

# 广州新一代双偏振天气雷达的性能测量和分析\*

谢宸浩,黎德波,张羽,薛健仁

(广州市气象局,广东广州 510000)

**摘要:**随着我国双偏振雷达的布网以及投入业务运行的数量增多,对双偏振雷达的稳定性要求也越来越高,因此对双偏振雷达进行业务评估,可为未来我国双偏振雷达的实时业务化标定以及双偏振雷达的升级提供参考。本研究从广州新一代双偏振天气雷达(以下简称广州雷达)的机内标定长期稳定性、全链路标定一致性、接收链路一致性以及旋转关节对接收链路一致性4个方面开展评估。测量和分析结果表明,广州雷达接收通道标定的差分相移值、机内峰值功率波动和相位噪声范围偶有超标情况,其余参数均达到性能指标要求。根据连续大半年的运行监测来看,广州雷达整体运行比较稳定,尤其是最关键的机内双通道差分反射率一致性较好。整个接收链路两个通道的差异波动较小,状态比较稳定,满足国内双偏振雷达指标要求。此外,双偏振的相位噪声和接收机动态性能较单偏振都提高不少。

**关键词:**双偏振雷达 稳定性 一致性 差分反射率

中图分类号:TN956 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2019)02-0124-08

## 0 引言

广州 CINRAD/SA 新一代天气雷达(以下简称广州雷达)是广东省第一部、全国第三部布设的新一代天气雷达,于1999年7月开始土建,2000年12月25日完成现场测试,2001年6月28日开始运行,2016年5月完成双偏振升级,至今已有17年,广州雷达累积运行时间超过 $1.2 \times 10^5$  h。

在广州雷达进行双偏振升级后,其各项性能达到同型号最新批次雷达出厂时的技术性能和技术指标要求。完美地解决了珠三角地区汛期气象服务和地方重大社会活动保障需求日益增多的问题,同时,也

确保了雷达在汛期内正常业务运行,全面提升广州新一代天气雷达的可靠性、稳定性和使用性,充分满足地方经济建设及珠三角地区气象灾害联防服务需要。

双偏振雷达在降水粒子的相态和形状识别、融化层探测和定量降水估计算法方面具有独特的优势,可以在天气预报和预警业务中发挥重要的作用<sup>[1]</sup>。而对于双偏振天气雷达的性能要求,差分反射率(ZDR)的期望精度值为 $\pm 0.2$  dB,远高于一般的单极化天气雷达的 $\pm 1$  dB反射率测量精度要求。而ZDR的测量误差主要来自雷达系统,即由雷达硬件造成的误差,所以ZDR的测量精度取决于雷达硬件系统的标定结果<sup>[2]</sup>。同时,随着投入业务运行的双偏振雷达数量增多,对双偏振雷达运行的稳定性也提出

\*广州市气象大数据融合应用技术创新团队及广州市气象局科技项目(201622)资助。

### 【作者简介】

谢宸浩(1992—),男,助理工程师,主要从事天气雷达技术研究,E-mail:884498536@qq.com。

### 【引用本文】

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20190521.004

谢宸浩,黎德波,张羽,等. 广州新一代双偏振天气雷达的性能测量和分析[J]. 广西科学院学报,2019,35(2):124-131.

XIE C H, LI D B, ZHANG Y, et al. Performance measurement and analysis of new generation dual polarization weather radar in Guangzhou [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2019, 35(2): 124-131.

了更高的要求。因此,本研究主要从机内标定长期稳定性、全链路标定一致性、接收链路一致性和旋转关节对接收链路一致性 4 个方面对广州雷达开展评估。这可以为提升双偏振雷达的可靠性、稳定性和使用性提供重要的参考价值<sup>[3]</sup>。同时,也为未来我国双偏振雷达的实时业务化标定提供参考。

### 1 机内标定长期稳定性

利用机内标定数据,通过对机内标定数据如雷达常数(SYSCAL)值、ZDR 值、差分相移(PDP)值等的长期监测,可以反映系统稳定度<sup>[4]</sup>。

测试信号来自接收机的频率源 J3 输出端口,经过测试通道(四位开关、射频数控衰减器、测试电缆、二路功分器)后进入两路接收机保护器的耦合端(J3),即图 1 中的 A 和 B 两点。测试信号进入接收机后在信号处理器端可以读取数据,所有标定数据记录在雷达数据采集系统(RDA)计算机的 LOG 文件夹下的 calibration 文件中。

广州雷达统计了 2017-03-09—2017-10-15 连续 7 个多月的机内标定文件(名称为 calibration 和 status 日志文件)和该时间段内的维护维修情况。表 1 给出了雷达的故障情况。

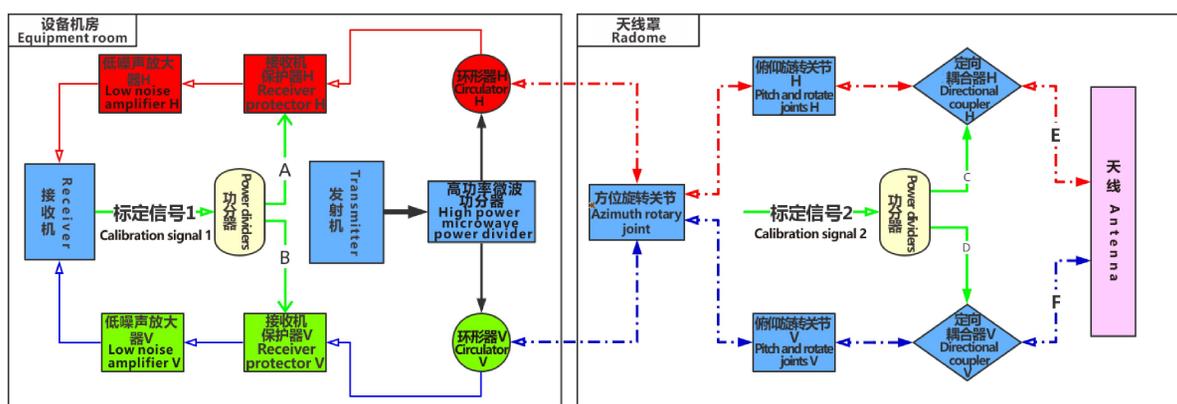


图 1 定标测试节点

Fig. 1 Scale test nodes

表 1 广州雷达故障情况

Table 1 Malfunction of Guangzhou Radar

故障开始时间 Start time of the fault	故障结束时间 End time of the fault	故障类型 The fault types	故障现象 The fault phenomenon	解决情况 Resolved situation
2017-10-15 19:20	2017-10-16 2:10	伺服系统 Server system	天线动态故障 Antenna dynamic fault	已解决 Resolved
2017-11-9 10:00	2017-11-9 13:00	发射系统 Launch system	出现低压电源、灯丝电源报警 Low voltage power supply, filament power alarm	已解决 Resolved

分别对 calibration 标定文件中 SYSCAL、接收通道标定的差分反射率值(CW ZDR)、接收通道标定的差分相移值(CW PDP)、水平通道噪声温度(Noise temperature H, 计算得到 Noise figure H)、垂直通道噪声温度(Noise temperature V, 计算得到 Noise figure V)参数数值进行提取,对 status 日志文件中的峰值功率(Peak power)、水平通道天线峰值功率(H Chan antenna peak power)、垂直通道天线峰值功率(V Chan antenna peak power)、机房内温度(Shelter temperature)、发射机通风口处温度(Xmtr air temperature)、天线罩温度(Radome temperature)进行提取,绘制长期稳定性曲线,分析机内标定长期稳

定性。

表 1 的出故障时间并没有出现数据明显问题,但是 2017 年 6 月 30 日 13:25—13:47 的共 25 组数据中 SYSCAL、CW ZDR、CW PDP(包括 3 组跳变数据)、噪声系数(Noise figure)等存在明显跳变,经查厂家在 2017 年 6 月 30 日对雷达进行维修并对问题数据进行删除,对由于非汛期期间停机、周/月维护工作等情况下峰值功率存在周期性为 0 数值进行删除。

下面分别绘制了 SYSCAL、CW ZDR、CW PDP、Noise figure、Peak power、Temperature 等参数质控前后长期变化曲线(图 2~5)。

通过对典型问题数据质控后,从图 2a 可以看出,

连续运行 7 个月期间,SYSCAL 值比较稳定的数值位于 33 dB 附近,CW ZDR 一直处于  $-0.6$  dB 附近,CW PDP 于  $18 \sim 22^\circ$  比较稳定。

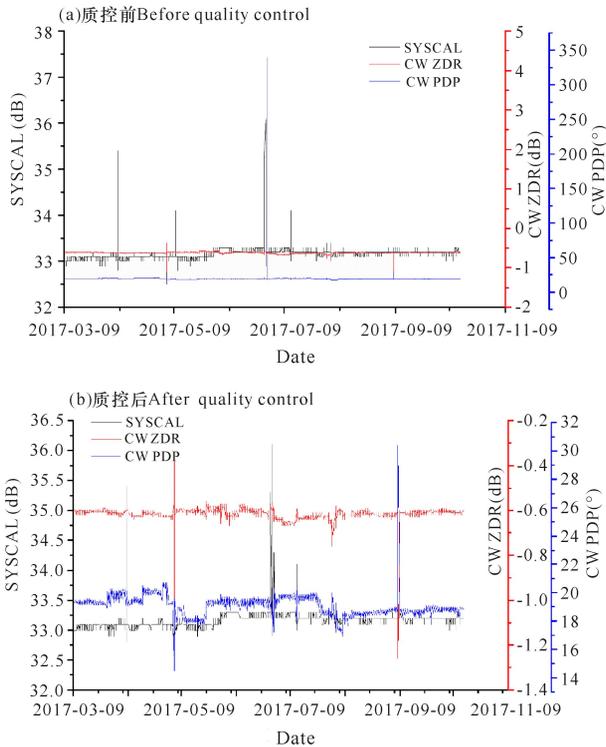


图 2 质控前后 SYSCAL、CW ZDR、CW PDP 随时间变化曲线

Fig. 2 Variation curve of SYSCAL, CW ZDR and CW PDP with time before and after quality control

从图 3a 可以看出,峰值功率连续运行 7 个月期间,出现了较多断续的 0 点值,经过质控后,可以看出 Peak power 数值相对稳定,Peak power H 数据在 3 月初不稳定(巡检测试中),其他情况下 Peak power H 和 Peak power V 数据分布稳定且具有较好一致性。

从图 4 可以看出,机房内温度(Shelter temperature)相对稳定地分布在  $20^\circ\text{C}$ 、发射机通风口处温度(Xmtr air temperature)、天线罩温度(Radome temperature)整体趋势反应比较合理,昼夜大概存在  $10^\circ\text{C}$  的温差,夏天和冬天存在  $20^\circ\text{C}$  左右的温差,这可以为接收机上移体制的温控设计提供材料。

对关键数据的长期一致性进行统计方差分析,结果如表 2 所示。从表 2 质控后的数据可以看出,CW ZDR 均值为  $-0.6149$  dB,方差为  $0.0179$  dB, CW PDP 均值为  $19.090^\circ$ ,方差为  $0.6268^\circ$ ,符合 CW ZDR 方差小于  $0.2$  dB, CW PDP 的方差小于  $3^\circ$  的要求;水平通道的噪声系数(Noise figure H)均值为

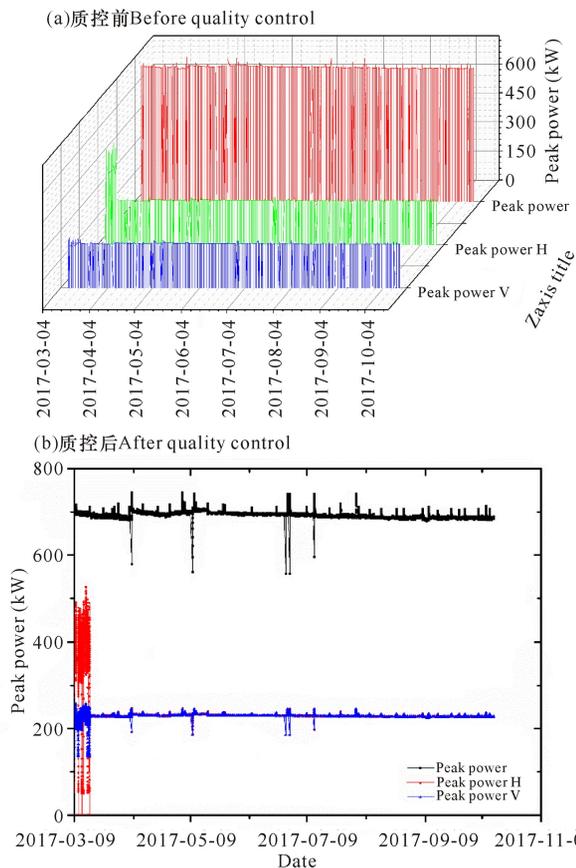


图 3 质控前后 Peak power、Peak power H、Peak power V 随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curve of Peak power, Peak power H and Peak power V with time before and after quality control

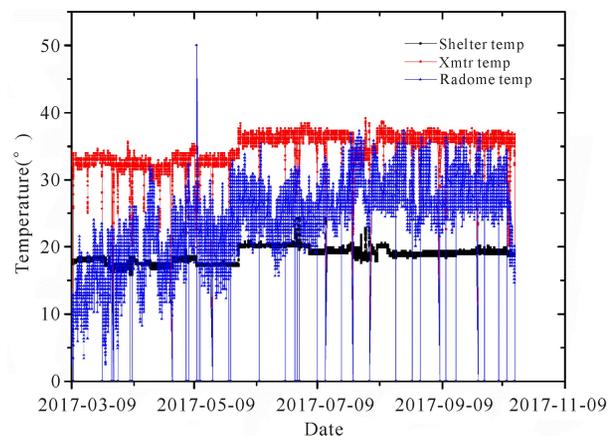


图 4 质控后温度随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of temperature change with time after quality control

2.2099 dB、垂直通道的噪声系数(Noise figure V)的均值为  $2.1796$  dB,符合小于  $3$  dB 的要求。从图 5 可以看出,噪声系数(Noise figure)数值在雷达连续运行的过程中也比较稳定。峰值功率的均值为  $692.2625$  kW,符合大于  $650$  kW 的要求,波动为

0.035 dB, 满足波动小于 0.3 dB 的要求; H 和 V 通道的差异均值为 0.01 dB, 方差为  $8.3786 \times 10^{-4}$  dB。为了进一步统计 CW ZDR/CW PDP 的变化趋势, 对

每个月监控的数据做均方差值, 得到表 3, 并做出随月份变化的曲线。

从图 6 可以看出, 广州市雷达接收机测得的

Table 2 Statistical analysis results of key data of Guangzhou Radar

项目 Project	关键参数 Key parameters							
	SYSCAL (dB)	CW ZDR (dB)	CW PDP (°)	Noise figure H (dB)	Noise figure V (dB)	Peak power (kW)	Peak power H (kW)	Peak power V (kW)
质控前均值 Mean before quality control	33.161 1	-0.614 6	19.109 5	2.209 5	2.186 4	692.212 0	233.253 6	288.206 9
质控前方差 Variance before quality control	0.311 7	0.040 0	2.490 9	1.168 4	1.313 6	6.672 8	33.366 6	6.015 7
质控后均值 Mean after quality control	33.160 8	-0.614 9	19.090 0	2.209 9	2.179 6	692.262 5	229.174 3	228.647 4
质控后方差 Variance after quali- ty control	0.224 9	0.017 9	0.626 8	1.167 4	1.186 1	5.630 0	1.876 6	1.872 4
备注 Note	—	—	—	—	—	去除维护 时 0 kW 点 Remove 0 kW point for maintenance	去除 213 三 个波动点 Remove the 3 wave points of 213	—

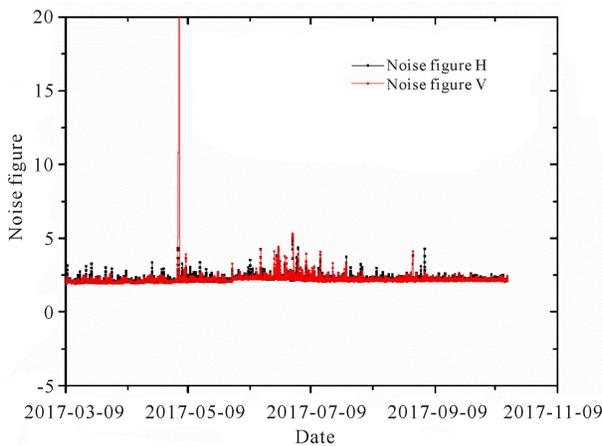


图 5 质控后 Noise figure 随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curve of Noise figure with time after quality control

表 3 CW ZDR/CW PDP 随着月份变化曲线

Table 3 Monthly variation curve of CW ZDR/CW PDP

月份 Month	CW ZDR		CW PDP	
	均值 Mean	方差 Variance	均值 Mean	方差 Variance
3月 March	-0.6053	0.0058	19.3964	0.2283
4月 April	-0.6169	0.0075	19.8599	0.3673
5月 May	-0.6032	0.0164	18.6460	0.0164
6月 June	-0.6082	0.0174	19.3482	0.1669
7月 July	-0.6391	0.0130	19.4769	0.4147
8月 August	-0.6213	0.0177	18.4020	0.3997
9月 September	-0.6123	0.0125	18.7571	0.2436
10月 October	-0.6069	0.0062	18.7960	0.1831

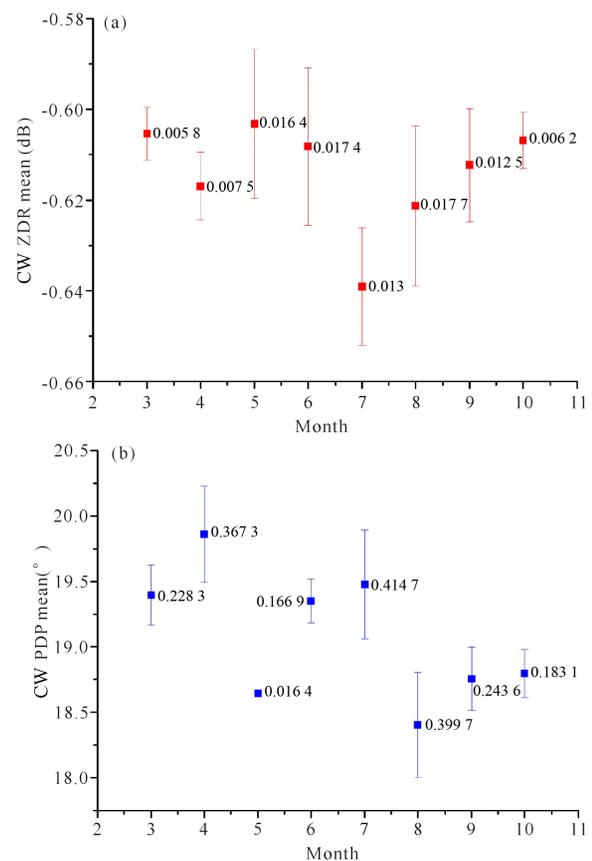


图 6 CW ZDR 和 CW PDP 均方差值按照月份变化曲线

Fig. 6 Monthly variation curve of CW ZDR and CW PDP mean variance values

CW ZDR、CW PDP 均值和方差按月份波动都较小,其中 CW ZDR 的方差从 0.005 8 dB 变化到 0.017 4 dB, CW PDP 的方差从 0.016 4°变化到 0.414 7°,雷达整体运行比较稳定。

## 2 全链路标定一致性

由于小雨所含的降水粒子多数呈圆球形状,统计意义上差分反射率因子应为 0<sup>[5]</sup>。利用小雨法做天顶标定,可以对整个双偏振雷达系统进行幅度和相位的检查<sup>[6]</sup>。天顶标定命令天线指向垂直位置(仰角为 90°),同时发射机处于发射状态,接收机接收天顶反射回来的信号,经过信号处理器计算出系统的 ZDR,旋转一周后用所有方向上的有效 ZDR 估计系统整个收发链路 ZDR 偏移。

广州雷达于 2017 年 3 月 7 日抓住一次适合做小雨法的过程,对广州雷达进行了 4 次小雨法标定,结果分别为 -0.412, -0.520, 0.464, 0.050, 标定情况如图 7 所示。

小雨天气时,天顶标定理论得到的 ZDR 为 0,实际得到的 ZDR 可以作为系统 ZDR 偏差。从广州雷达小雨法测试的结果来看,有正有负,偏差较大,有两方面原因:

(1)降水回波强度不同。虽然被称为小雨法,但在实际应用中发现在小雨时是很难同时满足进行天顶标定的各项条件,回波强度要在 30 dBz 附近,而且 ZDR 和协相关系数(CC)表现出明显的降水特征才能得到正确的结果,如图 7a 的降水比较弱,ZDR 和 CC 就没有表现出明显的聚合特征,而图 7c 的降水强度合适,其数据可以得到合理的结果。

(2)从图 7 上面起始距离的取数范围来看,设置得不太合理,高度是 1~5 km,图 7 中显示 5 km 很可能包含了 0°层,应该剔除 0°层数据来计算;比较科学的方法是先做一组,找到 0°层高度,然后再做至少一组,取 0°层之下的数据。所以使用图 7c 0°层之下的数据可以得到合理的系统 ZDR 偏差。不同台站的海拔不同,0°层高度会随着站点和季节有差异。这是由于台站机务人员对小雨法的测试方法和原理未能充分理解造成的。

## 3 接收链路一致性

利用太阳法获得的两路接收链路数据,分析双通道一致性。太阳法标定是一种离线检查整个接收通道的幅度差异和稳定性的方法<sup>[7]</sup>,其基本原理是利用

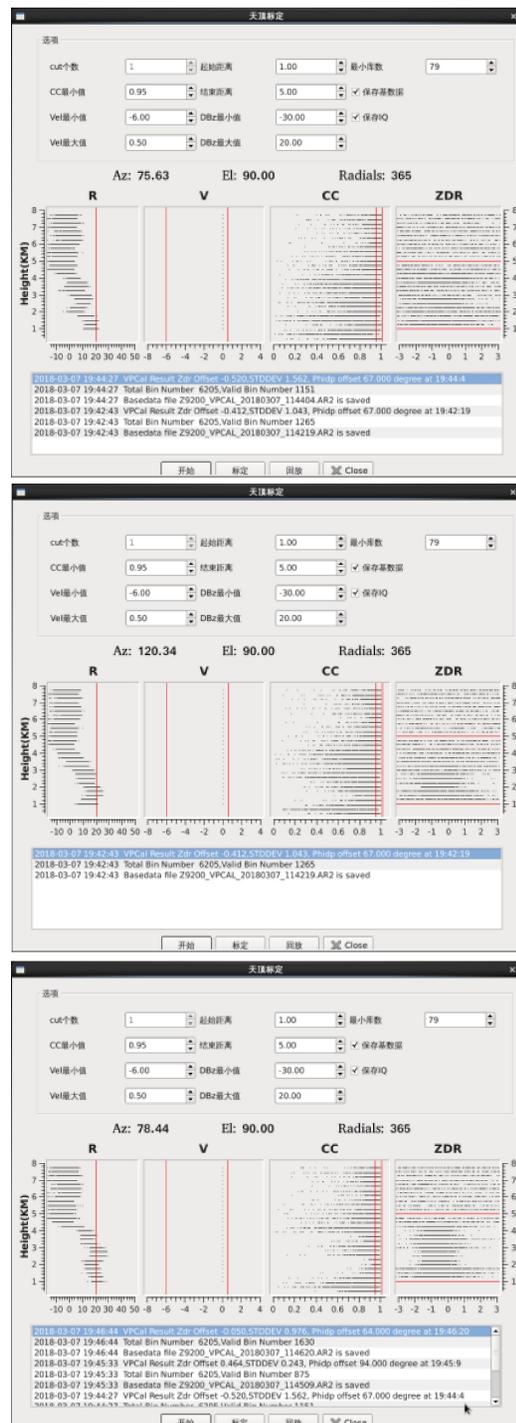


图 7 广州雷达标定结果截图

Fig. 7 A screenshot of the calibration result of Guangzhou Radar

太阳辐射电磁波的随机极化特性(即不同极化方向等概率出现),使雷达天线接收到回波功率的水平极化分量与垂直极化分量基本相同,ZDR 近似为 0 dB<sup>[8]</sup>。太阳法可用来测量包括天线和接收机在内的整个接收通道产生的 ZDR 偏差,即天馈支路(ZDRRX)与接收之路(ZDRANT)之和<sup>[9]</sup>。因此,可以检查整个接

收链路,包括天线罩、天线、馈线、方位和俯仰关节等在内的所有接收器件的稳定性。

广州雷达在每个月做一次太阳法,检查水平和垂直两个接收通道收到的太阳功率差异稳定度,连续10次太阳法标定结果如表4所示。

表4 广州雷达太阳法标定结果

Table 4 Sun calibration results of Guangzhou Radar

序号 No.	太阳辐射功率 Sun radiant power (dB)		
	H	V	差值 Difference value
1	-67.739 1	-67.330 2	-0.408 9
2	-67.676 0	-67.332 6	-0.343 4
3	-67.872 3	-67.427 7	-0.444 6
4	-67.732 1	-67.344 9	-0.387 2
5	-67.839 7	-67.425 3	-0.414 4
6	-67.882 6	-67.413 6	-0.469 0
7	-67.769 7	-67.431 1	-0.338 6
8	-67.753 5	-67.431 9	-0.321 6
9	-68.052 5	-67.670 8	-0.381 7
10	-67.787 3	-67.454 5	-0.332 8

从广州雷达10次太阳法测试结果来看,两个接收通道收到的太阳功率差异均方差维持在0.05 dB左右,这个0.05 dB包括了天线罩、天线、馈线、接收机增益、信处的量化差异,差异值比较稳定,波动很小,说明双接收通道一致性较好。

#### 4 旋转关节对接收链路一致性

在俯仰关节之上,经过波导同轴转换和定向耦合器,注入连续波测试信号,在信号处理端进行馈线的离线和在线标定<sup>[10]</sup>。

将连续波测试信号经过功分器和测试电缆后注入到接收通道内,信号注入点示意图详见图1中的E和F。测试时需要拆开俯仰关节和定向耦合器之上的波导,并接上波导同轴转换以注入测试信号到接收通道内。

在天线罩内的俯仰关节之上安装一个可以受控的标定信号源,信号源的输出幅度 $\geq 0$  dB,工作频率为雷达站点的工作频率,在线标定经过关节、馈线和接收机的双通道一致性。标定在雷达仰角抬升的过程中,方位和仰角的位置是随机的,一个体扫有12组数据。该标定数据记录在calibration日志中,分别记为TSZDR、TSPDP,对于广州雷达TSZDR的数据是

在2017-05-07—2017-10-15,历时共约6个月,绘制TSZDR和TSPDP按月变化的曲线如图8所示。可以看出,TSPDP和TSZDR的值跳变具有较强的一致性,经查2017年5月7日厂家对雷达进行维护和维修,TSPDP和TSZDR随着时间的推移渐渐稳定,下面按照月份做出了TSZDR和TSPDP的均值和方差变化表格(表5)。

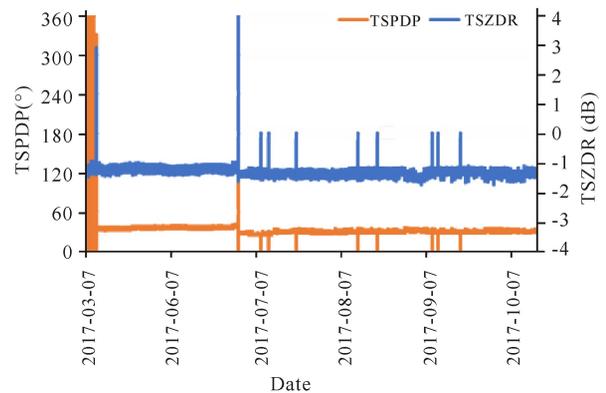


图8 TSZDR/TSPDP按照月份变化曲线

Fig. 8 Monthly variation curve of TSZDR/TSPDP

表5 广州雷达关键数据统计分析结果

Table 5 Statistical analysis results of key data of Guangzhou Radar

月份 Month	TSZDR (dB)		TSPDP (°)	
	均值 Mean	方差 Variance	均值 Mean	方差 Variance
5月 May	-1.165 8	0.052 4	29.783 6	11.220 5
6月 June	-1.234 0	0.061 3	35.683 9	1.342 9
7月 July	-1.373 0	0.064 0	28.245 1	1.734 6
8月 August	-1.348 2	0.074 1	29.663 0	1.481 3
9月 September	-1.343 2	0.097 5	30.061 1	1.465 5
10月 October	-1.373 5	0.096 8	30.061 4	1.143 4

扣除5月份有维护和维修的数据,TSZDR的均值-1.332 1 dB,方差为0.112 0 dB,TSPDP的均值为30.697 1°,方差为4.370 9°。6月份广州雷达进行了一次标定测试,拆装了俯仰关节上端口的馈线,进行了离线测试后恢复连接,所以6月份TSPDP数据出现了约5°的变化。

为了考虑能否用矫正的方法去除旋转关节对ZDR和PDP的影响,下面分别绘制了所有仰角下的旋转关节对TSZDR和TSPDP随着角度变化的曲

线,并针对  $0.5^\circ$  单一仰角绘制了 TSZDR 和 TSPDP 随着角度变化的曲线。从图 9 可以看出,广州市雷达 TSZDR/TSPDP 随着角度变化并不具有特定规律,旋转关节的影响不好简单地矫正。

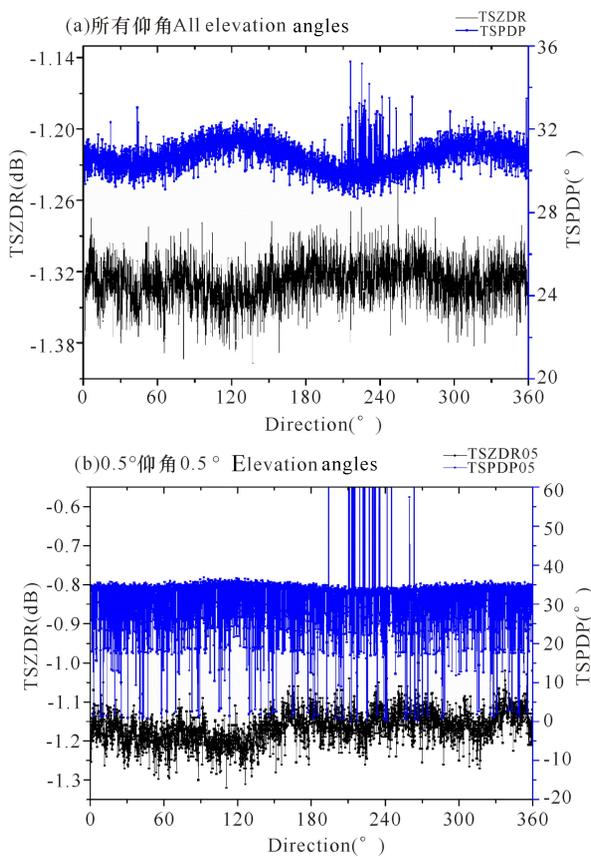


图 9 所有仰角和  $0.5^\circ$  仰角下 TSZDR/TSPDP 随着角度的变化曲线

Fig. 9 The variation curve of TSZDR/TSPDP with angle at all elevation angles and  $0.5^\circ$  elevation angle

## 5 结论

机内标定长期稳定性评估中 SYSCAL、CW ZDR、CW PDP、Noise figure、Peak power 等参数均满足技术指标要求,双通道的 Peak power H 和 Peak power V 数据分布稳定且具有较好一致性,接收机测得的 CW ZDR 和 CW PDP 均值和方差都按月份波动较小。机房内温度相对稳定地分布在  $20^\circ\text{C}$ 、发射机通风口处温度、天线罩温度整体趋势反应比较合理,昼夜大概存在  $10^\circ\text{C}$  的温差,夏天和冬天存在  $20^\circ\text{C}$

左右的温差,这可以为接收机上移体制的温控设计提供材料。全链路标定一致性评估中小雨法天气选择不合理,选取高度层不合适,结果不具有评估意义。接收链路一致性评估从太阳法测试结果来看,两个接收通道收到的太阳功率差异均方差维持在  $0.05\text{ dB}$  左右,双通道一致性较好。旋转关节长期稳定性评估中,排除 5 月份维修和 6 月份拆装了俯仰关节上端口的馈线造成的波动之外,TSZDR、TSPDP 均值和方差按月份波动都较小,系统稳定性高。TSZDR/TSPDP 随着角度变化并不具有特定规律,旋转关节的影响不好简单地矫正。

## 参考文献

- [1] 李喆,李柏,赵坤,等. 国产双偏振天气雷达差分反射率测量性能分析[J]. 气象科技, 2016, 44(6): 855-859, 895.
- [2] 李喆,王崇文,李春化,等. 双发双收双偏振天气雷达差分反射率工程标定方法[J]. 气象科技, 2014, 42(6): 951-956.
- [3] 胡胜,胡东明,汪瑛,等. 双线偏振多普勒雷达及其探测技术的应用[J]. 广东气象, 2006(4): 12-16.
- [4] 雷卫延,邝家豪,刘杨. 湛江新一代天气雷达的调试[J]. 广东气象, 2009, 31(1): 62-64.
- [5] 李汉沧,诸春龙,冯瑶. 双发双收式偏振天气雷达双通道一致性的检测[J]. 气象灾害防御, 2015(1): 40-42.
- [6] 苏德斌,孟庆春,沈永海,等. 双线偏振天气雷达天线性能要求及其检测方法[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 847-861.
- [7] 宗蓉,陈超,潘国盛. 基于模糊逻辑的双偏振多普勒雷达地物杂波抑制方法的初步应用[J]. 广东气象, 2017, 39(6): 56-59.
- [8] DOVIAK R J, BRINGI V, RYZHKOV A, et al. Considerations for polarimetric upgrades to operational WSR-880D radars [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(3): 257-278.
- [9] SACHIDANANDA M, ZRNIC D S. ZDR measurements considerations for a fast scan capability radar [J]. Radio Science, 1985, 20(20): 907-922.
- [10] 吴少峰,赵琴,胡伟峰,等. 临近雷达回波强度的误差分析及调整方法[J]. 广东气象, 2016, 38(3): 67-69.

# Performance Measurement and Analysis of New Generation Dual Polarization Weather Radar in Guangzhou

XIE Chenhao, LI Debo, ZHANG Yu, XUE Jianren

(Guangzhou Meteorological Bureau, Guangzhou, Guangdong, 510000, China)

**Abstract:** With the increase in the number of dual-polarization radars deployed and put into operation in China, the stability requirements for dual-polarization radars are becoming higher and higher. Therefore, the business evaluation of dual-polarization radars is conducted to provide reference for the real-time operational calibration of dual-polarization radars and the upgrade of dual-polarization radars in China in the future. The long-term stability of the internal calibration, the consistency of the whole link calibration, the consistency of the receiving link, and the consistency of the rotary joint to the receiving link of Guangzhou new-generation dual-polarization weather radar were evaluated. Through measurement and analysis, it is shown that the difference phase shift, the peak power fluctuation and the phase noise range of the receiving channel calibration of Guangzhou Radar occasionally exceed the standard, and the other parameters meet the performance index requirements. According to the continuous operation monitoring for more than half a year, the overall operation is relatively stable, especially the most critical consistency of the internal dual-channel differential reflectance. The difference fluctuation between the two channels of the whole receiving link is small and the state is relatively stable, and the parameters meet the requirements of domestic dual-polarization radar index. In addition, the phase noise and receiver dynamic performance of dual-polarization are much better than that of single polarization.

**Key words:** dual-polarization radar, stability, consistency, difference reflectance

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxkx.ijournal.cn/gxxkxyxb/ch>