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.
YANG Chuanfeng, ZHANG Qian, CHEN Qingliang, et al. Key techniques for dual-polarization upgrade of CINRAD/SA weather radar in Jinan[J].Journal of Marine Meteorology,2019,39(4):116-123. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.014.(in Chinese)

济南 CINRAD/SA 雷达双偏振升级关键技术分析

杨传凤[1],张骞[1],陈庆亮[2],苏添记[3],魏海文[1]
(1. 山东省气象台,山东 济南 250031;2. 山东省气象局大气探测技术保障中心,山东 济南 250031;3. 烟台市气象局,山东 烟台 264003)

摘要: 针对 CINRAD/SA 天气雷达双偏振升级,阐述了通过 WRSP 信号处理器、晶振频率源、标定技术、相位编码技术、信号处理新技术新算法等关键技术的升级,提升了雷达的整体性能。济南雷达升级后,接收机灵敏度由-109 dBm 提升至-113 dBm,接收机动态范围由 89 dB 提升至 101 dB,发射机输出改善因子由 59.34 dB 提升至 61.64 dB,系统相位噪声由 0.107°提升至 0.041°,系统实际地物对消最大值由 45.1 dB 提升至 49.7 dB,距离分辨率由 1 000 m 提升至 250 m,改善了雷达对弱信号的探测能力,增强了对电磁干扰、超折射的识别能力,增强了地物抑制能力;天线伺服系统通过改碳刷结构汇流环为金属丝免维护汇流环,减少了天线动态故障报警率,提高了伺服系统运行的稳定性和可靠性;通过 CW 与 TS 信号在线标定技术,检验了升级后双偏振雷达双通道的一致性。

关键词: 双偏振天气雷达; 技术升级; 性能分析; 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(2019)04-0116-08
DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.014

Key techniques for dual-polarization upgrade of CINRAD/SA weather radar in Jinan

YANG Chuanfeng[1], ZHANG Qian[1], CHEN Qingliang[2], SU Tianji[3], WEI Haiwen[1]
(1. *Shandong Meteorological Observatory*, *Jinan* 250031, *China*; 2. *Atmospheric Sounding and Technical Support Center of Shandong Meteorological Bureau*, *Jinan* 250031, *China*; 3. *Yantai Meteorological Bureau*, *Yantai* 264003, *China*)

Abstract With a view to the dual-polarization upgrade of CINRAD/SA weather radar in Jinan, the upgrade of key techniques such as WRSP (Weather Radar Signal Processor), frequency source of crystal oscillator, calibration technique, phase encoding technique, and new algorithm of signal processing technique is elaborated, and the performance of radar has improved. After upgrade, the sensitivity of receiver improves from -109 dBm to -113 dBm, the dynamic range of receiver from 89 dB to 101 dB, the output improvement factor of transmitter from 59.34 dB to 61.64 dB, the phase noise from 0.107° to 0.041°, the maximum value of actual ground clutter from 45.1 dB to 49.7 dB, and the range resolution from 1 000 m to 250 m. The upgrade of radar system improves the detection of weak signals, strengthens the recognition of electromagnetic interference and superrefraction, and enhances the resistance of ground clutter. Through altering antenna servo system from carbon brush slip ring to metal wire maintenance-free slip ring, the alarm rate of antenna's dynamic fault has reduced and the stability and reliability of servo

收稿日期:2019-06-03; **修订日期:**2019-07-16
基金项目:山东省气象局科研项目(2018sdqxm03,2018sdqxm08)
作者简介: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。

system have increased. The consistency of the two channels of the upgraded dual-polarization radar is testified through the online calibration technique of CW and TS signals.

Key words　dual-polarization weather radar; technical upgrade; performance analysis; consistency of two channels

引言

20 世纪 90 年代，我国开始建设新一代天气雷达网，截至 2019 年，全国已有 200 多部雷达在组网运行。随着新技术的发展，双线偏振多普勒（简称“双偏振”）雷达通过发射水平和垂直两种极化的电磁波，不仅能探测到降水粒子的回波强度（Z）、多普勒速度（V）和速度谱宽（W）信息，还能够探测到差分反射率因子（Z_{DR}）、相关系数（CC）、差分传播相移 PDP（有文献[1-2]记为 P_{DP} 或 Φ_{DP}）、差分传播相移率（K_{DP}）、线性退极化比（LDR）等双偏振参量信息。对双偏振参量进行分析、反演，能进一步识别降水粒子的形状大小、空间取向、相态及滴谱分布等更为具体的信息，准确地分类降水类型，提高了雷达定量估测降水的准确性和降水粒子相态识别的能力[3-7]。基于此类雷达的先进性和实用性，从 2007 年开始，美国开展了 WSR-88D 雷达的双偏振升级工作，2013 年升级工作全部完成。2015 年，国内开始开展对业务组网雷达进行双偏振升级改造试点工作，中国气象局在《气象雷达发展专项规划》中明确指出，2017—2020 年对已建的新一代天气雷达进行双偏振技术升级，同时在气象服务重点区、灾害天气频发区、东南沿海地区和“一带一路”沿线重要区域，根据气象保障服务需求，增补 37 部双偏振新一代天气雷达。2017 年，全国各地陆续开展天气雷达双偏振技术升级工作，2018 年 12 月，山东济南、青岛雷达完成双偏振升级并投入业务试运行，济宁、聊城双偏振天气雷达投入建设阶段。本文针对 CINRAD/SA 天气雷达双偏振技术升级，介绍了升级后 CINRAD/SA-D 双偏振雷达双发双收工作体制原理，阐述了雷达升级后 WRSP 信号处理器、晶振频率源、标定技术、Burst 与相位编码技术、信号处理新技术新算法等关键技术，对比分析了升级前后雷达的主要性能参数，通过采用 CW（机内标定信号 1）与 TS（机内标定信号 2）在线定标技术，检验了双偏振雷达双通道的一致性，对今后双偏振雷达技术改进具有一定借鉴意义。

1　双偏振天气雷达工作体制与关键技术指标

双偏振天气雷达通常采用双发双收（SHV）或脉间变换交替发射的单发双收（AHV）发射体制的工作模式。目前，CINRAD/SA-D 雷达在业务上广泛采用 SHV 发射体制的双发双收工作模式，发射机输出功率经高频功分器功分后以水平和垂直极化方式同时发射，双通道接收机和信号处理器对同时接收的两路数据进行并行处理（图 1）。此型雷达除了具有双偏振模式功能外，还兼容了单偏振模式功能，体扫工作模式可以进行单、双偏振模式切换（图 2）。

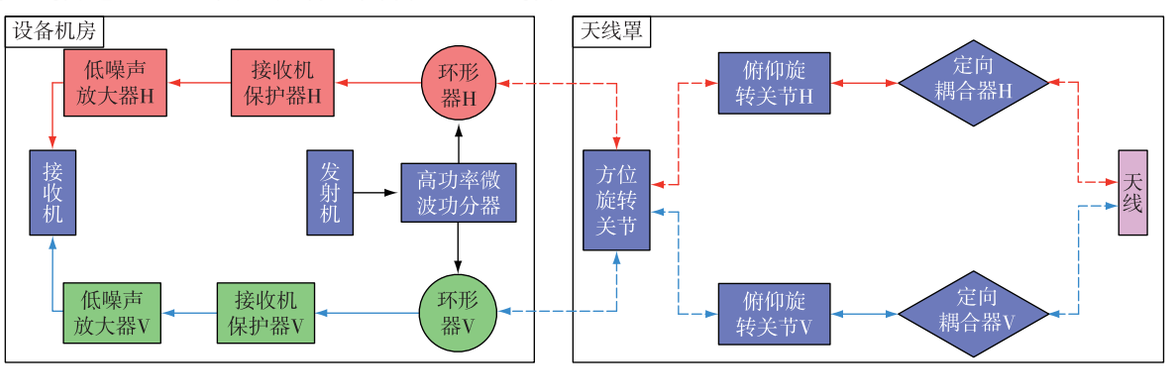

图 1　CINRAD/SA-D 双偏振天气雷达双发双收系统原理示意图

Fig.1　Schematic diagram of reception and delivery system of CINRAD/SA-D dual-polarization weather radar

双偏振天气雷达通过水平和垂直两个通道回波信号的微小差异来识别探测目标物特征。因此，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[8-13]。根据美国强风暴

实验室的长期研究结果，当 Z_{DR} 的测量精度达到 ±0.20 dB时，定量降水估计误差可控制在 18% 以下；当 Z_{DR} 的测量精度达到±0.10 dB 时，降水估测误差可控制在 10%～15%，同时 0.10 dB 的 Z_{DR} 测量精度也可区分不同类型的降雪[1,14-16]。国内 S 波段双偏振天气雷达系统指标[17-20]要求满足 $Z_{DR} \leqslant 0.2$ dB，PDP（P_{DP}或 Φ_{DP}）≤3°。

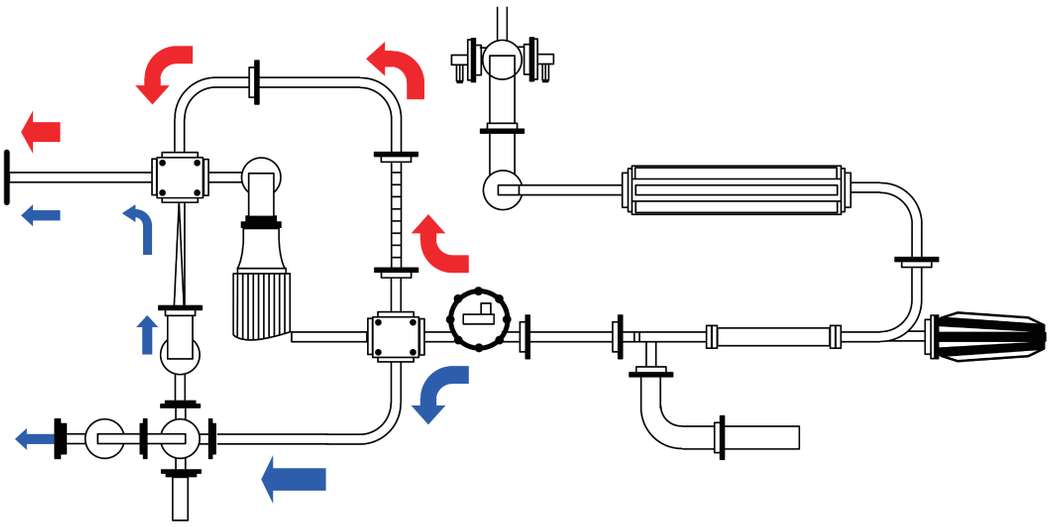

图 2 CINRAD/SA-D 单偏振与双偏振工作模式切换示意图（红色为单偏振工作模式，蓝色为双偏振工作模式）
Fig.2 Schematic diagram of switch between single-polarization (red) and dual-polarization (blue) mode of CINRAD/SA-D

2 双偏振天气雷达关键技术升级

双偏振天气雷达具有水平和垂直双通道，其结构更加复杂，为保障双通道的一致性及雷达整体性能的提升，需要对 CINRAD/SA 雷达软件及硬件技术同时整改升级。详见表 1。

表 1 关键器件性能技术升级
Table 1 Technical upgrade of performance of key devices

器件名称	技术升级	性能
伺服系统	碳刷结构汇流环升级为免维护汇流环；直流电机升级为交流电机	减少天线动态故障，提高伺服系统运行稳定性和可靠性
馈线	升级极化双工器；升级双通路方位旋转关节；增加垂直收发支路	实现双发双收（SHV）或单发双收（AHV）功能
接收机	升级 WRSP 数字中频信号处理器；增加 Burst 混频通道和相位编码技术；接收机前端移至机房，敏感器件进行温度补偿处理	扩展接收机动态范围；实现 Burst 修正功能；保障接收机双通道的一致性
频率源	升级高性能晶振频率源	提高相位噪声稳定度
标定系统	提升标校信号源 1 稳定性，增加标校信号源 2	双标定信号互补避免误修订，检验接收链路双通道幅度、相位一致性
雷达远程监控	增加天气雷达标准输出控制器（WRSOC）	远程监控雷达性能，提升雷达设备保护能力
RPG/PUP 软件	升级为双偏振雷达产品生成和显示软件	算法提升；兼容单、双偏振全部产品；提升地物识别及电磁干扰滤波能力
RDASC 软件	升级为双偏振雷达控制软件	实现组网雷达同步；增加任务调度功能；实现扫描模式多样化
RDASOT 软件	升级为双偏振雷达测试软件	控制模式实现了 RDASOT 与 RDASC 适配参数修改的同步性

2.1 软件技术升级

RDA（雷达数据采集系统）、RPG（雷达产品生成系统）、PUP（雷达产品显示系统）、RDASC（雷达数据采集系统控制平台）、RDASOT（雷达数据采集测试平台）运行环境（Linux）、软件统一进行双偏振软件升级。升级后的双偏振天气雷达控制软件实

现了组网雷达同步、任务调度、扫描模式多样化功能；实现了 KD（速调管输出）脉冲识别、流传输、基数据格式标准化、FTP 上传、I/Q 存档等功能；改进了雷达在线标定功能，避免因标定信号本身问题带来的误修订；通过升级信号处理算法，在基数据和产品生成部分增加和改进雷达自动判断异常回波数据的功能，有效降低了异常回波的发生概率，提高了雷达识别地物和电磁干扰的能力；雷达测试软件操作便捷，控制模式实现了 RDASC 与 RDASOT 适配参数修改的同步性，减少了中间环节的差错概率，提高了工作时效。

2.2　硬件技术升级

2.2.1　网络数字接收机/信号处理器技术升级

接收机升级是双偏振雷达技术升级的关键点。升级过程中，增加了垂直接收通道；频率源升级为高性能晶振频率源；A/D 数字中频升级为网络版的数字中频信号处理器（WRSP）；增加了相位编码技术。

1）改进了数字中频信号处理器。由 A/D、下变频、HSP-A、HSP-B 及 PSP 等多个器件构成的信号处理器升级为集成独立的、网络版的数字中频信号处理器（WRSP）（图 3），减少了多器件转化引起的故障率，提高了系统运行的稳定性。升级后的 WRSP 具有双偏振接口功能，支持水平与垂直通道（H/V），是集多通道 ADC 实时中频采样、实时数字下变频处理、动态范围补偿和雷达定时同步控制功能为一体，以超大规模现场可编程阵列（FPGA）和高性能数字信号处理（DSP）芯片为核心，每秒可执行 300 亿次以上乘、加运算，处理能力较升级前信号处理器提升了近 20 倍。WRSP 以 PPP（脉冲对处理方法）、FFT（快速傅里叶变换）为主要处理方式，数据输出有 T（滤波前反射率因子）、Z、V、W、Z_{DR}、PDP、CC、K_{DP} 等，支持雷达定标测试功能，支持雷达在线数据更新和保存功能。WRSP 摒弃了传统的 PCI 总线的硬件信号处理器，采用千兆以太网作为通信接口，基于 MAC 层的网络数据交互，效率高，灵活通用，降低了终端软件信号处理计算机选型难度和采购成本。

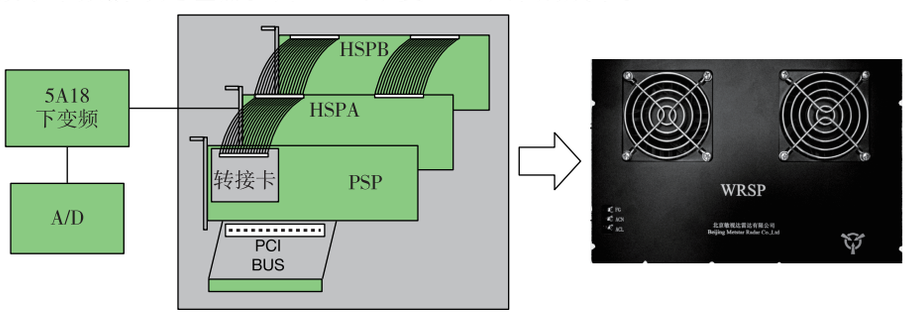

图 3　数字中频信号处理器升级前后

Fig.3　Pre-update and post-update state of IF (intermediate frequency) digital signal processor

2）WRSP 信号处理。雷达回波产生的 I/Q 数据与 Burst 信号同时送入 WRSP 数字信号处理器中，在信号处理器中经过干扰滤波、地物滤波识别、地物杂波滤除、相位编码处理等产品算法后一起进行基本产品计算和质量控制因子计算，再经点杂波滤除、无效回波滤除和速度去折叠等技术，输出高质量的气象数据产品（图 4）。

3）增加了相位编码技术与 Burst 混频标定通道。Burst 混频将 4A20 四路功分器送来的发射机输出信号（发射射频脉冲信号经发射机定向耦合器 1DC 耦合输出）与 4A1 频率源 J2 送来的本振（STALO）信号混频，得到带有发射机输出脉冲信息的信号送入 WRSP 数字中频信号处理器进行后期标定处理，对发射脉冲进行采样分析，作为 I/Q 信号修正和相位编码基准。

4）接收机关键部件增加温度补偿功能。将位于天线罩内的接收机前端的低噪声放大器和保护器等关键器件移入恒温、恒湿运行环境下的设备机房；接收双通道器件进行一致性配对选择。确保接收系统处于同一电磁环境下，减少电磁干扰带来的差异，保障了雷达双通道幅度、相位的一致性和系统运行的稳定性。

2.2.2　天线伺服系统技术升级

将需定期维护、运行寿命短、故障率高的直流电机改进为运行稳定、免维护、寿命长的交流电机。采用新型金属丝汇流环替代传统的碳刷式汇流环。金属丝汇流环没有碳刷，不存在碳粉堆积、碳刷消耗等问题，绝缘度高，在整个寿命周期（500 万转）内

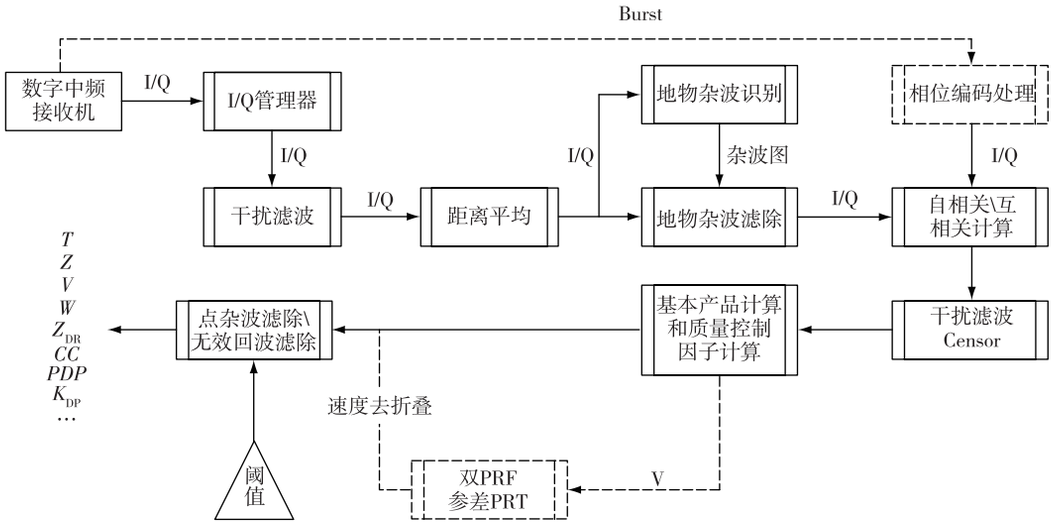

图 4 数字中频信号处理器信号流程

Fig.4 Signal flow of IF digital signal processor

维护次数不超过两次。汇流环信号输入设计采用航空接插件,分为电源和信号两种接口形式,减少了信号中间连接环节。升级后,降低了天线伺服系统的故障率,提高了系统运行的稳定性和可靠性。

2.2.3 雷达远程监控的实现

雷达升级增加了雷达远程控制功能。通过改进配电机柜,增加远程网络接口控制继电器组件,远程控制电源机柜总电源开关,以及各分机电源开关,实现雷达一键式开、关机功能。

雷达远程控制的实现,能够满足雷达远程控制请求、分机电源控制、一键开关机控制、故障复位、扫描模式控制、工作模式切换控制,满足雷达无人值守的运行要求;能够远程监控标定数据,评估、修改雷达适配参数,从而提高雷达运行的稳定性和数据质量的可靠性。

2.3 标定系统技术升级

CINRAD/SA-D 双偏振天气雷达标定信号来自两个位置(图 5)。CW 在线标定信号 1 来源于机内信号源 1(高性能晶振频率源);新增 TS 在线标定信号 2 来源于信号源 2(位于天线反射体)。雷达在运行过程中两个标定信号互补,避免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一致性至关重要。

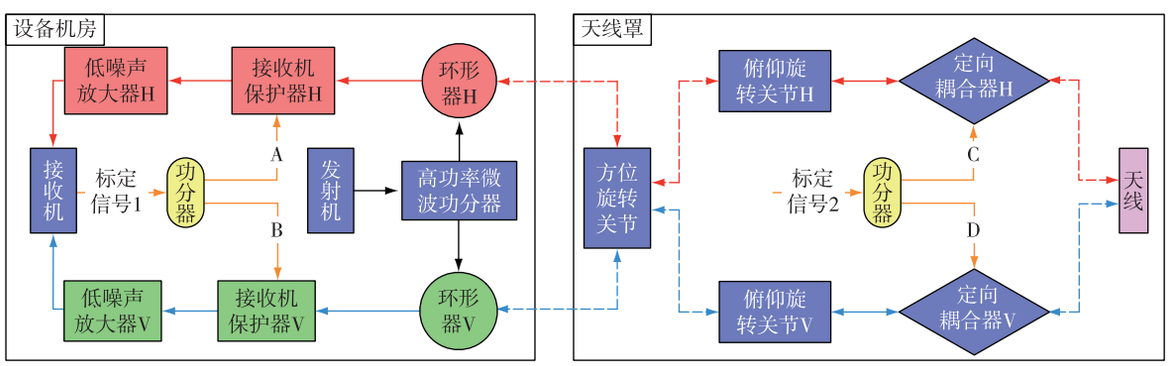

图 5 CINRAD/SA-D 双偏振天气雷达在线标定信号流程

Fig.5 Flow of online calibration signal of CINRAD/SA-D dual-polarization weather radar

2.3.1 CW 在线标定

CW 标定信号 1 经接收机测试通道,通过功分器分别向水平和垂直接收通道的接收机保护器注入,经低噪声放大器送入数字中频信号处理器 WRSP,经 WRSP 处理后,在 RDA 计算机终端读出标定数据,标定数据位于 RDA 计算机 LOG 文件夹下的 Calibration 文件,通过读取 CW-Z_{DR}、CW-*PDP* 验证接收机双通道的一致性。

图 6 为济南 CINRAD/SA-D 雷达 2019 年 3 月 5 日连续 24 小时 CW-Z_{DR}、CW-*PDP* 在线标定数据变化曲线，由此计算CW 标定信号通过接收机双通道幅度变化了 0.03 dB，相位变化了 0.7°，CW-Z_{DR} 和 CW-*PDP* 的标准差分别为 0.006 3 dB 和 0.046 8°，满足 CW-Z_{DR} ≤0.2 dB、CW-*PDP*≤3°的指标要求，表明 CW 标定测试信号通过接收机双通道幅度、相位的一致性。

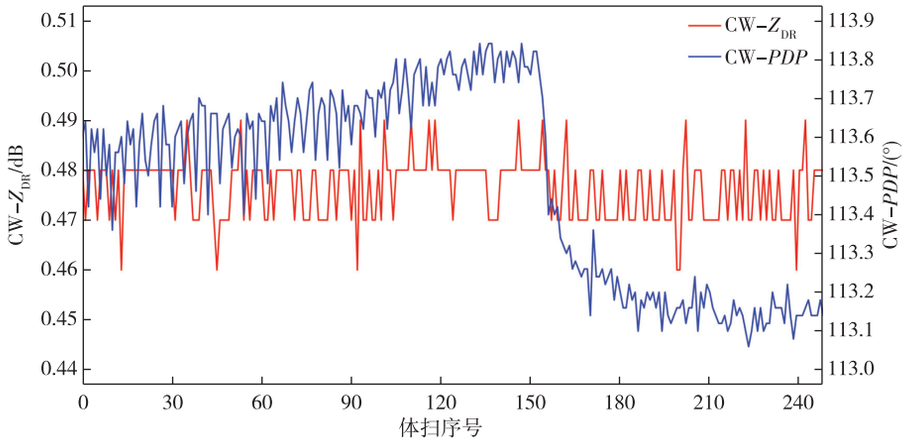

图 6　2019 年 3 月 5 日连续 24 小时 CW-Z_{DR} 和 CW-*PDP* 在线标定数据变化曲线特征

Fig.6　Variation curve of CW-Z_{DR} and CW-*PDP* online calibration data continuously in 24 hours on 5 March 2019

2.3.2　TS 在线标定

TS 标定信号 2 通过功分器分别向水平和垂直接收通道链路定向耦合器的耦合端注入，经俯仰旋转关节、方位旋转关节、馈线及接收机主通道进入数字中频信号处理器 WRSP。TS 信号受 WRSP 控制，在每个 PPI(平面位置显示)间隔处于开启状态，即在天线抬升仰角时完成一次标定，以 VCP21D 体扫模式为例，一个体扫可以标定 9 次，标定结果包含了旋转关节随方位带来的幅度和相位的变化，标定数据记录在 RDA 计算机 LOG 文件夹下的 Calibration 文件，通过分析 TS-Z_{DR} 和 TS-*PDP* 随旋转关节 360°数据变化曲线特征，检验了旋转关节对接收链路的一致性的影响。

图 7 为济南 CINRAD/SA-D 雷达 2019 年 3 月 5 日连续 24 小时 TS-Z_{DR}、TS-*PDP* 在线标定数据变化曲线。由此可知：幅度、相位随方位 360°旋转分别变化了 0.09 dB、2.7°，计算 TS-Z_{DR} 标准差为 0.021 dB，TS-*PDP* 的标准差为 0.77°，满足 TS-Z_{DR} ≤0.2 dB、TS-*PDP*≤3°的指标要求。由图 7 可知，旋转关节随着方位的变化对整个接收链路的信号幅度和相位呈现出一定的周期变化规律，因此随着双偏振雷达的长期运行，方位旋转关节对整个接收链路的信号幅度和相位一致性的影响不可忽略，需要定期对 Z_{DR} 与 *PDP* 进行订正。

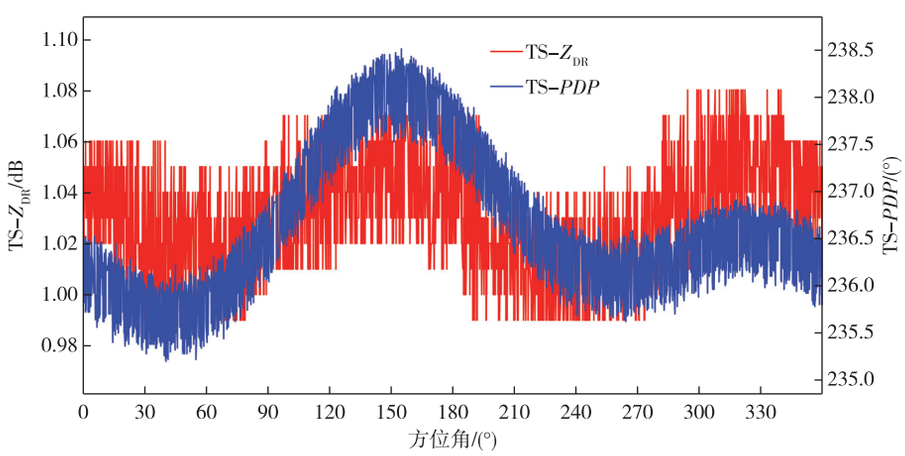

图 7　2019 年 3 月 5 日连续 24 小时 TS-Z_{DR} 和 TS-*PDP* 在线标定数据变化曲线特征

Fig.7　Variation curve of TS-Z_{DR} and TS-*PDP* online calibration data continuously in 24 hours on 5 March 2019

3 升级后雷达性能数据结果分析

1)采用双发双收工作体制的双偏振多普勒天气雷达,由于发射功率需要均分到水平和垂直两个通道支路,理论上分析探测灵敏度会下降 3 dB ,信噪比损失会带来雷达探测参量的计算误差以及弱信号的丢失。由于济南雷达在双偏振升级时,对接收机数字中频进行升级,降低了中频噪声,提升了接收机灵敏度。接收机灵敏度实际测量值水平通道窄脉冲由 −109 dBm 提升至 −113 dBm,宽脉冲由 −110 dBm 提升至 −117 dBm;新增的垂直通道窄脉冲实测值为 −113 dBm,宽脉冲为 −118 dBm,接收机灵敏度的提升改善了雷达对弱信号的探测能力。对于弱信噪比的回波,基于回波信号的相关性,综合水平和垂直双通道来区分回波和噪声,从而提高弱回波的识别能力。

2)接收机和信号处理器的升级,扩展了接收机动态范围,由 89 dB 提升至 101 dB; Burst 混频标定及相位编码新技术,显著提升了雷达系统的杂波抑制能力。实测选取 10 个采样点的实际地物对消能力由 32.62~45.10 dB 提升至 37.5~49.7 dB;信号处理新技术新算法的应用,距离分辨率由 1 000 m 提升至 250 m,提高了雷达数据的精细度,同时增加对异常回波的监测功能,提高了雷达对干扰信号的识别能力。

3)新型频率源晶振模块的升级,提升了频率源性能指标,相位噪声由−133 dBc/Hz@ 10 kHz 提升至−138 dBc/Hz@ 10 kHz,提高了相位噪声稳定度,发射机输出改善因子由 59.34 dB 提升至 61.64 dB,相位噪声由 0.107°提升至 0.041°。

综上所述,雷达软件与硬件关键技术的升级,使雷达整体性能提升(表 2)。

表 2 雷达升级前后主要技术参数对比

Table 2 Comparison between pre-update and post-update main technical parameters

升级前后	噪声系数/dB	接收机动态范围/dB	接收机灵敏度/dBm	相位噪声/(°)	发射机峰值功率波动/dB	发射机输出改善因子/dB	发射机输出端杂噪比/dB	实际地物对消能力/dB	滤波前后功率比估算/dB	距离分辨率/m	汇流环/万转	速调管/h
升级前指标	≤4.0	≥85	≤−110	≤0.15	—	≥52	—	30~50	≥50	1 000	≥400	≥5 000
升级后指标	≤3.0	≥95	≤−110	≤0.1	0.2	≥55	≤10	30~50	≥55	250	≥500	≥20 000
升级前实测值	2.69	89	−109	0.107	—	59.34(644 Hz) 56.77(1 282 Hz)	—	32.62~45.1	54.62	1 000	定期维护	—
升级后实测值	1.71	101	−113	0.041	0.13	61.64(644 Hz) 62.77(1 282 Hz)	4.35(644 Hz) 3.23(1 282 Hz)	37.5~49.7	61.62	250	免维护	—

注:雷达升级前后主要性能参数测试值取自 2018 年 10 月 20 日和 2019 年 3 月 3 日。

4 小结

1)通过 WRSP 信号处理器、晶振频率源、标定技术、相位编码技术、信号处理新技术新算法等关键技术的升级,提升了雷达的整体性能。升级后,接收机灵敏度由 −109 dBm 提升至 −113 dBm,接收机动态范围由 89 dB 提升至 101 dB,发射机输出改善因子由 59.34 dB 提升至 61.64 dB,系统相位噪声由 0.107°提升至 0.041°,系统实际地物对消最大值由 45.1 dB 提升至 49.7 dB,距离分辨率由 1 000 m 提升至 250 m,改善了雷达对弱信号的探测能力,增强了对电磁干扰、超折射的识别能力,增强了地物抑制能力。

通过采用接收机前端移至温控环境下的机房,双通道器件进行一致性配对选择,关键敏感器件进行温度补偿处理等措施,保障了双通道幅度、相位的一致性和系统运行的稳定性。

2)天线伺服系统通过改碳刷结构汇流环为金属丝免维护汇流环,减少了天线动态故障报警率,提高了伺服系统运行的稳定性和可靠性。

3)通过 CW 与 TS 在线标定技术检验接收链路双通道的一致性,旋转关节对整个接收链路的信号幅度和相位一致性有影响,这种影响随着方位的变化呈现出一定的周期变化规律,因此随着双偏振雷达的长期运行,方位旋转关节的影响不可忽略,需要定期对 Z_{DR} 与 PDP 进行订正。

参考文献:

[1] 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.
[2] 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.
[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] 李柏,古庆同,李瑞义,等.新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J].气象,2013,39(3):265-280.
[5] 尹忠海,胡绍萍,张沛源.双线偏振多普勒雷达测量降水[J].气象科技,2002,30(4):204-213.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 孟庆春,沈永海,苏德斌.双线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.
[10] 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.
[11] 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.
[12] 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.
[13] 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.
[14] RYZHKOV A V, GIANGRANDE S E, MELNIKOV V M, et al. Calibration issues of dual-polarizarion radar measurements [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2005, 22(8):1138-1155.
[15] SCHUUR T, RYZHKOV A, HEINSELMAN P. Observation and classification of echoes with the polarimetric WSR-88D radar[R]. Norman, Oklahoma: National Servere Storms Laboratory, NOAA, 2003:19-26.
[16] MELNIKOV V M, DOVIAK 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.
[17] 北京敏视达雷达有限公司.中国新一代多普勒天气雷达 CINRAD/SA-D 双偏振天气雷达培训手册[M]. 北京:北京敏视达雷达有限公司,2018.
[18] 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.
[19] 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.
[20] 中国气象局. QX/T 464-2018 S 波段双线偏振多普勒天气雷达[S].北京:中国气象局,2018.