiments of airborne millimeter wave cloud radars at home and abroad, the external calibration technologies are presented and analyzed and the process of external calibration is determined. This provides the reference for the initial airborne external calibration experiment in our country in the future.

**Key words:** millimeter wave cloud detection radar; airborne; external calibration

收稿日期: 2015-12-08

作者简介: 文韬 (1993-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为大气辐射与遥感。E-mail: 13881161116@189.com

## 0 引言

众所周知,云在地球气候系统中扮演着重要角色,其垂直结构和空间分布决定了地球的辐射收支,并会最终影响全球能量循环。由于存在波段优势,毫米波测云雷达在获取云的细小尺度方面效果很好。此外,该雷达还具有功耗低和结构紧凑等特点,所以更适合搭载在飞机和卫星上。

20 世纪 60 年代末、70 年代初,美国空军研制出了一批专门用于机载探测、工作频率为 35 GHz 的 AN/7PQ-11 型雷达,此时的雷达还没有双极化、多普勒等功能<sup>[1]</sup>。进入 2000 年之后,美国国家航空航天局 (NASA) 的喷气推进实验室 (JPL) 和美国马萨诸塞大学 (UMASS) 联合研制出了一种机载 W 波段极化多普勒测云雷达<sup>[2-3]</sup>。紧接着,美国国家大气研究中心 (NCAR) 研制出了一种工作频率为 94 GHz 的全相干多普勒极化雷达。该雷达被装载在当时的 ER-2 飞机上,并利用晴空海面进行了一系列外定标实验。这些实验数据提高了我们对 94 GHz 波段下海洋表面散射机制的认识。这一系列外定标实验也为美国 CloudSat 卫星上的 94 GHz 毫米波云雷达的在轨定标和全球云测量任务提供了理论支撑和质量保障<sup>[4]</sup>。2007 年,中国气象科学研究院研制出了一种波长为 8 mm 的机动式毫米波雷达系统 (HMBQ),并对其进行了一系列外场实验。该研究获得了大量数据,加深了我们对云和降水过程的认识,为云的数值模拟和预报提供了可靠的资料和信息<sup>[5-6]</sup>。

2006 年,首颗可对全球范围内的云垂直结构进行探测的卫星——美国 CloudSat 卫星发射升空<sup>[7]</sup>,它是第一颗搭载了云廓线雷达 (Cloud Profiling Radar, CPR) 的卫星,其主要参数见表 1。由于发射工作频率为 94 GHz (3 mm) 的毫米波,CPR 可以从太空中观测云的垂直内部特征。它不仅能够探测云中的小冰晶粒子和水滴,而且还能够反演出在剖面上的云粒子的有效半径、液态水或冰含量等微物理特征。值得注意的是,CPR

可以观测到云内冰水和液态水的垂直廓线,这是目前现有的其他卫星系统无法做到的。

CloudSat 卫星属于 A-Train 卫星编队。该卫星编队共有 6 颗卫星,其中每颗都有自己的具体科学目的。经仔细编队后,A-Train 卫星可进行一致性观测,即在近似相同的时间内采用不同卫星上的两个或两个以上的传感器对感兴趣的区域进行调查研究。该方法可增强测量结果的准确性,从而提高测量结果的质量和精度<sup>[8-9]</sup>。因此,在对 CloudSat 卫星上的 CPR 进行外定标时,利用 A-Train 卫星编队的多种卫星资料可以共同估计大气衰减和海面风速等信息,从而提高外定标精度。

表 1 CPR 系统的主要参数

| 参数     | 符号     | 数值          | 单位            |
|--------|--------|-------------|---------------|
| 工作频率   | $f$    | 94.05       | GHz           |
| 脉冲宽度   | $\tau$ | 3.3         | $\mu\text{s}$ |
| 天线直径   | $D$    | 1.85        | m             |
| 峰值功率   | $P_t$  | 1820        | W             |
| 脉冲重复频率 | PRF    | 3700 ~ 4300 | Hz            |

## 1 国内外毫米波测云雷达定标技术发展

### 1.1 国内毫米波测云雷达定标技术

国内的毫米波测云雷达系统定标主要是指参考天气雷达定标标准对测云雷达系统进行的标定。如前所述,2007 年,中国气象科学研究院研制出了一种波长为 8 mm 的机动式毫米波测云雷达系统 (HMBQ)<sup>[10]</sup>。仲凌志等人<sup>[11]</sup>对 HMBQ 雷达的天线系统、发射机系统、接收机系统的特点和定标方法进行了介绍和实验分析。该研究属于内定标范畴,并没有考虑到不同部件之间的相互影响以及雷达工作环境对探测的影响。

目前,国内的测云雷达研制工作主要以地基 Ka 波段测云雷达为主,而机载 W 波段测云雷达仍处在研制阶段<sup>[12]</sup>。目前在研的机载测云雷达的工作频率为 94.58 GHz,它们均没有进行外定标的详细设计和实验分析,尚处于理论研究阶段。

### 1.2 国外毫米波测云雷达外定标技术

国外的毫米波测云雷达研究起步较早, 目前 CloudSat 星载测云雷达已于 2006 年在轨运行, 其外定标技术也相对比较成熟。

2002 年, Li L 等人<sup>[13]</sup>进行了首次机载测云雷达外定标实验。该雷达搭载在 ER-2 高空实验飞机上, 共进行了 11 航次飞行。他们总共投放了 50 个下投式探空仪, 并测量了不同条件下海洋表面的后向散射截面。结果表明, 该研究与准镜面散射理论模型吻合得很好。这次实验获得的数据提高了人们对 W 波段下海洋表面散射机制的认识, 也为当时即将发射的 CloudSat 卫星利用海洋表面进行外定标提供了理论支撑。

美国于 2006 年发射的 CloudSat 卫星上搭载了 CPR 测云雷达, 首次实现了对全球云三维结构的探测。CloudSat 卫星的在轨定标主要分为测量模块、修订模块和理论值计算模块等三大模块<sup>[14]</sup>。其中, 测量模块分为两部分: 一是对 CPR 的运行稳定性进行评估, 即在标准的天底指向(垂直向下)模式下, 通过测量晴空海面的后向散射截面对 CPR 进行定标。其优点是可获得大量数据, 便于评估雷达在一段时间内的运行稳定性。二是对 CPR 的整体定标精度进行评估, 即通过每月一次卫星定标机动的方式, 使雷达入射角在海面上接近  $10^\circ$ ; 利用在该入射

角下海表风速影响最小的优点, 可提高海表后向散射的测量精度。修订模块包括两部分: 一是对大气衰减  $L_a$  进行估计, 即主要利用 AMSR-E 资料、ECMWF 资料以及 Liebe 毫米波大气衰减模型对传播路径上的大气衰减(水汽和氧气)进行估计, 从而对测云雷达进行衰减订正。二是对 CPR 雷达波形的损失因子  $L_r$  和雷达的距离样本偏差  $L_r$  进行估计。因为它们与雷达技术有关, 所以这里不再详述。理论值计算模块是对海洋表面的归一化后向散射截面(Normalized Radar Cross Section, NRCS)进行理论计算, 其主要方法为基于准镜面散射理论, 通过建立 Gaussian 假设下的联合概率密度函数进行计算。

图 1 中, 红圈区域为通过用 CloudSat 1B-CPR 资料中的 Data\_quality 参量进行统计分析而筛选确定的 CloudSat 卫星的定标机动区域。图 2 所示为利用 ERA-interim 资料绘制的该月月平均比湿含量, 其定标机动区域的比湿含量小于  $10 \text{ g/kg}$ 。通过对国外卫星定标机动区域的大气参数进行研究, 可以为我国未来星载测云雷达外定标场地的选择提供借鉴和参考。

## 2 毫米波测云雷达定标技术

在一般情况下, 毫米波测云雷达可利用内

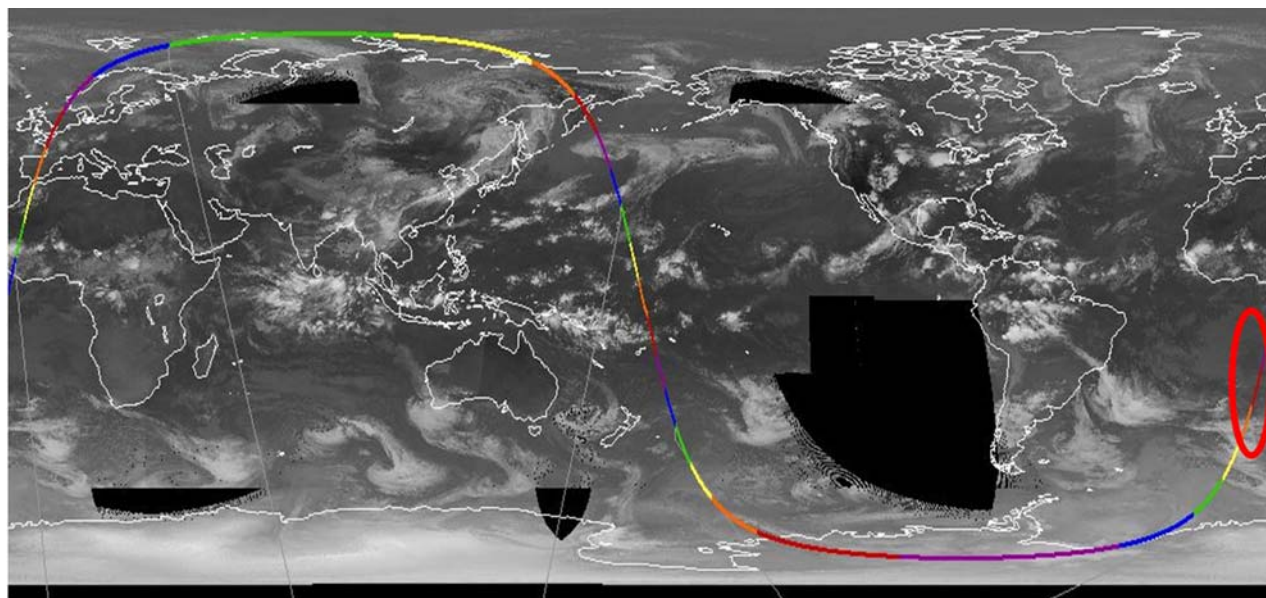


图 1 2007 年 7 月 19 日, CloudSat 卫星的第 6505 轨(红圈表示定标机动区域)

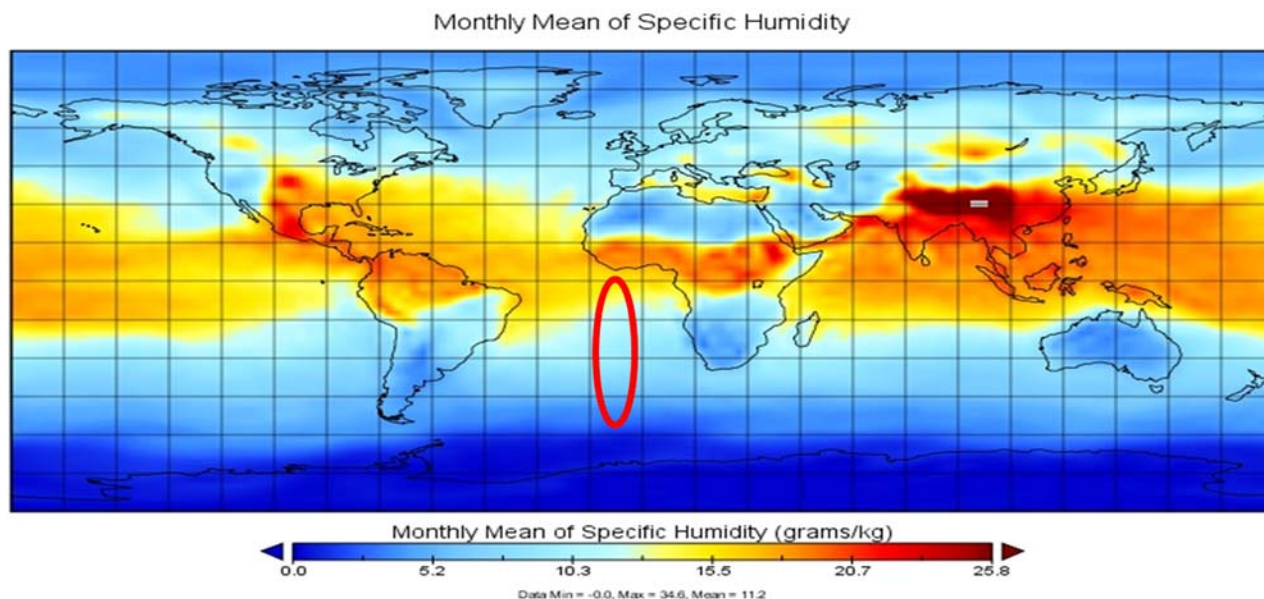


图 2 2007 年 7 月的全球比湿含量图 (红圈表示定标机动区域)

部电路系统来检测无线电发射功率的变化水平和系统的增益漂移,也就是通常所说的内定标法。但天线特性以及不同部件之间的相互影响等因素在内定标系统中并没有加以考虑。因此,研究测云雷达外定标技术对于机载或星载测云雷达来说很有必要。它不仅是一项基础性工作,而且也是非常关键的一环。该研究会直接影响机载或星载测云雷达资料应用的质量。外定标的基本目的就是在确定测量信号与目标之间关系的过程中加入天线影响。

外定标的主要方法是将天线指向某个测定精确且性质稳定的外部源。例如,微波辐射计使用诸如月球之类的自然目标,而主动探测系统则主要利用人工制作的点目标或天然均匀目标(比如海面)。本文主要讨论主动模式系统。因此,我们根据不同类型的已知散射截面的目标,可将外定标分为点目标定标和均匀定标目标两种。然而,机载或星载雷达利用点目标进行定标是很困难的,因为要分离背景杂乱的信号很困难。平静海面具有相对稳定的散射特性<sup>[15]</sup>,也就是说,在测量持续的时间内,其介电常数和表面粗糙度应保持不变。另一方面,由于海洋表面为扩展目标,其在径向距离和方位上的扩展远比测云雷达在此方向上的空间分辨率大,所以

常用作机载或星载雷达的外定标场。因此,开展基于平静海面的机载毫米波测云雷达外定标研究是很有必要的。此外,对流层低层积聚了大量水汽和氧气,它们的存在会对毫米波产生吸收并导致衰减。因此,在利用海洋表面进行外定标时,若要提高定标精度,则必须进行大气衰减订正。

## 2.1 基于角反射器的定标模型

地基雷达通常利用角反射器进行定标。在地面上对毫米波测云雷达进行外定标实验时,可采用三面角反射器进行定标。基于角反射器的定标工作通常选用通信塔。为了减小大气衰减的影响,通信塔离雷达的距离不远,较弱的返回信号会包含地杂波回波。一般目标返回信号的强度在接收机动态范围的 1/2 高端,并且保证目标在雷达以最低仰角扫描时能受到波束主瓣的照射。

Levanon<sup>[16]</sup>给出了三面角反射器的雷达截面:

$$\sigma = \frac{4\pi a_l^4}{3\lambda^2} \quad (1)$$

式中,  $a_l$  为反射器的轴长 (m);  $\lambda$  为雷达波长 (m)。

因此,点目标的雷达方程可表示为

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (2)$$

式中,  $G$  为天线增益;  $P_r$  为接收功率 (W);  $P_t$  为峰值发射功率 (W);  $r$  为雷达到目标的距离 (m)。雷达常数  $R_c$  (dB) 的计算公式为

$$R_c = 10 \log \left[ \frac{(1024 \ln 2) \lambda^2 10^{21}}{c \pi^3 \tau P_t \theta \varphi |k|^2} \right] \quad (3)$$

式中,  $c$  为光速;  $\theta$  和  $\varphi$  分别为水平和垂直波束宽度 (rad);  $\tau$  为脉冲长度 (s);  $|k|^2$  为与水的折射指数有关的量。雷达的反射率因子为

$$dBZ = 10 \log(10^3 P_r) + 20 \log(0.001 r) + R_c \quad (4)$$

式中,  $P_r$  为雷达天线缓慢扫过角反射器时得到的最大返回功率。

## 2.2 基于海洋表面观测的外定标模型

2002 年 7 月 9 日, NASA 和 UMASS 将其联合研制的机载 W 波段极化多普勒测云雷达 (CRS) 搭载在 ER-2 高空实验飞机上, 并实施了 CRYSTAL-FACE 实验计划。其间, CRS 测云雷达对佛罗里达近海地区的海洋表面散射进行了测量, 也就是外定标实验。这次实验数据提高了我们对 94 GHz 波段下海洋表面散射机制的认识, 其测量结果被用来研究将海洋表面散射信号作为机载和星载 W 波段雷达外定标的可行性评估。表 2 列出了 CRS 系统的主要参数。

表 2 CRYSTAL-FACE 实验期间的 CRS 系统参数表

| 参数              | 数值               |
|-----------------|------------------|
| 频率 (GHz)        | 94.155           |
| 峰值功率 (kW)       | 1.7              |
| 脉冲重复频率 (kHz)    | 4/5 (双脉冲重复频率)    |
| 脉冲宽度 ( $\mu$ s) | 1.0              |
| 发射极化            | H                |
| 接收极化            | V 和 H            |
| 天线波束宽度          | $0.6 \times 0.8$ |
| 天线增益 (dB)       | 46.4             |
| 灵敏度 ( $dBZ_c$ ) | -29 (来自飞行数据)     |

1995 年, Kozu T<sup>[16]</sup> 给出了海洋表面散射雷达方程的基本形式:

$$P_r = \frac{10^6 P_t G_a^2 \lambda^2 \beta \varphi \cos \theta}{512 \ln 2 \pi^2 l_{rx} l_{atm}^2 h^2} \sigma_0 \quad (5)$$

式中,  $P_r$  为接收的雷达功率 (mW);  $P_t$  为发射的峰值功率 (kW);  $G_a$  为天线增益;  $\lambda$  为雷达信号的波长;  $\beta$  和  $\varphi$  为 3 dB 天线波束宽度 (半功率波束宽度);  $l_{rx}$  为天线与接收器端口之间的损耗;  $l_{atm}$  为由于大气吸收造成的单程路径衰减;  $\theta$  为雷达波束的入射角 (rad);  $\sigma_0$  为海洋表面的归一化雷达散射截面;  $h$  为飞机的海拔高度 (m)。式 (5) 中,  $P_t G_a^2 \lambda^2 \beta \varphi / (l_{rx} l_{atm})$  只取决于雷达系统本身, 因此对于雷达来说, 它是恒为常数。

2002 年, Sekelsky S M 等人<sup>[17]</sup> 提出了雷达参数计算公式:

$$R_c = \frac{1024 \ln 2 \lambda^2 l_{rx} l_{atm} 10^{21}}{P_t G_a^2 c \pi^3 \tau \beta \varphi} \quad (6)$$

式中,  $c$  为光速 ( $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ );  $\tau$  为射频脉冲宽度 (s)。

我们可以看出, 雷达常数  $R_c$  可由以下几点估算出来: (1) 测量式 (6) 中的每个独立参数; (2) 利用已知雷达散射截面的目标进行外定标, 例如三面角反射器; (3) 对于机载情况, 我们利用海洋表面进行分析。假设满足波束充塞情况,  $\sigma_0$  可被计算出来:

$$\sigma_0 = \frac{P_r c \pi^5 l_{atm}^2 \tau R_c h^2}{2 \lambda^4 10^{21} \cos \theta} \quad (7)$$

另一方面, 如果已知海洋表面  $\sigma_0$ , 那么雷达常数可由式 (7) 得到, 以实现雷达定标。

在 CRYSTAL-FACE 实验期间, 研究人员将由 CRS 测量的  $\sigma_0$  值与海洋表面散射模型中采用三种平均表面坡度参数化方案时计算出的理论值进行了比较。结果表明, 由 CRS 测得的  $\sigma_0$  值与基于准镜面散射理论使用不同的表面坡度经验关系得到的计算值非常吻合。因此, 在 94 GHz 波段 (雷达天底模式下), 利用准镜面散射理论对雷达后向散射截面进行计算是有效的。此外, 他们还发现, 当雷达入射角在海面上接近  $10^\circ$  时, 由 CRS 测得的  $\sigma_0$  值对海洋表面风速不敏感这一重要结论验证了之前研究人员所得出的结论。CRS 测量结果还表明, 在较低的微波频段,  $\sigma_0$  测量值还依赖于风向和风速变化, 且随风

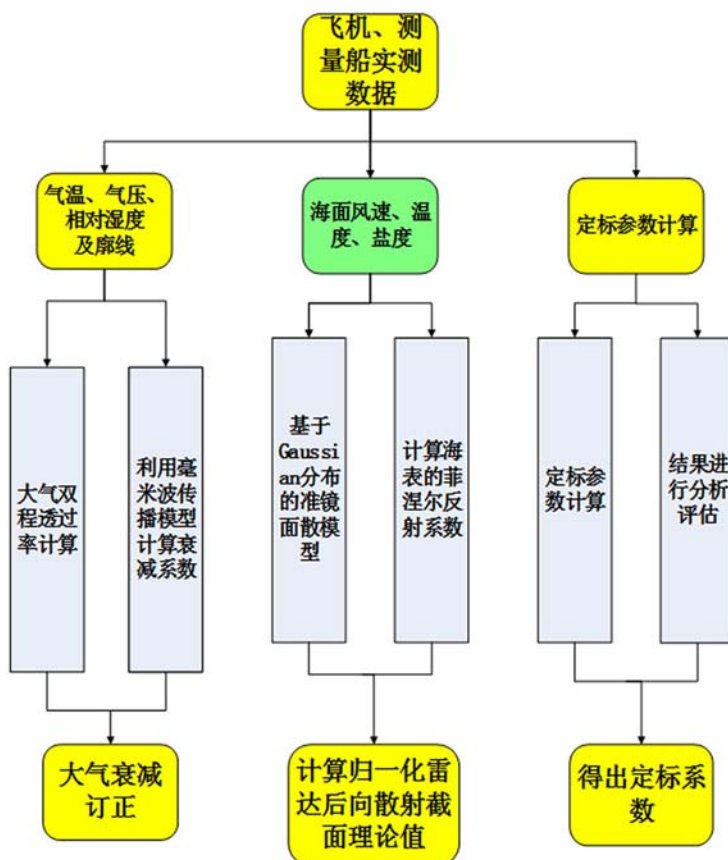


图 3 L1 级产品数据定标的流程图

向变化具有一致性。他们同时还提出有必要在 94 GHz 波段进行更多的测量,以便研究这种依赖变化关系。

总的说来,在利用海平面对机载和星载测云雷达进行外定时,误差主要来自水汽和氧气衰减订正的不确定性部分、表面风速测量的误差部分以及海表面雷达返回信号的取样等三部分。

### 3 机载毫米波测云雷达的外定标技术流程

通过对国外相关外定标实验进行研究,并结合机载实验的实际情况,大体可将外定标内容分为大气衰减影响订正、海面雷达的后向散射截面理论计算以及定标参数计算三部分(见图 3)。大气误差影响计算包括大气双程透过率计算和毫米波大气辐射传输计算。通过利用 MPM 毫米波传播模型计算衰减系数<sup>[18]</sup>,可以得到大气中氧气、水汽对云雷达探测器工作波段的大

气衰减的影响量。海面雷达回波计算包括海表反射特性计算和大气影响修正计算。通过对海面雷达回波进行理论计算,可以得到海面后向散射的雷达回波功率,并可用大气影响数据对其进行订正处理。定标参数计算包括定标参数计算和结果分析评估。通过对比机载仪器的观测值与理论计算值,可以算得云雷达探测器的观测精度、平稳性以及相关的定标参数。

图 4 所示为风速为 1~23 m/s、雷达入射角为 0°~11° 条件下,基于 Gaussian 分布的海面镜面散射建模。其仿真参数设置如下:海表温度为 20℃,盐度为 35‰。从图 4 中可以看出,随着雷达入射角的增大, $\sigma_0$  值呈单调递减趋势。图 5 所示为 94 GHz 以及垂直入射条件(0°)下  $\sigma_0$  值随风速的变化关系。随着表面风速的增加,表面粗糙度增大, $\sigma_0$  值减小。上述仿真实验表明,准镜面散射模型与实际情况相符,这为后续建立平静的海面后向散射模型奠定了理论基础。

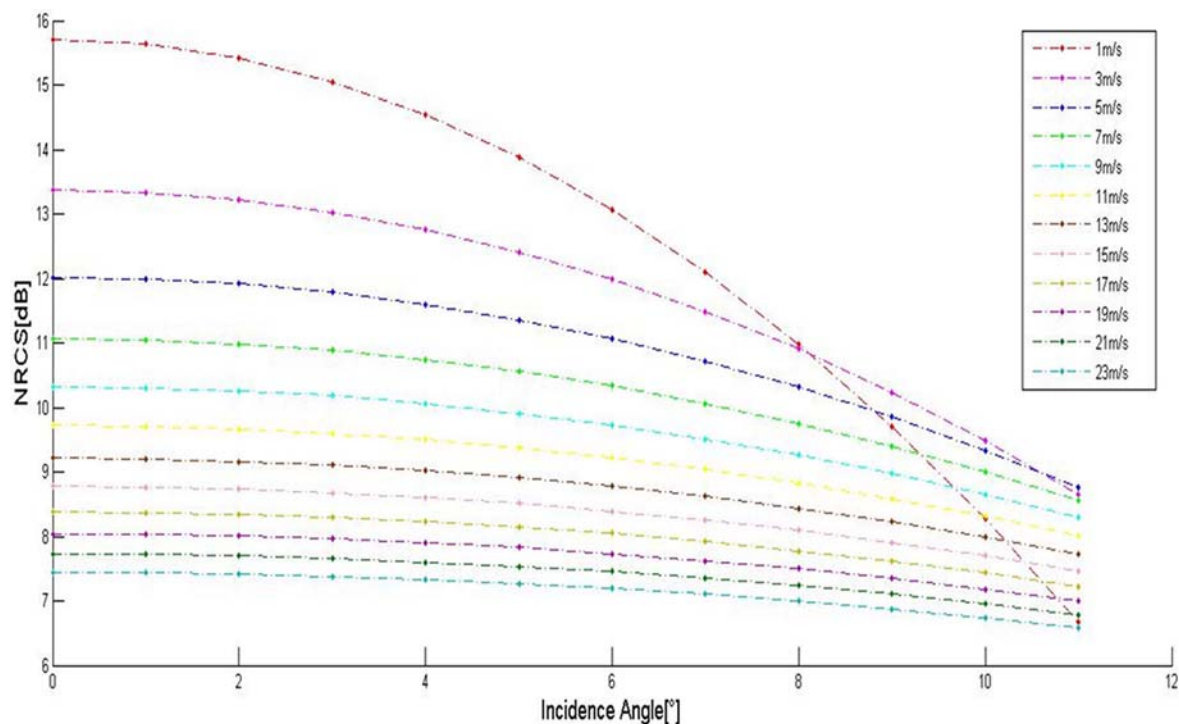
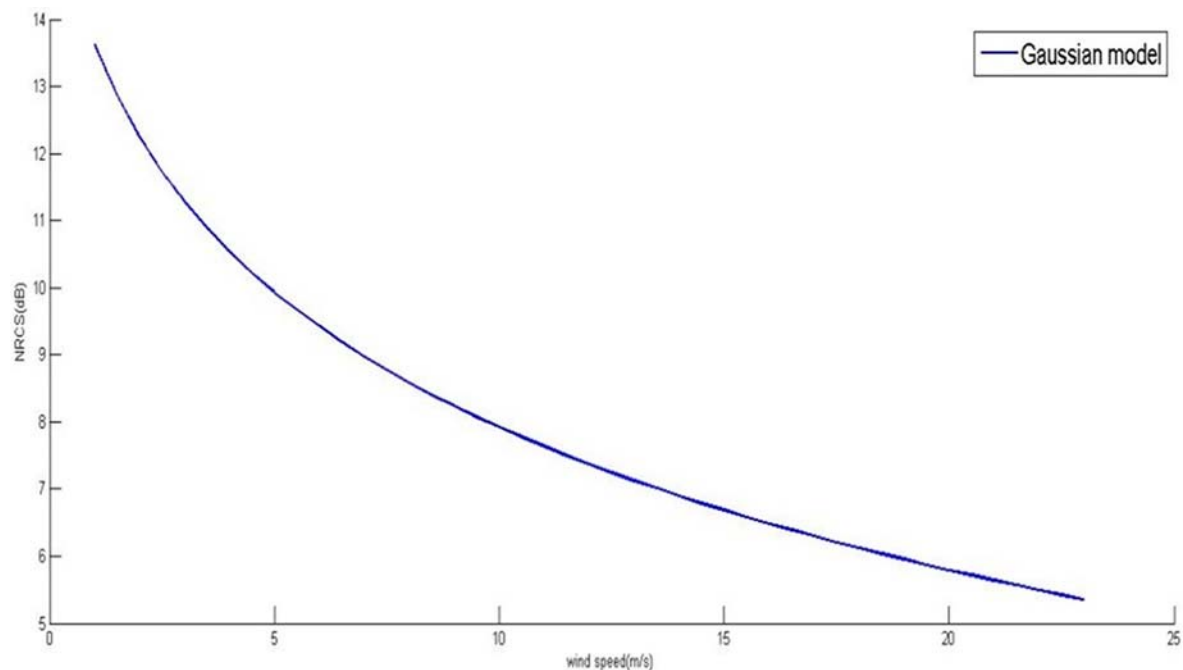


图 4 基于 Gaussian 分布的海面镜面散射

图 5 基于 Gaussian 分布的 94 GHz 以及  $0^\circ$  入射角下的 NRCS 随风速的变化情况

#### 4 结束语

国内测云雷达的相关标准还未问世,更谈不上定标标准。本文结合国外机载测云雷达外定标实验以及相关的天气雷达定标方案,并根

据国内机载测云雷达外定标的实际情况,开展了外定标流程的拟制工作。在进行外定标实验时,还存在很多问题需要研究。例如,定标场地的选择、飞机与测量船的航线设计以及实验测

量的同步配合等诸多问题是下一步研究工作的重点。

### 参考文献

- [1] Pasqualucci F. Drop Size Distribution Measurements in Convective Storms with a Vertically Pointing Doppler Radar [J]. *Radio Science*, 1984, **19**(1): 177–183.
- [2] Sekelsky S M, Li L, Sadowy G A, et al. Measurements of Atmospheric Extinction Using Combined Airborne and Ground-based 95 GHz Radar Observations [C]. Hamburg: IEEE Int Geoscience and Remote Sensing Symp, 1999: 461–463.
- [3] Li L. Retrieval of Atmospheric Attenuation Using Combined Ground-based and Airborne 95-GHz Cloud Radar Measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, **18**(2): 1345–1353.
- [4] Li L. A 94-GHz Cloud Radar System on a NASA High-altitude ER-2 Aircraft [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, **21**(1): 1378–1388.
- [5] 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.
- [6] 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, **21**(4): 383–391.
- [7] 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.
- [8] 马占山, 刘奇俊, 秦琰琰, 等. 云探测卫星 CloudSat [J]. *气象*, 2008, **34**(8): 105–111.
- [9] 严卫, 杨汉乐, 周兴旺. A-Train 卫星编队及其在云研究领域中的应用 [J]. *遥感信息*, 2008, **26**(2): 93–96.
- [10] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生, 等. 第 27 届中国气象学会年会雷达技术开发与应用分会场论文集 [C]. 北京: 第 27 届中国气象学会年会, 2010.
- [11] 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]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [12] 高磊, 范亚驹. W 波段测云雷达探测能力分析 [J]. *科技发展*, 2013, **20**(4): 103–104.
- [13] Li L, Gerald M H, Lin T, et al. Measurements of Ocean Surface Backscattering Using an Airborne 94-GHz Cloud Radar — Implication for Calibration of Airborne and Spaceborne W-band Radars [J]. *Atmospheric Oceanic Technology*, 2005, **22**(7): 1033–1045.
- [14] Tanelli S, Durden E, Im E, et al. CloudSat's Cloud Profiling Radar after 2 years in Orbit: Performance, Calibration, and Processing [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(11): 3560–3573.
- [15] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive [M]. Norwood: Artech House, 1981.
- [16] Kozu T. A Generalized Surface Echo Radar Equation for Down-looking Pencil Beam Radar [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, **78**(8): 1245–1248.
- [17] Sekelsky S M, Li L, Sadowy G A, et al. Measurements of Atmospheric Extinction Using Combined Airborne and Ground-based 95 GHz Radar Observations [C]. Hamburg: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999.
- [18] Hans J L. MPM - an Atmospheric Millimeter-Wave Propagation Model [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1989, **10**(6): 631–650.
- (上接第 13 页)
- [24] 肖韶荣. 大气监测光纤气体传感器的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [25] 肖韶荣, 陈进榜, 高志山, 等. 基于直角棱镜的光纤光度传感器 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1513–1517.
- [26] 肖韶荣, 高志山, 廖延彪. 基于直角棱镜的气体传感器在能见度测量中的应用 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 81–84.
- [27] Zhu S Y, Chen Y P, Zhang G, et al. A Near-infrared Optical Fiber Sensor for Carbon Monoxide Concentration Monitoring [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, **52**(10): 2192–2195.
- [28] Weldon V, O'Gorman J, Phelan P, et al. H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> Gas Sensing Using DFB Laser Diodes Emitting at 1.57  $\mu\text{m}$  [J]. *Sensors and Actuators B*, 1995, **29**(1): 101–107.
- [29] 张增福, 邹得宝, 陈文亮, 等. 基于多次反射样品池的 TDLAS 逃逸 NH<sub>3</sub> 检测研究 [J]. *光电子·激光*, 2013, **22**(12): 2367–2371.