

杨传凤,刁秀广,张骞,等.济南双偏振多普勒天气雷达在线自动标定数据质量分析评估[J].海洋气象学报,2020,40(4):114-123.

YANG Chuanfeng, DIAO Xiuguang, ZHANG Qian, et al. Analysis and evaluation of quality of automatic online calibration data of dual-polarization Doppler weather radar in Jinan[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(4): 114-123. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.013. (in Chinese)

济南双偏振多普勒天气雷达在线自动标定数据质量分析评估

杨传凤,刁秀广,张骞,魏海文
(山东省气象台,山东 济南 250031)

摘要: 阐述了 CINRAD/SA-D 双偏振多普勒天气雷达(简称“双偏振雷达”)标定技术,统计分析了济南双偏振雷达试运行以来在线自动标定数据和该时间段内的维护维修情况,从雷达几十个标定状态性能参数中,遴选对雷达探测数据质量影响最大的发射峰值功率 P_1 、相位噪声 σ_ϕ 、噪声系数 N_F 、反射率标定系数 SYSCAL、差分反射率因子 Z_{DR} 、差分传播相移 Φ_{DP} 等性能参数,分析评估在线自动标定数据质量。结果表明:1)峰值功率维持在 679.68 kW, H(水平)和 V(垂直)双通道的峰值功率长期运行吻合一致性较好。2)H 和 V 双通道噪声系数均值分别维持在 1.66 dB 和 1.73 dB,双通道数据总体分布稳定,且具有较好的一致性;标定数据的异常来源于外界干扰,占 0.39%,受外界干扰 H 通道多于 V 通道,干扰造成接收机灵敏度降低了 1.5 dB,导致雷达产品异常。3)反射率标定 $\Delta SYSCAL$ 最小值为 -0.46 dB,最大值为 0.25 dB,满足 ± 2 dB 的技术指标要求。4)I/Q 相角法标定相位噪声均值为 0.0513° ,实物对消能力 60 dB 与估测地物杂波抑制能力 61.36 dB 结果基本吻合,证实了雷达系统具有较好的地物杂波抑制能力。5)采用机内 CW/TS 双信号源标定法,接收双通道幅度和相位的标准差: Z_{DR-CW} 和 Φ_{DP-CW} 分别为 0.025 dB 和 0.735° , Z_{DR-TS} 和 Φ_{DP-TS} 分别为 0.044 dB 和 1.116° ,满足接收双通道一致性的技术指标,但 CW 信号标定结果明显小于 TS 信号标定结果,表明双路方位旋转关节对接收链路信号幅度和相位的一致性有影响,导致 Z_{DR-TS} 和 Φ_{DP-TS} 标定结果比 Z_{DR-CW} 和 Φ_{DP-CW} 出现更大的偏差,因此随着双偏振雷达的长期运行,对方位旋转关节带来的幅度和相位固有偏差进行测试和订正非常重要。

关键词: 双偏振多普勒天气雷达; 标定技术; 数据分析; 双通道一致性

中图分类号: TN959.4 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2020)04-0114-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.013

Analysis and evaluation of quality of automatic online calibration data of dual-polarization Doppler weather radar in Jinan

YANG Chuanfeng, DIAO Xiuguang, ZHANG Qian, WEI Haiwen
(Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract This paper describes the calibration technology of CINRAD/SA-D dual-polarization Doppler weather radar (dual-polarization radar for short) and statistically analyzes the automatic online calibration data and the maintenance and repair of Jinan dual-polarization radar since its operation. From dozens of performance parameters for radar calibration state, the parameters that have the greatest influence on the quality of radar detection data are selected to analyze and evaluate the quality of automatic online calibration data, including peak power P_1 , phase noise σ_ϕ , noise figure N_F , SYSCAL, differential

收稿日期:2020-03-03; 修订日期:2020-04-09

基金项目:山东省气象局科研项目(2019sdqxz01,2018sdqxm03,2018sdqxm08)

通信作者:杨传凤,女,正高级工程师,主要从事新一代天气雷达技术保障工作,287999392@qq.com。

reflectivity factor Z_{DR} , differential propagation phase shift Φ_{DP} . The results are as follows. 1) When the peak power maintains at 679.68 kW, the peak power of H channel (horizontal) and V channel (vertical) is consistent in long-term operation. 2) The average noise figure of H channel maintains at 1.66 dB and V channel at 1.73 dB, and the overall distribution of dual channel data is stable and has good consistency. The anomaly of the calibration data comes from external interference, accounting for 0.39%. The H channel bears more interference from the external environment than the V channel, which reduces the sensitivity of the receiver by 1.5 dB and makes the radar products abnormal. 3) The minimum value of $\Delta SYSCAL$ is -0.46 dB and the maximum is 0.25 dB, which meets the requirements of ± 2 dB. 4) The mean value of phase noise calibrated by I/Q phase angle method is 0.0513° , and the results of the actual object cancellation being 60 dB and the estimated ground clutter suppression ability being 61.36 dB are basically consistent, which proves the radar system has good ability of ground clutter suppression. 5) The CW and TS calibration methods of dual signal sources are used to receive the standard deviations of the amplitude and phase of the two channels, and Z_{DR-CW} , Φ_{DP-CW} , Z_{DR-TS} , and Φ_{DP-TS} are 0.025 dB, 0.735° , 0.044 dB, and 1.116° , respectively, which satisfies the technical indicators of receiving dual channel consistency. However, the calibration results of CW signal are significantly smaller than those of TS signal, which shows the dual channel azimuth rotary joint has an impact on the consistency of the amplitude and phase of the received link signal, resulting in the calibration results of Z_{DR-TS} and Φ_{DP-TS} worse than those of Z_{DR-CW} and Φ_{DP-CW} . Therefore, with the long-term operation of dual-polarization radar, it is very important to test and correct the inherent deviations of the amplitude and phase caused by the azimuth rotary joint.

Key words dual-polarization Doppler weather radar; calibration technology; data analysis; dual channel consistency

引言

双偏振多普勒天气雷达(以下简称“双偏振雷达”)通过交替发射或者同时发射水平和垂直偏振波,并接收两个偏振方向回波信号的方法,不仅能探测识别粒子的反射率因子(Z)、多普勒速度(V)和速度谱宽(W)信息,更能通过探测到差分反射率因子(Z_{DR})、相关系数(CC)、差分传播相移(Φ_{DP})、差分传播相移率(K_{DP})等双偏振参量,进一步识别降水粒子的形态、相态及滴谱分布等更为具体的信息。相比单偏振雷达,双偏振雷达在定量估测降水、相态识别等方面更具有优势。2013年美国完成了WSR-88D雷达的双偏振升级,2015年国内开展对业务组网雷达进行双偏振升级改造试点工作,2017年全国各地陆续开展新一代天气雷达双偏振技术升级。为更好地应用双偏振雷达,国内外学者在双偏振雷达应用方面进行了大量的研究,针对雷达数据质量控制方面的研究也取得了不少的成绩^[1-11]。雷达数据质量控制方面的研究基本上是基于雷达基数据及生成的雷达产品展开的,主要解决的是由外界原因如地物遮挡、超折射、电磁波干扰、

海浪、昆虫等引起的非气象回波等方面的质量问题,基于雷达数据采集系统在线自动标定数据质量控制方面的研究相对较少。双偏振多普勒天气雷达的主要特点是通过水平(H)和垂直(V)双通道回波信号的微小差异来识别所探测降水粒子的特征^[12-19],为保证探测数据的准确性,双偏振雷达升级对硬件性能方面提出了更高的要求。水平和垂直双通道的一致性和隔离度、系统噪声及信号强度衰减等都是影响雷达数据采集系统在线自动标定测量数据质量的关键因素,雷达数据采集系统在线自动标定测量数据质量下降将直接影响着雷达探测数据质量的下降。据文献^[1,20-26],以反射率因子 Z 为40 dBZ为例,如果反射率因子 Z 的测量精度达到 ± 1 dB,差分反射率因子 Z_{DR} 的测量精度达到 ± 0.20 dB时,则降水估计偏差可控制在18%以下;当 Z_{DR} 的测量精度达到 ± 0.10 dB时,也可区分不同类型的降水。所以开展天气雷达双偏振升级后的标定数据质量评估是一项急需且重要的工作。2019年5月29日济南CINRAD/SA雷达完成双偏振(CINRAD/SA-D)技术升级并通过现场测试,作为国内比较早进行双偏振升级改造的业务组网雷

达之一,有必要对 CINRAD/SA-D 雷达运行在线自动标定数据质量开展分析评估,为后续双偏振技术升级数据的可靠性及稳定性、质量控制、定量估测降水及粒子相态识别等业务开展打下基础。

1 CINRAD/SA-D 雷达在线自动标定技术与技术要求

CINRAD/SA-D 雷达在线自动标定按照标定信号源安装位置和注入点的不同分为标定信号 1 和标定信号 2(图 1)。标定信号 1 包括:1)晶振频率源(4A1)J3 输出的 CW 射频连续波测试信号;2)发射机高频脉冲形成器 3A5 输出的 RFD 射频激励信号;3)延迟 10 μs 发射机速调管输出的 KD 测试信号;4)射频噪声源输出的 NOISE 测试信号。标定信号 1 经接收机四位开关四选一,通过机房内功分器、接收机保护器、低噪声放大器后进入数字中频 WRSP,用来检查安装在设备机房内的接收通道状态。标定信号 2(TS 连续波测试信号)安装在天线反射体

背面,该标定信号经过天线内功分器、定向耦合器、俯仰旋转关节、方位旋转关节、环形器及机房内接收机保护器、低噪声放大器后进入接收机 WRSP,用来检查天线罩和设备机房在内的所有接收链路的状态。两路标定信号在线标定包含了机房内两路接收通道的幅度和相位一致性、全链路接收通道的幅度和相位一致性、接收机噪声温度和噪声电平、反射率标定、发射机功率及系统的地物杂波抑制能力等,各参数在线标定周期见表 1。两路标定信号在在线自动标定过程中互补,避免了因标定信号本身的问题带来的误修订,对检验接收链路双通道幅度和相位的一致性至关重要。CINRAD/SA-D 雷达不仅具备完善的自动监测、标定功能,同时还增加了相位编码技术与 Burst 混频标定技术,射频脉冲信号经发射机定向耦合器 1DC 耦合输出的延迟 10 μs 发射机速调管输出的 KD 测试信号与频率源(4A1)J2 送来的本振(Stalo)信号进行 Burst 混频,得到带有发射机输出脉冲信息的信号送入数字中频 WRSP 进行后期标定处理,对射频脉冲进行采样分析,作为 I/Q 信号修正和相位编码基准,以确保 CINRAD/SA-D 雷达标定数据的准确性。依据 S 波段双偏振多普勒天气雷达标准及新一代天气雷达现场验收测试大纲^[1-2,27-29]要求,表 2 给出济南 CINRAD/SA-D 双偏振雷达的部分主要性能参数。

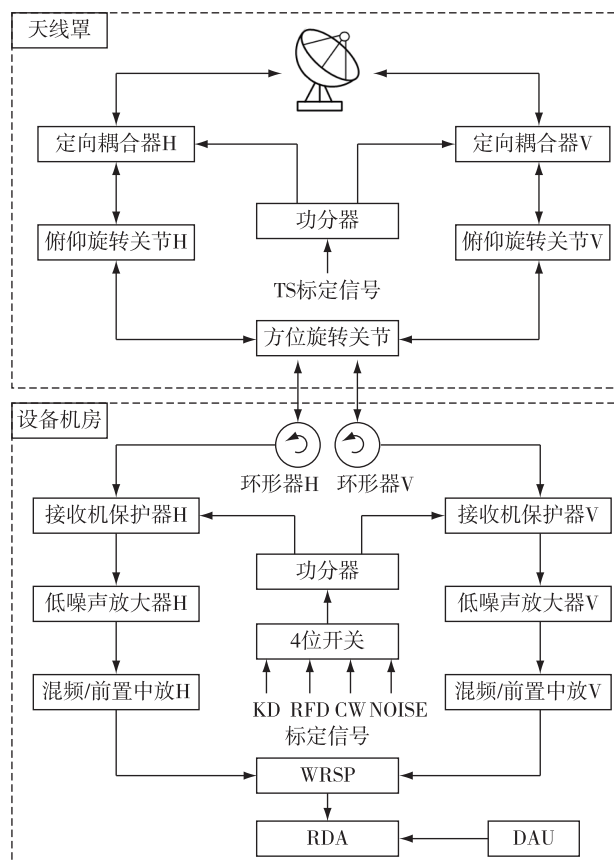


图 1 CINRAD/SA-D 双偏振天气雷达在线自动标定信号流程

Fig.1 Flow of automatic online calibration signal of CINRAD/SA-D dual-polarization Doppler weather radar

表 1 CINRAD/SA-D 主要性能参数在线自动标定周期
Table 1 Automatic online calibration cycle of main performance parameters of CINRAD/SA-D dual-polarization Doppler weather radar

| 参数名称 | 执行频率 |
|-------------------|-------------------------|
| CW 差分反射率因子和差分传播相移 | 每个 VCP 标定 1 次 |
| TS 差分反射率因子和差分传播相移 | 每个 VCP 标定 12 次 |
| 噪声温度和噪声电平 | 每个 VCP 标定 1 次 |
| 反射率标定系数 SYSCAL | 每个 VCP 标定 1 次 |
| 速度和谱宽 | 每个 VCP 标定 1 次 |
| 发射机和天线功率 | 每个 Cut 取 1 次平均功率 |
| 系统相位噪声和滤波前后功率比 | 每 2~72 h 检测 1 次(根据系统设置) |
| 速调管输出检测 | 每 2~72 h 检测 1 次(根据系统设置) |
| Burst 脉冲宽度 | 每 2~72 h 检测 1 次(根据系统设置) |

表2 CINRAD/SA-D 主要性能参数指标

Table 2 Main performance parameters of CINRAD/SA-D dual-polarization Doppler weather radar

| 功能分区 | 参数名称 | 性能指标 |
|--------|-------------------------|-----------------------------------|
| 天线系统 | 天线极化方式 | H 和 V 双极化 |
| | 天线增益 | ≥ 44 dB |
| | 主瓣波束宽度 | $\leq 1^\circ$ (3 dB) |
| | 波束偏差 | $\leq 0.03^\circ$ (H 和 V 双化) |
| | 双通道隔离度 | ≥ 35 dB |
| 发射机 | 工作频率 | 2 830 MHz |
| | 峰值功率 | ≥ 650 kW |
| | 脉冲宽度 | 1.57 μ s, 4.7 μ s, |
| | 脉冲重复频率 | 322~1 300 Hz |
| | 偏振方式 | 双发双收 |
| | 发射机输出改善因子 | ≥ 55 dB |
| | 最小可测功率 | ≤ -110 dBm(窄脉冲时) |
| 接收机 | 噪声系数 | ≤ 3 dB |
| | 动态范围 | ≥ 95 dB |
| | 距离分辨率 | 250 m/1 000 m |
| 系统指标 | 系统相位噪声 | $\leq 0.1^\circ$ |
| | 估算地物杂波抑制能力 | ≥ 55 dB |
| 探测参量精度 | 反射率因子 Z | ≤ 1 dB |
| | 径向速度 V/速度谱宽 W | ≤ 1 m \cdot s $^{-1}$ |
| | 差分反射率因子 Z _{DR} | ≤ 0.2 dB |
| | 差分传播相移 Φ_{DP} | $\leq 3^\circ$ |
| | 差分传播相移率 K _{DP} | ≤ 0.2 (°) \cdot km $^{-1}$ |
| | 相关系数 CC | ≤ 0.01 |

2 CINRAD/SA-D 雷达在线自动标定数据分析评估

CINRAD/SA-D 雷达在运行的每个体扫(VCP) 间隔期间,都会进行性能参数在线自动标定,以检测雷达运行是否正常,当体扫标定的性能参数达到技术指标要求,表明该体扫雷达运行正常,如果体扫标定的性能参数未达到技术指标要求或者超出恶化极限阈值,表示该体扫雷达运行状态性能下降或者变坏,则该体扫雷达探测数据的质量也随之下降或者变坏。雷达每个体扫的标定数据、报警信息等均记录在雷达数据采集单元(RDA)状态性能数据 RDA/Per/LOG 文件下。统计分析数据来源于 2019 年 6—10 月在线运行状态 LOG 文件下的 Calibration 和 Status 运行状态日志。对雷达在线自动标定的性能参数、监控信息、报警信息进行梳理,依据雷达气象方程结合回波强度定标方法^[2,20-23],遴选对雷达探测数据质量影响最大的性能参数:发

射机输出峰值功率 P_t 、相位噪声 σ_ϕ 、噪声系数 N_F 、反射率标定系数 $\Delta SYSCAL$ 、差分反射率因子 Z_{DR} 、差分传播相移 Φ_{DP} ,通过对在线每个体扫标定数据的长期监测,绘制出每个参数长期运行轨迹,能够分析评估雷达系统运行的稳定性和观测数据质量的可靠性。

2.1 发射峰值功率数据分析

发射峰值功率 P_t 是指发射脉冲持续期间对不同工作比时的发射机输出功率的测量。发射信号经高频功分器等分后经大功率双路方位旋转关节分别向天线的 H 和 V 通道注入,H 和 V 通道峰值功率分别记为 P_{t-H} 、 P_{t-V} 。目前,CINRAD/SA-D 雷达在运行期间功率监控器能够将实时监测到的发射机峰值功率数据送入数据采集监控单元(DAU),但是 H 和 V 通道发射功率尚不具备监测功能,其功率测试值是从发射机输出功率通过相关馈线损耗换算得出。

$$P_{t-H} = P_t/2 - L_H \quad (1)$$

$$P_{t-V} = P_t/2 - L_V \quad (2)$$

式(1)、(2)中 L_H 、 L_V 分别代表 H、V 发射通道支路损耗。

雷达运行的每个 VCP 期间进行发射机功率监测,与其他性能参数标定不同,发射机峰值功率数据位于 LOG/Status。发射峰值功率技术指标要求 $P_t \geq 650$ kW,低于 400 kW 或者超出 900 kW,系统则产生功率过低或者功率过高报警。统计分析雷达运行的 33 385 个体扫峰值功率,除周、月、年停机维护无数据外,在线运行输出峰值功率比较稳定,基本维持在 679.68 kW(图 2),但统计时间段内有时出现跳变现象,最大值为 738.07 kW,最小值为 658.45 kW,经核实是由于雷达设备停机维护,开机时设备温度较低引起,待雷达运行几个体扫后温度趋于稳定,雷达输出功率随之稳定。H 和 V 双通道峰值功率 P_{t-H} 、 P_{t-V} 均值分别为 208.56 kW、207.76 kW,长期运行基本一致且稳定。

2.2 噪声系数与噪声电平数据分析

噪声温度 (T_N) 的标定来源于射频噪声源的 NOISE 信号(图 1),噪声温度标校每个体扫执行一次,利用噪声源的 ON 和 OFF 状态,测试接收机输出噪声功率,根据噪声源的超噪比计算接收系统的噪声温度。如果运行标定的噪声温度超出预定值,则产生相应的告警。

接收机噪声系数 N_F 表示接收机输入端信噪比与其输出端信噪比的比值。在线标定噪声系数是

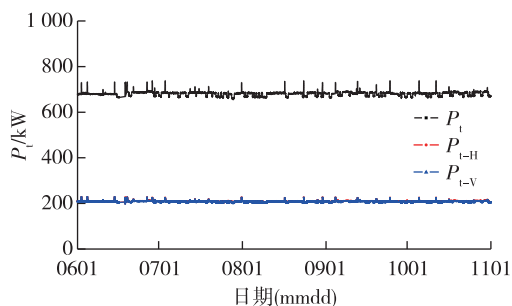


图2 2019年6—10月在线峰值功率(P_i)以及水平和垂直通道峰值功率(P_{i-H}/P_{i-V})随时间的变化轨迹

Fig.2 Trajectory of online peak power P_i and peak power of horizontal and vertical channels P_{i-H}/P_{i-V} from June to October 2019

通过每个体扫标定的噪声温度转化获得,换算公式为:

$$N_F = 10 \lg [T_N / 290 + 1] \quad (3)$$

噪声电平 E 表示接收机接收到的外界噪声信号与本底噪声信号叠加在一起而产生的噪声。噪声系数与噪声电平的关系为:

$$N_F = R_{EN} - (E_{Hot} - E_{Cold}) \quad (4)$$

式(4)中, R_{EN} 为噪声源的超噪比,超噪比的大小与噪声源的型号和被测雷达的工作频率相关, E_{Cold} 、 E_{Hot} 分别为噪声源处于 OFF 和 ON 状态时接收的冷、热态噪声电平。

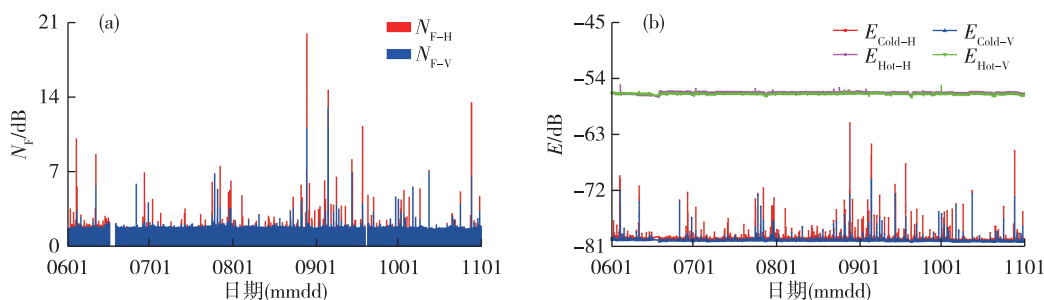


图3 2019年6—10月噪声系数 N_F (a) 和冷、热态噪声电平 E_{Cold} 、 E_{Hot} (b) 随时间的变化曲线

Fig.3 Variation curve of noise figure N_F (a) and cold and hot noise level E_{Cold} and E_{Hot} (b) from June to October 2019

表3 体扫噪声系数异常次数统计

Table 3 Statistics of VCP noise figure anomalies

| 通道 | 异常次数 | | | | |
|-----|------|----|----|----|-----|
| | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 |
| H通道 | 14 | 17 | 15 | 27 | 17 |
| V通道 | 6 | 8 | 7 | 14 | 6 |

排除受外界干扰时间段的数据后,H和V双通

道噪声系数数据分布稳定且具有较好一致性,H和V双通道噪声系数均值维持在1.66 dB和1.73 dB,满足噪声系数 $N_F \leq 3.0$ dB的技术指标要求。

统计分析33385个体扫噪声系数在线标定数据(图3a),发现噪声系数在运行过程中存在异常数据,噪声系数超标3 dB达131个体扫,占总数的0.39%(H通道噪声系数 N_{F-H} 超标90个,V通道噪声系数 N_{F-V} 超标41个,见表3),超标数据较集中在7月24—30日、8月26日—9月18日和10月2—6日,极大值出现在8月28日01:43(UTC)高达19.92 dB(H通道)和11.06 dB(V通道),为查找严重超标原因,深入分析H和V双通道冷、热态噪声电平数据(E_{Cold-H} 、 E_{Hot-H} 、 E_{Cold-V} 、 E_{Hot-V}),由图3b可见,H和V双通道热态噪声电平数据稳定且拟合较好,而冷态噪声电平数据波动较大且与系统噪声系数关联吻合,热态噪声电平数据稳定,表明雷达接收系统正常,噪声系数的异常波动完全来源于噪声源处于关闭状态的冷态噪声电平,即噪声系数的异常数据是外界干扰所致,外界干扰影响了接收系统内噪声信号的在线标定,抬高了噪声电平和噪声系数,结果直接影响到探测数据质量,在雷达产品多表现为射线状、杂点、环状等异常回波(图4)。采用基数据分析法,发现因干扰影响造成50 km处最小可测回波强度降低为-3.5 dBZ(图5a),而未受干扰时50 km处最小可测回波强度能达到-5.0 dBZ(图5b),由外界干扰造成探测灵敏度降低了1.5 dB,为保障雷达探测数据质量有必要开展雷达数据质量控制研究。

道的噪声系数数据分布稳定且具有较好一致性,H和V双通道噪声系数均值维持在1.66 dB和1.73 dB,满足噪声系数 $N_F \leq 3.0$ dB的技术指标要求。

2.3 反射率标定系数 SYSCAL 数据分析

反射率标定 $RDA/Per/LOG/\{Cali1/CW\&RFDi+Cal2/SYSCAL\}$ ($i=1,2,3$) 是对反射率进行动态、实时的补偿,以保证反射率测量精度。根据雷达工作频率、天线增益、发射支路损耗、接收支路损耗、接

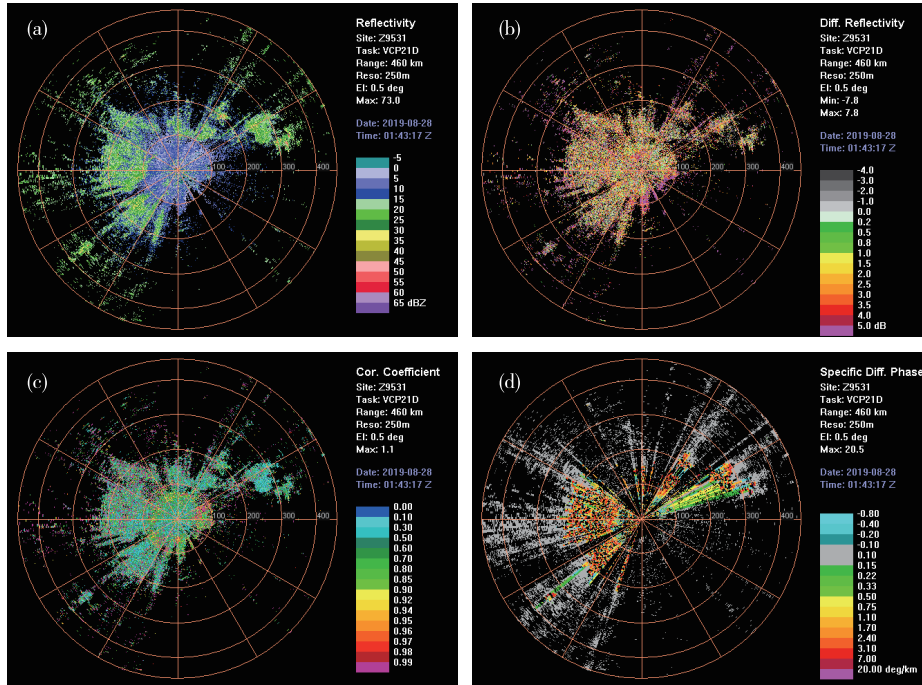


图 4 2019 年 8 月 28 日 01:43(UTC)噪声电平和噪声系数因干扰升高引起的雷达回波异常(a.反射率因子 Z , b.差分反射率因子 Z_{DR} , c.相关系数 CC , d.差分传播相移率 K_{DP})

Fig.4 Radar echo anomaly caused by noise level and noise figure being disturbed at 01:43 UTC 28 August 2019 (a. reflectivity factor Z , b. differential reflectivity factor Z_{DR} , c. correlation coefficient CC , d. differential propagation phase shift rate K_{DP})

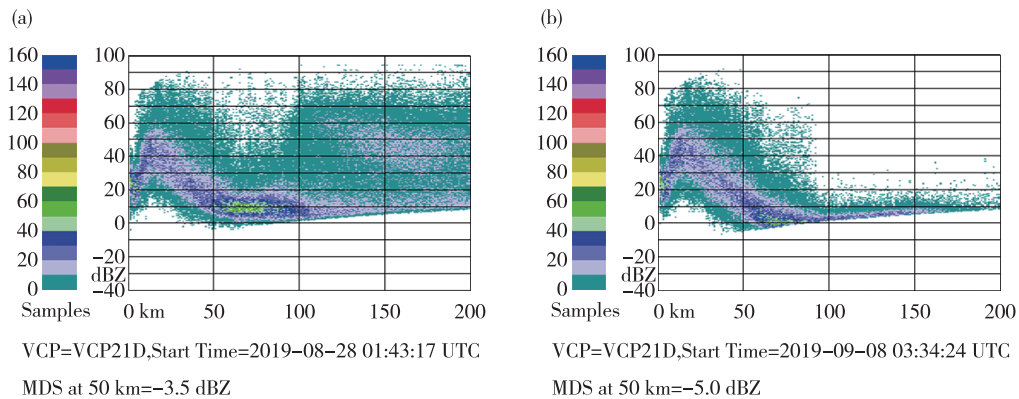


图 5 接收机灵敏度对比(a.有外界干扰,b.无外界干扰)

Fig.5 Comparison of receiver sensitivity under external interference (a) and under no external interference (b)

收机增益等参数计算出反射率的校正参数,记为 SYSCAL(system calibration)。SYSCAL 的变化体现接收机增益等性能参数的变化,并直接影响雷达反射率因子的计算结果。反射率标定信号来源于频率源(4A1)J3 的 CW 测试信号及发射机脉冲形成器 3A5 的 RFD 测试信号(图 1)。RFD 的标定分为高、中、低三组不同信噪比的信号,可以在线动态地对反射率强度值进行标校,标校 CW&RFD 的实测值记录在 LOG/Cali1/CW & RFD $_i$ 中,用 dBZ 表示。每一组标定的期望值 Expected 与实测值 Measured 之间

的差值分别记为 ΔCW 、 $\Delta RFD1$ 、 $\Delta RFD2$ 和 $\Delta RFD3$ 。四组信号期望值与实测值之间的差值的平均值作为 SYSCAL 的变化,记为 $\Delta SYSCAL$,计算如下:

$$\Delta SYSCAL = (\Delta CW + \Delta RFD1 + \Delta RFD2 + \Delta RFD3) / 4 \quad (5)$$

当每一组标定数据满足要求 | 期望值 - 实测值 | ≤ 2 dB, 即 | $(\Delta CW = CW_{Expected} - CW_{Measured})$ | ≤ 2 dB, | $(\Delta RFDi = RFDi_{Expected} - RFDi_{Measured})$ | ≤ 2 dB, 则实时订正反射率标定系数 SYSCAL, 这个订正后的 SYSCAL 将用于下一个体积扫描中计算反射

率因子,即下一个体扫 $SYSCAL_{n+1}$ 与当前体扫 $SYSCAL_n$ 的关系是:

$$SYSCAL_{n+1} = SYSCAL_n + \Delta SYSCAL \quad (6)$$

如自动在线检查结果, ΔCW 、 $\Delta RFD1$ 、 $\Delta RFD2$ 和 $\Delta RFD3$ 分别为 0.0、0.1、0.1、0.0, 根据公式(5)计算 $\Delta SYSCAL$ 为 0.05 dB, 应用于下一个体扫描的 $SYSCAL_{n+1}$ 值相比本次扫描变化了 0.05 dB, 即接收到同样幅度的信号时, 反射率因子的值会增加 0.05 dB。如果标定数据 | 期望值-实测值 | 超出设定阈值(一般为 2 dB), 即 $|(\Delta CW = CW_{Expected} - CW_{Measured})| > 2 \text{ dB}$, $|(\Delta RFDi = RFDi_{Expected} - RFDi_{Measured})| > 2 \text{ dB}$, 表明雷达系统性能下降或者变坏, 系统则自动产生相应的报警信息。

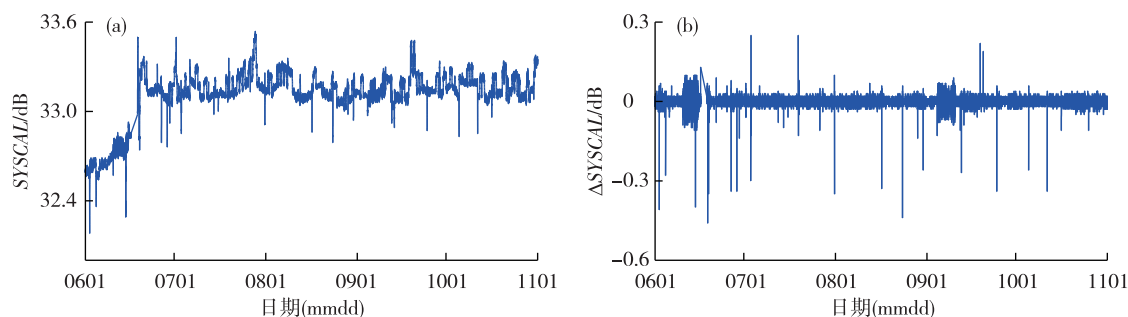


图6 2019年6—10月 $SYSCAL$ (a) 和 $\Delta SYSCAL$ (b) 值随时间变化曲线

Fig.6 Variation curve of $SYSCAL$ (a) and $\Delta SYSCAL$ (b) from June to October 2019

2.4 相位噪声数据分析

相位噪声表征雷达系统的相干性, 即表征雷达系统内各信号的稳定性。将雷达发射射频信号经衰减延迟后注入接收机前端, 对该信号放大、相位检波后的 I/Q 值进行多次采样, 由每次采样的 I/Q 值计算出信号的相位, 求出相位的均方根误差 σ_ϕ 来表征系统的相位噪声。技术指标要求 $\sigma_\phi \leq 0.1^\circ$, 当

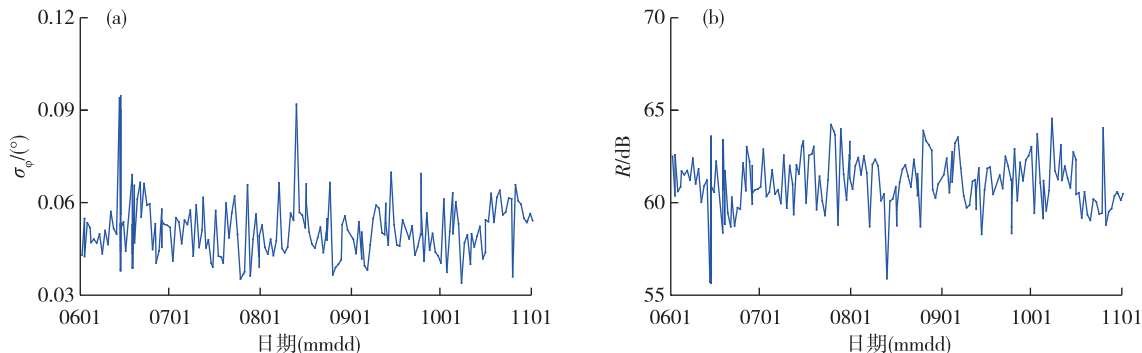


图7 2019年6—10月相位噪声 σ_ϕ (a) 和滤波前后功率比 R (b) 随时间变化曲线

Fig.7 Variation curve of phase noise σ_ϕ (a) and power rate R before and after filtering (b) from June to October 2019

当相位噪声 σ_ϕ 小于 5° 时可近似地用来估算系

统计分析 33 385 个体扫 $SYSCAL$ 标定数据(H 通道), 根据公式(5)计算 $\Delta SYSCAL$ 值, 计算结果(图6): 11 208 个 $\Delta SYSCAL$ 为正值, 均值为 0.015 dB, 最大值为 0.25 dB; 10 887 个 $\Delta SYSCAL$ 为负值, 均值为 -0.016 dB , 最小值为 -0.46 dB ; 11 290 个 $\Delta SYSCAL$ 为 0 值; $\Delta SYSCAL$ 满足 $\pm 2 \text{ dB}$ 技术指标要求。 $\Delta SYSCAL$ 值为雷达机内四个标定信号(3 个 RFD 信号, 1 个 CW 信号)测量误差平均差值, 用于补偿下一个体扫的 $SYSCAL$ 值。 $\Delta SYSCAL$ 越小, 表明接收系统增益和发射机输出功率越稳定。所以通过监测 $SYSCAL$ 长期运行的变化情况, 能够检验雷达运行的稳定性。

该测试值超限时, 系统报地物杂波抑制能力变坏报警。

根据台站设置不同(2~72 h 标定一次), 统计分析 203 次相位噪声在线标定数据结果(H 通道): 最大值 0.095° , 最小值 0.034° , 平均值为 0.0513° 。由图 7a 可看出系统相位噪声在线标定数据曲线比较稳定, 表明系统相干性较好。

统的地物杂波抑制能力 S , 其转换公式为:

$$S = -20 \lg(\sin \sigma_{\varphi}) \quad (7)$$

由公式(7)计算均值为 61.08 dB, 此结果与采用在线标定滤波前后功率比 R 估算的地物杂波抑制结果 61.36 dB (均值, 15.73/-45.63) 吻合(图 7b)。

图 8 为雷达观测地物杂波对消抑制前 dBZ 与对消抑制后 dBZ 基数据分析实例, 在 80.9°、82.04

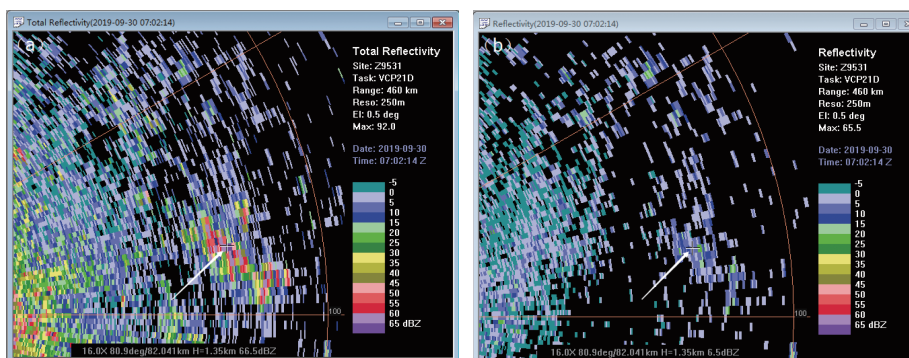


图 8 2019 年 9 月 30 日 07:02 济南雷达地物杂波抑制前后反射率因子对比(a.抑制前,b.抑制后)

Fig.8 Comparison of reflectivity factor before (a) and after (b) clutter suppression of Jinan radar at 07:02 UTC 30 September 2019

2.5 差分反射率因子与差分传播相移数据分析

水平和垂直双通道的一致性,对双偏振天气雷达的探测性能起着决定性的作用^[14-19]。为了在线测量和检验接收机双通道幅度和相位的一致性,系统采用机内双信号源法,位于设备机房内的接收机频率源(4A1)J3输出的连续波 CW 信号经功分后分别注入 H 和 V 接收通道,用来检验机房内的 H 和 V 接收双通道信号幅度和相位的一致性,H 和 V 双通道信号幅度差记为 Z_{DR-CW} ,相位差记为 Φ_{DP-CW} ;位于天线俯仰旋转关节之上的标定信号源输出的连续波 TS 信号经功分后注入包括俯仰旋转关节、双路方位旋转关节在内的接收链路的 H 和 V 通道,用来检验双路方位旋转关节在内的接收全链路双通道信号幅度和相位的一致性,幅度差记为 Z_{DR-TS} ,相位差记为 Φ_{DP-TS} 。CW 和 TS 信号标校流程见图 1。技术指标要求双通道幅度标准差 $Z_{DR} \leq 0.2$ dB,相位标准差 $\Phi_{DP} \leq 3^\circ$ 。如果标定结果超限,表明接收双通道一致性差, Z_{DR-CW} 、 Φ_{DP-CW} 超限重点检查设备机房内接收双通道一致性, Z_{DR-TS} 、 Φ_{DP-TS} 超限重点检查双路方位旋转关节对接收链路双通道一致性的影响。

Z_{DR-CW} 和 Φ_{DP-CW} 标定是每个 VCP 间隔做一次。分析 33 385 个标定数据(图 9a、图 9b), Z_{DR-CW} 最小值为 0.18 dB,最大值为 0.35 dB,均值为 0.26 dB,标准差为 0.025 8 dB; Φ_{DP-CW} 最小值为 107.86°,最

大值为 113.54°,均值为 110.82°,标准差为 0.735°。TS 信号标定不同于 CW 信号标定,TS 信号标定是在天线逐仰角 360°扫描完成一次标定,如 VCP21D 扫描,9 个仰角进行 11 次 360°扫描(0.5°、1.5°仰角,强度和速度各扫描 1 次),本体扫结束后再进行一次 VCP 标定,所以 VCP21D 一个体扫结束后有 12 组标定数据,结果 TS 测试信号标定数据是 CW 测试信号标定数据的 12 倍。分析 400 620 个标定数据(图 9c、图 9d), Z_{DR-TS} 最小值为 0.42 dB,最大值为 0.77 dB,均值为 0.611 dB,标准差为 0.044 dB; Φ_{DP-TS} 最小值为 224.42°,最大值为 232.70°,均值为 228.73°,标准差为 1.116°。

采用双信号源的 CW、TS 标定法,接收双通道幅度和相位的标准差都满足接收机双通道一致性技术指标要求,并且标定数据波动具有较强的一致性(图 9)。虽然双信号源标定法同步且互补,但两个信号标定结果还是存在一定的差异,但 CW 信号标定结果明显小于 TS 信号标定结果。这是由于 TS 标定通道增加了双路方位旋转关节,导致 Z_{DR-TS} 和 Φ_{DP-TS} 标定结果比 Z_{DR-CW} 和 Φ_{DP-CW} 出现更大的误差,这种变化难以通过调整 H 和 V 两通道的参数进行补偿消除,因此随着双偏振雷达的长期运行,对双路方位旋转关节带来的幅度和相位固有偏差进行测试和订正非常重要。在线标定对机内测试通道硬件性能的准确性和环境温度要求较高,如果在

km 处(箭头加十字所指)对消前地物杂波强度值为 66.5 dBZ,对消后地物杂波强度值为 6.5 dBZ,对消前、后差值代表雷达实际地物杂波对消为 60 dB。实例分析结果与采用在线标定相位噪声法及在线标定滤波前后功率比法估算地物杂波抑制结果基本吻合,表明系统相干性和地物杂波对消抑制能力较好。

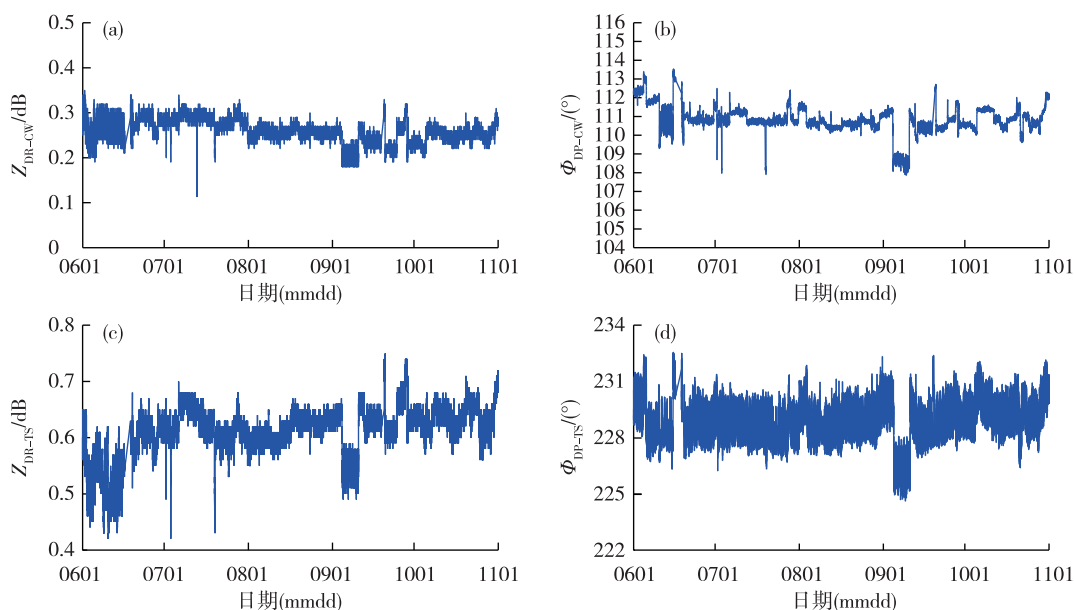


图9 2019年6—10月 Z_{DR-CW} (a)、 Φ_{DP-CW} (b)、 Z_{DR-TS} (c)、 Φ_{DP-TS} (d) 随时间变化曲线

Fig.9 Variation curve of Z_{DR-CW} (a), Φ_{DP-CW} (b), Z_{DR-TS} (c), and Φ_{DP-TS} (d) from June to October 2019

条件允许的情况下,有必要采用离线标定法:“太阳法”“小雨法”“金属球”等方法进行接收全链路标定和订正。

3 结论与讨论

新一代天气雷达系统具备完善的自动监测、标定功能,雷达在线自动标定数据的精度直接反映出探测数据的质量。本文阐述了 CINRAD/SA-D 双偏振雷达的标定技术,分析评估了 2019 年 6—10 月济南双偏振多普勒天气雷达运行在线自动标定的峰值功率 P_t 、相位噪声 σ_ϕ 、噪声系数 N_F 、反射率标定系数 $SYSCAL$ 、差分反射率因子 Z_{DR} 、差分传播相移 Φ_{DP} 性能参数的数据质量,评估结论如下:

1) 峰值功率维持在 679.68 kW, H 和 V 双通道的峰值功率长期运行吻合一致性较好,峰值功率的不稳定与设备温度密切相关。

2) H 和 V 双通道噪声系数均值维持在 1.66 dB 和 1.73 dB, 双通道噪声系数数据总体分布稳定且具有较好一致性。但是如果外界有干扰,接收机接收来自天线的干扰信号影响了系统内噪声信号的在线标定,引起噪声电平和噪声系数的升高。噪声电平和噪声系数的升高必定影响探测数据质量,雷达产品多表现为射线状、环状、杂点等异常回波;外界干扰的同时也降低了接收机的灵敏度,因干扰造成接收机灵敏度降低了 1.5 dB。为保障雷达探测数据质量有必要开展雷达数据质量控制研究。

3) 反射率自动标校是保证雷达回波强度测量精度的重要手段, $\Delta SYSCAL$ 值为四个机内定标信号(3 个 RFD 信号, 1 个 CW 信号)测量误差平均差值用于补偿 $SYSCAL$ 值, $\Delta SYSCAL$ 越小,表明接收系统增益和发射机输出功率越稳定。

4) 相位噪声均值为 $0.051\ 3^\circ$, 实际地物杂波对消能力 60 dB 与估测地物杂波抑制能力 61.36 dB 结果基本吻合,证实了雷达系统具有较好的地物杂波抑制能力。

5) H 和 V 双通道的一致性为双偏振雷达的关键技术,通过长期 Z_{DR} 与 Φ_{DP} 数据分析可以检验接收双通道的一致性。采用双信号源的 CW、TS 标定法,接收双通道幅度和相位的标准差: Z_{DR-CW} 和 Φ_{DP-CW} 分别为 0.025 dB 和 0.735° , Z_{DR-TS} 和 Φ_{DP-TS} 分别为 0.044 dB 和 1.116° , 满足接收机双通道一致性技术指标,但 CW 信号标定结果明显小于 TS 信号标定结果。这是由于 TS 标定通道增加了双路方位旋转关节,导致 Z_{DR-TS} 和 Φ_{DP-TS} 标定结果比 Z_{DR-CW} 和 Φ_{DP-CW} 出现更大的偏差,这种变化难以通过调整 H 和 V 两通道的参数进行补偿消除,因此随着双偏振雷达的长期运行,对旋转关节带来的幅度和相位固有偏差进行测试和订正非常重要。

目前, CINRAD/SA-D 雷达在线自动标定只能获取 H 通道的 $SYSCAL$ 、相位噪声、滤波前后功率比数据,为更好的检验 H 和 V 双通道一致性,建议改进增加 V 通道在线标定数据。

机内 CW 和 TS 标定信号法可以对接收双通道的一致性进行实时监测和标校,但是对机内测试通道硬件性能的准确性和环境温度要求较高。为保障 Z_{DR} 的测量精度,在条件满足的情况下,有必要采用“太阳法”“小雨法”“金属球”等方法进行接收全链路标定和订正。

参考文献:

- [1] BRINGI V N, CHANDRASEKAR V. 偏振多普勒天气雷达原理和应用[M]. 李忱, 张越, 译, 张培昌, 校. 北京: 气象出版社, 2011.
- [2] 张培昌, 魏鸣, 黄兴友, 等. 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2018.
- [3] 程周杰, 刘宪勋, 朱亚平. 双偏振雷达对一次水凝物相态演变过程的分析[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 594-601.
- [4] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [5] KESSINGER C, ELLIS S, VAN ANDEL J. The radar echo classifier: A fuzzy logic algorithm for the WSR-88D [C]//AMS. The 3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environmental Science, Long Beach, California, 2003. Boston: AMS, 2003: 1-11.
- [6] ZHANG J, WANG S, CLARKE B. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure [C]//AMS. The 11th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. Boston: AMS, 2004.
- [7] LAKSHMANAN V, FRITZ A, SMITH T, et al. An automated technique to quality control radar reflectivity data [J]. J Appl Meteor Climatol, 2007, 46(3): 288-305.
- [8] 杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等. 双线偏振多普勒雷达资料质量分析[J]. 气象学报, 2013, 71(1): 146-158.
- [9] 吴林林, 刘黎平, 袁野, 等. C 波段车载双偏振雷达 Z_{DR} 资料处理方法研究 [J]. 高原气象, 2015, 34(1): 279-287.
- [10] 胡东明, 张羽, 傅佩玲, 等. CINRAD/SA 雷达双偏振升级数据质量分析评估 [J]. 气象科技, 2019, 47(2): 207-213.
- [11] 周红根, 许波, 曹德煜, 等. 台站级 CINRAD/SA 雷达数据质量检测技术及应用 [J]. 气象科技, 2018, 46(3): 445-461.
- [12] 杨传凤, 张骞, 陈庆亮, 等. 济南 CINRAD/SA 雷达双偏振升级关键技术分析 [J]. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 116-123.
- [13] 苏添记, 葛俊祥, 章火宝. 中国双偏振天气雷达系统发展综述 [J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 62-68.
- [14] 胡东明, 张羽, 傅佩玲, 等. 广州 S 波段双线偏振天气雷达双通道一致性测试及分析 [J]. 气象科技, 2019, 47(3): 373-379.
- [15] 孟庆春, 沈永海, 苏德斌. 双偏振雷达双通道一致性及测试方法研究 [J]. 高原气象, 2014, 33(5): 1440-1447.
- [16] 魏洪峰, 薛震刚. 双偏振多普勒天气雷达差分反射率因子的测量误差 [J]. 气象科技, 2008, 36(2): 223-227.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 赵世颖, 李柏, 陈晓辉, 等. 基于交叉-平行法的双偏振雷达差分反射率硬件定标 [J]. 气象科技, 2015, 43(5): 775-782.
- [20] 王志武, 蔡作金, 周宽宏, 等. CINRAD/S-RDA 定标常见问题分析 [J]. 气象科技, 2008, 36(3): 349-354.
- [21] 周红根, 高飞, 蔡勤, 等. CINRAD/SA 雷达标定技术研究 [J]. 气象科技, 2016, 44(1): 7-13.
- [22] 潘新民, 柴秀梅, 崔柄俭, 等. CINRAD/SB 雷达回波强度定标调校方法 [J]. 应用气象学报, 2010, 21(6): 739-746.
- [23] 潘新民, 柴秀梅, 黄跃青, 等. CINRAD/SA&SB 回波强度定标故障的诊断分析和解决方法 [J]. 气象, 2010, 36(12): 122-127.
- [24] RYZHKOV A V, GIANGRANDE S E, MELNIKOV V M, et al. Calibration issues of dual-polarization radar measurements [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2005, 22(8): 1138-1155.
- [25] SCHUUR T, RYZHKOV A V, HEINSELMAN P, et al. Observation and classification of echoes with the polarimetric WSR-88D radar [R]. Report of National Server Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, 2003: 19-26.
- [26] MELNIKOV V M, DOVIK R J, ZRNIC D S, et al. Mapping bragg scatter with a polarimetric WSR-88D [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2011, 28(10): 1273-1285.
- [27] 中国气象局. QX/T 464-2018 S 波段双偏振多普勒天气雷达[S]. 北京: 中国气象局, 2018.
- [28] 中国气象局综合观测司. 新一代天气雷达系统出厂验收测试大纲[Z]//气测函[2018]70号. 北京: 中国气象局综合观测司, 2018.
- [29] 中国气象局综合观测司. 新一代天气雷达系统现场验收测试大纲[Z]//气测函[2018]70号. 北京: 中国气象局综合观测司, 2018.