

文章编号: 2096-1618(2017)06-0597-04

# 基于角反射器的机载毫米波云雷达外定标实验

文 韬<sup>1</sup>, 姚志刚<sup>2</sup>, 赵增亮<sup>2</sup>, 苏涛<sup>3</sup>, 杨文凯<sup>4</sup>, 何明元<sup>5</sup>

(1. 31008 部队, 北京 100091; 2. 北京应用气象研究所, 北京 100020; 3. 安徽四创公司, 安徽 合肥 230000; 4. 31010 部队, 北京 100000; 5. 国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

**摘要:**2016年4月19-24日,在合肥市肥西县紫蓬山试验场开展了基于角反射器的定标试验,完成了地面静态条件下机载毫米波云雷达的标定。定标数据的分析表明,毫米波云雷达探测器在标准模式(脉冲宽度0.33 μs)和增强模式(脉冲宽度1.32 μs)两种模式下,测量得到的角反射器强度值与理论值的均方根误差分别为0.182 dB和0.197 dB。为下一步开展基于晴空海面的外定标实验打下基础。

**关键词:**机载毫米波云雷达;外场;定标

中图分类号:TN953

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.06.004

## 0 引言

雷达系统的定标可分内定标和外定标两种情况。内定标的假定条件是雷达系统性能的变化能够用可测量参数进行表示<sup>[1]</sup>,因而内定标对测量短时间内系统的相对漂移是有用的。一般来讲内定标有两种方法,一种是对雷达系统各部分进行分别标定;另一种是将发射信号的取样值引入数据处理系统中进行比较,俗称比率法定标。后一种方法由于产生误差的机会少而被广泛应用。雷达系统外定标主要包括两个方面:一是对雷达本身进行标定,利用诸如角反射器等点目标对雷达系统进行标校<sup>[2]</sup>。通过对已知后向散射截面积的角反射器进行观测,比较其与实际观测值的差异,从而对雷达全系统的误差进行校正,该方法通常针对地基雷达。二是标定在不同工作环境下由于安装、飞行等因素带来的误差。以机载毫米波云雷达为例,通常利用海平面作为标校源对雷达进行标校,通过对海表散射的理论计算值与实际观测值的对比,对机载平台下毫米波云雷达进行校正<sup>[3]</sup>。

开展利用角反射器的机载毫米波云雷达外场定标实验,为下一步开展基于晴空海面的外定标打下基础。

## 1 基于角反射器的外场定标实验

### 1.1 定标场方案介绍

综合现有条件,外场定标实验场地选择在合肥市肥西县紫蓬山测试场,位于紫蓬山风景区内,主要包括大

公山山顶测试塔和山下的堰湾湖畔测试接收场。大公山山顶占地面积29.4亩,由天线测试塔、配套用房和门房等组成,建筑面积约1900平方米。紫蓬山天线测试塔由主塔和裙房组成,主塔结构高48.9米,塔尖高约71.54米;通过主塔的电梯可以直达塔体40米高处的测试平台。紫蓬山下的堰湾湖畔测试接收场占地面积360亩,可以和测试塔配套使用。详见图1、2实地照片。



图1 紫蓬山测试场布局图



测试塔

大公山顶

图2 紫蓬山测试场

收稿日期:2017-03-31

基金项目:国家重大专项课题资助项目(GFZX04032206、GFZX04021201);部级重点课题资助项目(QX2015040311A12005)

## 1.2 设备及布设

外定标实验所需设备包括:角反射器、高塔、吸波材料及云雷达。定标场布置如图3所示,角反射器的高度约为90 m,待标定的云雷达探测器架设在高度约为3 m的铁架或方舱上,角反射器与待标定的云雷达探测器的水平直线距离约为500 m。此外,为了减小铁塔反射对标定精度的影响,在反射器周围的铁塔区域加装吸波材料。

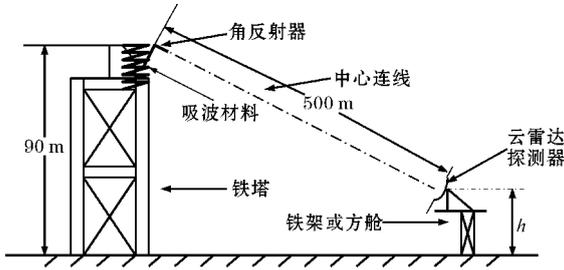


图3 定标场布置示意图

## 1.3 定标实施方案

根据天气雷达方程计算与云雷达探测器在固定距离处角反射器的理论回波强度值。天气雷达方程为:

$$P_r = \frac{\pi^3 |k|^2}{1024 \ln 2} \times \frac{P_t G^2 \theta \varphi c \tau}{\lambda^2} \times \frac{Z}{R^2} \quad (1)$$

式(1)中,  $P_r$ : 雷达接收机接收到的回波功率;  $G$ : 天线增益;  $\theta$ 、 $\varphi$ : 天线波束水平、垂直方向宽度;  $c$ : 电磁波传输速度 ( $3 \times 10^8$  m/s);  $\tau$ : 发射脉冲宽度;  $\lambda$ : 雷达工作波长;  $Z$ : 气象目标反射率因子;  $R$ : 目标距离;  $|k|^2$ : 表示复数模的平方, 对于 W 波段, 取  $|k|^2 = 0.712$ 。代入上述参数, 式(1)可改为:

$$Z = \frac{1024 \ln 2}{|k|^2 \pi^3 \times 3 \times 10^8} \times \frac{\lambda^2 P_r R^2}{P_t \tau \theta \varphi G^2} \quad (2)$$

对上述取  $10 \lg Z$  即得:

$$10 \lg Z = C + P_r + 20 \lg R + R \times Lat \quad (3)$$

式(3)中  $P_r$  为接收功率, 单位: dBm;  $C$  为雷达常数;  $R$  为云雷达探测器和角反射器之间的距离, 单位: km;  $Lat$  为大气衰减, 单位: dB/km。

其中接收功率  $P_r$  和雷达常数  $C$  分别为:

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

$$C = 10 \lg [3.518 \times \lambda^2 / (P_t \times \tau \times \theta \times \varphi)] + 160 - 2 \times G + L_\Sigma \quad (5)$$

式(4)中,  $\sigma$  为目标的散射截面积(角反射器是定标的, 因此具体尺寸可以确定), 单位:  $m^2$ 。

式(5)中:  $L_\Sigma$  为馈线系统收、发损耗; 可以通过各

分系统测试得到数据。

三面角反射器的雷达截面  $\sigma$  由 Levanon<sup>[5]</sup> 给出如下:

$$\sigma = k \frac{a^4}{\lambda^2} \quad (6)$$

$a$  为反射器轴长, 单位为 m;  $\lambda$  为雷达波长, 单位为 cm;  $k$  为系数, 取值 0.02, 由厂家提供。

云雷达探测器针对角反射器方向进行定向探测得到回波数据与理论值进行比较, 以验证云雷达的工作状态。

针对大气衰减部分, 采用估算的方式进行: 在标准大气条件下, 94 GHz 的氧气衰减率为 0.0373 dB/km, 水汽衰减率 0.3675 dB/km, 大气总衰减率 0.4048 dB/km。当角反射器与云雷达探测器距离为 500 m 时, 其双程总衰减为 0.4048 dB, 将该值作为定标修正值带入系统指标中。毫米波云雷达相关技术指标和参数详见表 1。

表1 机载毫米波云雷达相关技术指标和参数

参数	参数说明	单位	取值
$\lambda$	雷达工作波长	cm	0.317
$P_t$	发射机输出功率(等效)	kW	1.5
$\tau$	发射脉冲宽度(等效)	$\mu s$	0.33
$\theta$	水平波束宽度	( $^\circ$ )	0.487
$\varphi$	垂直波束宽度	( $^\circ$ )	0.479
$G$	天线增益	dB	52.29
$L_\Sigma$	馈线总损耗(收发)	dB	6.8
$Lat$	大气衰减(双程)	dB/km	0.8
$a$	反射器边长	m	0.0625
$R$	雷达与角反射器的直线距离	km	0.5

在实验中, 经计算云雷达距角反射器 500 m 处的回波反射率理论值为 21.71 dBZ。

## 2 结果分析及讨论

2016 年 4 月 19 日, 天气晴朗。项目组对雷达进行了第 1 次定标测试, 表 2 和表 3 分别为标准模式和增强模式下毫米波云雷达第一次定标测试数据。

表2 第1次定标测试数据(标准模式 0.33  $\mu s$ )

	1	2	3	4	5
发射功率/kW	1.538	1.556	1.528	1.538	1.562
脉冲宽度/ $\mu s$	0.33	0.34	0.33	0.33	0.34
回波理论值/dBZ	21.72	21.59	21.72	21.72	21.59
回波测试值/dBZ	20.46	20.18	20.50	20.52	20.16
差值/dBZ	-1.26	-1.41	-1.22	-1.2	-1.43
均方根误差	1.308				

注: 2016 年 4 月 19 日 9:30 开始测试, 测试时每隔 20 分钟测试 1 次。

表 3 第 1 次定标测试数据(增强模式 1.32 μs)

	1	2	3	4	5
发射功率/kW	1.536	1.561	1.538	1.526	1.566
脉冲宽度/μs	1.32	1.33	1.33	1.32	1.32
回波理论值/dBZ	15.69	15.66	15.66	15.69	15.69
回波测试值/dBZ	14.43	14.4	14.38	14.28	14.36
差值/dBZ	-1.26	-1.26	-1.28	-1.41	-1.33
均方根误差	1.309				

注:2016 年 4 月 19 日 11:00 开始测试,测试时每隔 20 分钟测试 1 次。

通过对上述实验数据分析表明,回波测试值与理论值的均方根误差>1 dB,回波差值折线图见图 4。

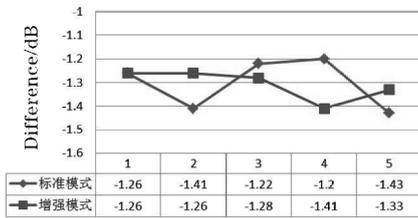


图 4 第 1 次定标测试数据回波差值折线图

图 4 显示回波强度差值是向一个方向偏离(负偏离),其数值按一定规律变化,这是系统误差的特点。此系统误差可能是波导损耗或雷达参数不准确造成。为找到系统误差来源,对云宏微观参数探测器的馈线进行重新测试并检查写入终端的雷达参数,结果发现在终端写入的馈线总损耗(收发)值是 5 dB,与实测值 6.8 dB 不符;分析原因是云雷达探测器为保证其密封性,在后期增加了 2 个密封窗,其损耗为 1.8 dB,而 2 个密封窗的损耗并未代入终端软件中,从而造成回波测试值比理论值偏弱,均方根误差>1 dB,是造成系统误差的主要原因。

2016 年 4 月 20 日,天气晴朗。项目组开展了第 2 次定标测试,同时把馈线总损耗 6.8 dB 重新写入终端软件中。测试结果及云雷达探测器在不同时间点测试的发射功率、脉冲宽度依据表 3 计算的回波理论值记录于表 4 和表 5。

表 4 第 2 次定标测试数据(标准模式 0.33 μs)

	1	2	3	4	5
发射功率/W	1540	1546	1538	1550	1558
脉冲宽度/μs	0.33	0.34	0.33	0.33	0.34
回波理论值/dBZ	21.72	21.59	21.72	21.72	21.59
回波测试值/dBZ	22.25	22.00	22.18	22.34	22.12
差值/dBZ	0.53	0.41	0.46	0.62	0.53
均方根误差	0.52				

注:2016 年 4 月 22 日 9:10 开始测试,测试时每隔 20 分钟测试 1 次。

表 5 第 2 次定标测试数据(增强模式 1.32 μs)

	1	2	3	4	5
发射功率/W	1545	1551	1546	1518	1566
脉冲宽度/μs	1.32	1.33	1.33	1.32	1.32
回波理论值/dBZ	15.69	15.66	15.66	15.69	15.69
回波测试值/dBZ	16.19	16.08	16.15	16.05	16.18
差值/dBZ	0.50	0.42	0.49	0.36	0.49
均方根误差	0.455				

注:2016 年 4 月 22 日 11:30 开始测试,测试时每隔 20 分钟测试 1 次。

根据上述实验结果,标准模式和增强模式下回波测试值与理论值的均方根误差分别为 0.52 dB 和 0.455 dB,回波差值折线图见图 5。

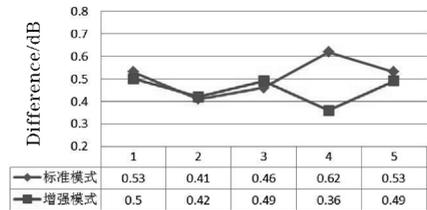


图 5 第 2 次定标测试数据回波差值折线图

图 5 显示回波强度差值是向一个方向偏离(正偏离),表明系统还存在固有误差,上述误差值约为 0.481,此误差可能来源于对雷达参数测试的仪表测量误差(包括天线参数、波导损耗等测量误差),为使外场定标更加准确,将系统的固有误差 0.481 作为修正值引入雷达终端软件中,以进一步提高强度测量精度。

2016 年 4 月 24 日,天气晴朗。项目组组织了第 3 次定标测试,同时把系统的固有误差值 0.481 写入终端软件中。测试结果见表 6 和表 7。

表 6 第 3 次定标测试数据(标准模式 0.33 μs)

	1	2	3	4	5
发射功率/W	1545	1555	1559	1528	1567
脉冲宽度/μs	0.33	0.34	0.33	0.33	0.34
回波理论值/dBZ	21.72	21.59	21.72	21.72	21.59
回波测试值/dBZ	21.93	21.38	21.70	21.90	21.80
差值/dBZ	0.21	-0.21	-0.02	0.18	0.21
均方根误差	0.182				

注:2016 年 4 月 24 日 9:00 开始测试,测试时每隔 20 分钟测试 1 次。

表 7 第 3 次定标测试数据(增强模式 1.32 μs)

	1	2	3	4	5
发射功率/W	1575	1533	1548	1573	1588
脉冲宽度/μs	1.32	1.33	1.33	1.32	1.32
回波理论值/dBZ	15.69	15.66	15.66	15.69	15.69
回波测试值/dBZ	15.92	15.63	15.88	15.98	15.60
差值/dBZ	0.23	-0.03	0.22	0.29	-0.09
均方根误差	0.197				

注:2016 年 4 月 24 日 11:00 开始测试,测试时每隔 20 分钟测试 1 次。

最后,两种模式下得出的回波强度实测值与理论值的均方根误差 $<0.2$  dB,均方根误差折线图见图6。回波强度实测值与理论值的误差较第2次定标测试明显减小,这种误差是随机误差。判断可能由于环境湿度、温度、电源电压不稳定等因素的影响而产生微小变化。

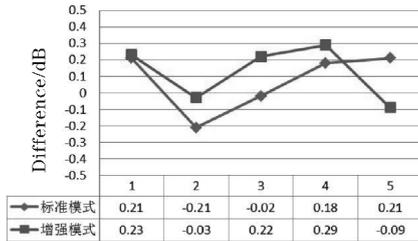


图6 第3次定标测试数据回波差值折线图

其后,每隔一定时间(例如1年或2年)在相同天气条件下进行重复定向探测,将得到的回波数据与参考数值进行比较,以验证雷达的工作状态,并根据差异情况对探测结果进行校正。

利用安徽四创公司研制的机载毫米波云雷达,开展了地面静态条件下的标定实验及数据分析,其中标准模式均方根误差为0.182 dB,增强模式均方根误差为0.197 dB,均满足小于1 dB的指标要求,为下一步开展基于海面观测的外定标打下基础。

### 3 结束语

当前,中国在机载和星载上进行主动遥感的气象

探测手段基本为空白<sup>[6]</sup>,结合国内毫米波云雷达发展的实际情况,开展了针对机载毫米波云雷达基于角反射器的外场定标实验,定标实验结果比较理想,对提高机载平台下主动遥感探测器毫米波云雷达的数据质量具有重要意义,为后续开展机载平台下基于海面的外定标作业打下基础。

### 参考文献:

- [1] 辛培泉,何东元. 星载合成孔径雷达系统的内定标[J]. 现代雷达,2006,28(5):71-74.
- [2] Sekelsky S M. Near-Field Reflectivity and Antenna Boresight Gain Corrections for Millimeter-Wave Atmospheric Radars [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology,2002,19(4):468-477.
- [3] 文韬,赵增亮,姚志刚,等. 机载毫米波测云雷达定标技术[J]. 红外,2016,37(1):23-30.
- [4] Kozu T. A Generalized Surface Echo Radar Equation for Down-Looking Pencil Beam Radar [J]. Ie-ice Transactions on Communications, 1995, 78(8):1245-1248.
- [5] Wen T,Zhao Z L,Yao Z G,et al. External calibration technique of millimeter-wave cloud radar [C]. International Symposium on Optoelectronic Technology and Application. 2016:101570S.
- [6] 高玉春. 机载气象雷达探测系统总体关键技术研究 [D]. 北京:北京邮电大学,2009.

## External Calibration Experiment of Airborne Millimeter-wave Cloud Radar Using Corner Reflectors

WEN Tao<sup>1</sup>, YAO Zhi-gang<sup>2</sup>, ZHAO Zeng-liang<sup>2</sup>, SU Tao<sup>3</sup>, YANG Wen-kai<sup>4</sup>, HE Ming-yuan<sup>5</sup>

(1. No. 31008 Troops of PLA, Beijing, 100091, China; 2. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China; 3. Anhui sishuang Electronic Limited by Share Ltd, Hefei 230000, China; 4. No. 31010 Troops of PLA, Beijing 100000, China; 5. Institute of Meteorology National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China)

**Abstract:** On April 2016 19-24, the field test Zipeng corner reflector calibration test was carried out based on calibrated ground static conditions of airborne millimeter wave cloud radar in Feixi County of Hefei city. Calibration and analysis of the data shows that millimeter wave cloud radar detector in standard mode (pulse width is 0.33  $\mu$ s) and enhanced mode (pulse width is 1.32  $\mu$ s) under two modes, corner reflector strength measurement values obtained by the root mean square error and the theoretical values are 0.182 dB and 0.197 dB respectively. To lay the foundation for the next step the external calibration experiments was carried out based on clear sky sea.

**Keywords:** airborne millimeter wave cloud radar; outfield; calibration