

谢晓林,胡迪,郑伟,等. 基于标准差分析法的 S 波段双偏振雷达数据质量评估[J]. 中低纬山地气象,2023, 47(4):103-107.

基于标准差分析法的 S 波段双偏振雷达数据质量评估

谢晓林^{1,2}, 胡 迪³, 郑 伟¹, 彭 涛¹, 景号然^{1,2}

(1. 四川省气象探测数据中心, 四川 成都 610072; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害
四川省重点实验室, 四川 成都 610072; 3. 四川省气象台, 四川 成都 610072)

摘 要:该文针对 S 波段双偏振天气雷达设计了一种改良的标准差分析方法,用以评估雷达数据质量。通过评估 2022 年 2—10 月成都雷达基数据的数据质量,得到如下结果:(1)对于正常雷达数据,改良的标准差计算方法与原始方法都能得到相同趋势的标准差分布结果;而对于异常雷达数据,改良的标准差计算方法能得到更优的标准差分布结果。(2)成都雷达 Zh 数据质量存在较大波动,标准差低于 SD_{Zh} 标准值的比例仅 43.67%。(3)成都雷达 Zdr 和 CC 数据质量较好,标准差低于 SD_{Zdr} 和 SD_{CC} 标准值的比例分别为 84.09% 和 87.10%, Φdp 的数据波动较大,标准差低于 $SD_{\Phi dp}$ 上限的比例仅 34.54%。

关键词:双偏振雷达;数据质量;标准差

中图分类号:P412.25 **文献标识码:**B

Evaluation on Data Quality of S – band Dual Polarization Radar Based on Standard Deviation Analysis

XIE Xiaolin^{1,2}, HU Di³, ZHENG Wei¹, PENG Tao¹, JING Haoran^{1,2}

(1. Meteorological Observation Data Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;
2. Heavy Rain and Drought – flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province,
Chengdu 610072, China; 3. Meteorological Observatory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

Abstract: Aiming at S – band dual polarization weather radar, an improved standard deviation analysis method is designed to evaluation radar data quality. By evaluating the data quality of Chengdu radar base data from February to October 2022, the following results are obtained: (1) when calculating the normal radar data, two methods can get the same trend of standard deviation distribution results, and when calculating the error radar data, the results of improved method are better. (2) The Zh of Chengdu radar data has great fluctuation, and the proportion of standard deviation lower than the standard value of SD_{Zh} is only 43.67%. (3) The data quality of Zdr and CC in Chengdu radar is superior. The proportion of standard deviation lower than SD_{Zdr} and SD_{CC} standard value is 84.09% and 87.10%. the Φdp of Chengdu radar data has great fluctuation, and the proportion of standard deviation lower than the standard value of $SD_{\Phi dp}$ is only 34.54%.

Key words: dual polarization radar; data quality; standard deviation

0 引言

成都 CINRAD/SAD 新一代天气雷达自 2022 年 2 月 1 日正式投入业务运行以来,性能稳定,雷达数

据在短临预报、人工影响天气等方面发挥了重要作用。根据中国气象局要求,成都雷达先后完成了出厂测试、安装后测试和业务准入测试,3 次测试结果都完全满足测试大纲的性能指标要求。

收稿日期:2022-12-03

第一作者简介:谢晓林(1991—),男,工程师,主要从事天气雷达数据及相关算法研究,E-mail: xie_xiao_lin@163.com。

资助项目:高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室青年专项(SCQXKJQN2019016)。

雷达调试完成后,雷达性能在短时间内的变化很小,上述 3 次测试都仅依靠 24~48 h 的考机数据来判断雷达的正常与否,如要评估分析雷达数据质量情况,应采用长时间序列的数据来分析^[1-3]。成都雷达作为四川省首批双偏振新一代天气雷达,研究其数据质量情况,特别是双偏振参量(差分反射率 Z_{dr} 、差分相移 Φ_{dp} 、差分相移率 K_{dp} 、相关系数 CC 等)的数据质量,是保证成都新一代天气雷达完成双偏振升级后充分发挥优势和效益的重要环节^[4-6]。

标准差分析法是一种有效的雷达数据质量评估方法。李思腾等^[7]利用标准差分析了 X 波段双偏振天气雷达在一次降水个例过程中的偏振参量标准差分布情况,通过径向数据与前后 3 个距离库的值进行标准差计算,得到 X 波段天气雷达标准差的计算方法。X 波段天气雷达距离库多为 75 m,3 个距离库为 225 m,然而新一代天气雷达距离库长多为 250~300 m,如采用该方法计算径向数据前后 3 个距离库长之间的标准差,空间尺度增大到 750 m 以上,当天气过程变化较大时,实际回波的正常变化也会导致标准差变大。针对该问题,本文设计了一种适用于 S 波段双偏振天气雷达数据质量的标准差评估方法,最大限度地降低了空间尺度带来的标准差增量。通过统计长时间序列天气雷达的观测数据,得到成都 CINRAD/SAD 新一代天气雷达的数据质量结果,以期能对雷达数据在天气预报、人工影响天气中的应用和利用雷达数据开展定量估测降水、雨滴谱反演和粒子相态识别等方面的研究工作提供参考依据。

1 雷达与数据

成都雷达站建于成都市东南侧的龙泉山脉上,此处地势高于成都平原海拔,雷达能覆盖整个成都市区,并能观测到主要天气过程来向方向的回波。成都市地形复杂,北属龙门山脉,西属邛崃山脉,与阿坝州相连,东南侧有龙泉山脉,与内江市接壤,南靠乐山市,西南侧与雅安市交接。龙泉山脉由东北向西南倾斜,龙门山脉和邛崃山由东北绕向西南,分别纵贯成都市的东西两侧。

本文统计分析了 2022 年 2—10 月成都 CINRAD/SAD 型雷达基数据的数据质量,利用适用于 S 波段天气雷达的标准差分析法对所有降水数据进行定量评估,得到了成都雷达数据质量的评估结果。

2 标准差评估方法

统计天气雷达基数据标准差,可以了解雷达数

据的波动情况。在雷达参数性能一切正常的情况下,基数据标准差应该符合一定的理论分布,允许气象回波数据存在理论标准差,正常的基数据标准差分布应该大部分小于或等于标准差理论值。所以计算雷达参量标准差的理论值是标准差分析法评估天气雷达数据质量的第一步。

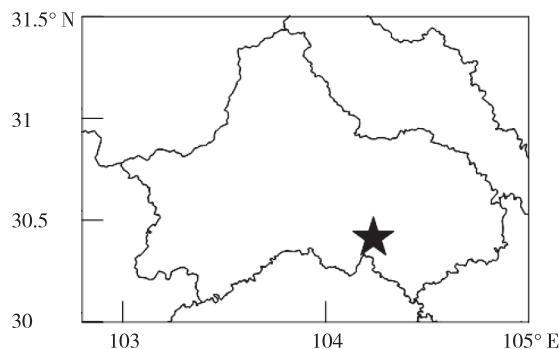


图 1 成都 CINRAD/SAD 新一代天气雷达位置

Fig. 1 Chengdu CINRAD/SAD weather radar location chart

得到标准差理论值后,再通过标准差算法计算雷达基数据的水平极化反射率因子 Z_h 、差分反射率 Z_{dr} 、差分相移 Φ_{dp} 和相关系数 CC 实际标准差,与理论公式得到的标准差相比较,统计 4 种物理量数据的标准差超差情况,以反映雷达数据质量的好坏。文章算法仅适用于天气雷达物理量参数,暂不统计径向速度 V 和速度谱宽 W 的数据质量问题。另外,由于偏振参量差分相移率 K_{dp} 是由 Φ_{dp} 直接计算得到, K_{dp} 的数据质量可参考 Φ_{dp} 的评估结果。

2.1 标准差理论值计算

利用标准差统计分析法对天气雷达的 Z_h 、 Z_{dr} 、 Φ_{dp} 和 CC 物理量数据进行定量评估,是分析双偏振天气雷达数据质量的有效方法。GUIFU ZHANG^[8]给出了计算 Z_h 、 Z_{dr} 、 Φ_{dp} 和 CC 标准差理论值的公式,认为当雷达硬件参数正常时,气象目标观测参数的标准差应符合一定理论分布,可以通过雷达观测数据的标准差分布来定量判断雷达数据质量是否正常。 Z_h 、 Z_{dr} 、 CC 和 Φ_{dp} 的标准差理论值公式如下:

$$\begin{cases} SD_{Z_h}(\sigma_v) \approx 10 \lg(1 + \frac{1}{\sqrt{M_i(\sigma_v)}}) \\ SD_{Z_{dr}}(\sigma_v, CC) = \frac{10}{\ln 10} \sqrt{\frac{2}{M_i(\sigma_v)}(1 - CC^2)} \\ SD_{CC}(\sigma_v, CC) = \frac{1 - CC^2}{\sqrt{2M_i(\sigma_v)}} \\ SD_{\Phi_{dp}}(\sigma_v, CC) = \frac{180}{\pi CC} \sqrt{\frac{1 - CC^2}{2M_i(\sigma_v)}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, SD_{Z_h} 、 $SD_{Z_{dr}}$ 、 SD_{CC} 和 $SD_{\Phi_{dp}}$ 分别表示 Z_h 、

Zdr 、 CC 和 Φdp 标准差理论值, M_i 表示独立样本数, 其计算公式如下:

$$M_i(\sigma_v) = \frac{4\pi M}{PRF \sqrt{\pi \lambda}} \cdot \sigma_v \tag{2}$$

可见,整理得到的 Zh 、 Zdr 、 CC 和 Φdp 标准差理论值仅与 σ_v 和 CC 有关,其余参数在雷达观测数据中皆为固定值。 σ_v (单位: $m \cdot s^{-1}$) 表示大气湍流速度, PRF (单位: Hz) 表示脉冲重复频率,成都雷达 1~2 层仰角的 PRF 为 322 Hz 。 λ (单位: cm) 表示雷达波长,如成都雷达波长为 10.42 cm 。 M (单位: 个) 表示雷达脉冲采样个数,成都雷达脉冲采样个数 M 为 32 个。

文章数据质量定量评估方法主要针对有天气过程的数据,降水回波的 CC 一般在 0.9~0.99 之间,假定大气湍流速度 σ_v 在 0.5~10 $m \cdot s^{-1}$ 之间,即可得到标准差理论值的上限,计算得成都雷达 0.5° 仰角 Zh 、 Zdr 、 CC 和 Φdp 标准差理论值上限^[9-10],详见表 1。

表 1 成都 SAD 雷达 Zh 、 Zdr 、 Φdp 和 CC 标准差理论值

Tab. 1 The standard deviation theoretical value of Zh 、 Zdr 、 Φdp and CC in Chengdu radar

PRF/Hz	波长/ cm	SD_{Zh}	SD_{Zdr}	$SD_{\Phi dp}$	SD_{CC}
322	10.42	1.89	1.46	3.14	0.07

2.2 标准差实际值

原始的标准差实际值计算方法通过径向数据

$$\begin{cases} SD(\theta, k) = \sqrt{\frac{1}{9} \sum \{ [P(\theta - 1, k - 1) - \bar{P}_k]^2 + \dots + [P(\theta + 1, k + 1) - \bar{P}_k]^2 \}}, 0 < k < K \\ \bar{P}(\theta, k) = \frac{1}{9} \sum [P(\theta - 1, k - 1) + \dots + P(\theta + 1, k + 1)], 0 < k < K \end{cases} \tag{3}$$

式中, $SD(\theta, k)$ 表示任意仰角上方位角为 θ 的第 k 个距离库的观测量标准差, $P(\theta, k)$ 表示该点观测量的大小, K 表示距离库数, $\bar{P}(\theta, k)$ 表示 $P(\theta, k)$ 与周围 1 个距离库范围内的 8 个数据的均值。需要说明的是,由于 Zh 单位是 dBz ,应将单位换算为 $mm^6 \cdot m^{-3}$ 计算均值后,再转换回 dBz 。

3 标准差计算方法改良效果

文章通过对比改良前后标准差计算方法对正常回波数据和异常回波数据的统计结果,验证改良后算法对 S 波段天气雷达标准差计算的合理性。

2022 年 9 月 7 日 20 时 31 分成都天气雷达站观测到一次降水过程,以此基数据作为正常回波数据,图 3a 给出了改良前后算法计算得到的 Zdr 标准差对比分布图,图中虚线表示 SD_{Zdr} 标准值的位置。

与前后 3 个距离库的值进行标准差计算,在计算 S 波段天气雷达数据时,空间尺度达到了 750 m 以上,当天气过程变化较大时,实际回波的正常变化也会导致标准差变大。针对该问题,本文根据 S 波段双偏振新一代天气雷达距离库长的实际情况,改良了标准差的计算方法,采用计算径向数据周围 1 个距离库范围内的 8 个数据得到标准差,这样可以最大限度地保持参与标准差计算的数据之间的相关性,减小由于实际天气变化而带来的标准差增量,示意图见图 2。

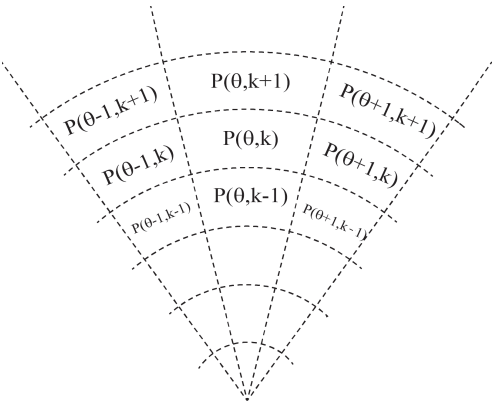


图 2 改良的标准差计算方法示意图

Fig. 2 Chart of the improved standard deviation calculation method

根据上述条件,得到标准差的计算公式如下:

可见,对于正常回波数据而言,标准差算法改良前后得到的分布结果趋势相近,改良后算法计算的标准差稍大一些,标准差算法改良前后得到的分布结果低于 SD_{Zdr} 标准值的占比分别为 82.84% 和 81.38%。

2022 年 5 月 5 日 08 时 33 分成都雷达回波出现严重干扰,以此基数据作为异常回波数据,图 3b 给出了标准差算法改良前后计算得到的 Zdr 标准差对比分布图。可见,改良前后得到的结果趋势差异明显,原算法得到的标准差分布在小值区域,低于 SD_{Zdr} 标准值的占比为 97.24%,并未反映出数据异常情况;改良后的标准差算法得到了较大的结果,低于 SD_{Zdr} 标准值的占比仅为 10.66%,反映出了异常回波较差的数据质量。

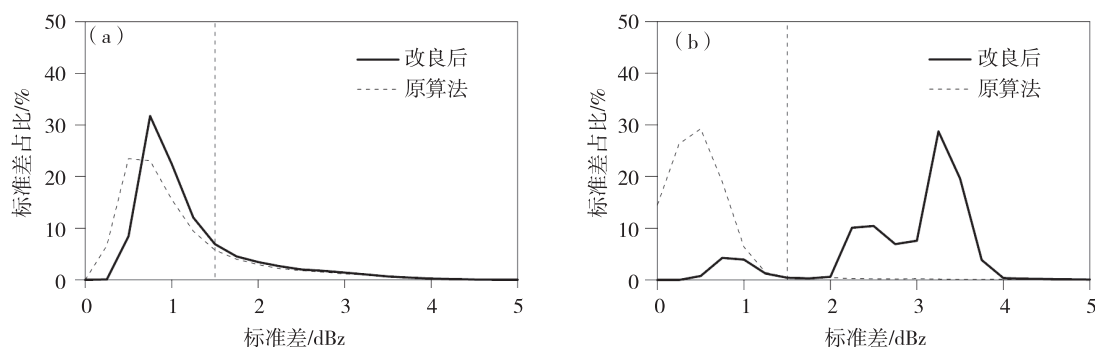


图 3 算法改良前后计算正常(a)、异常(b)回波数据的标准差对比图

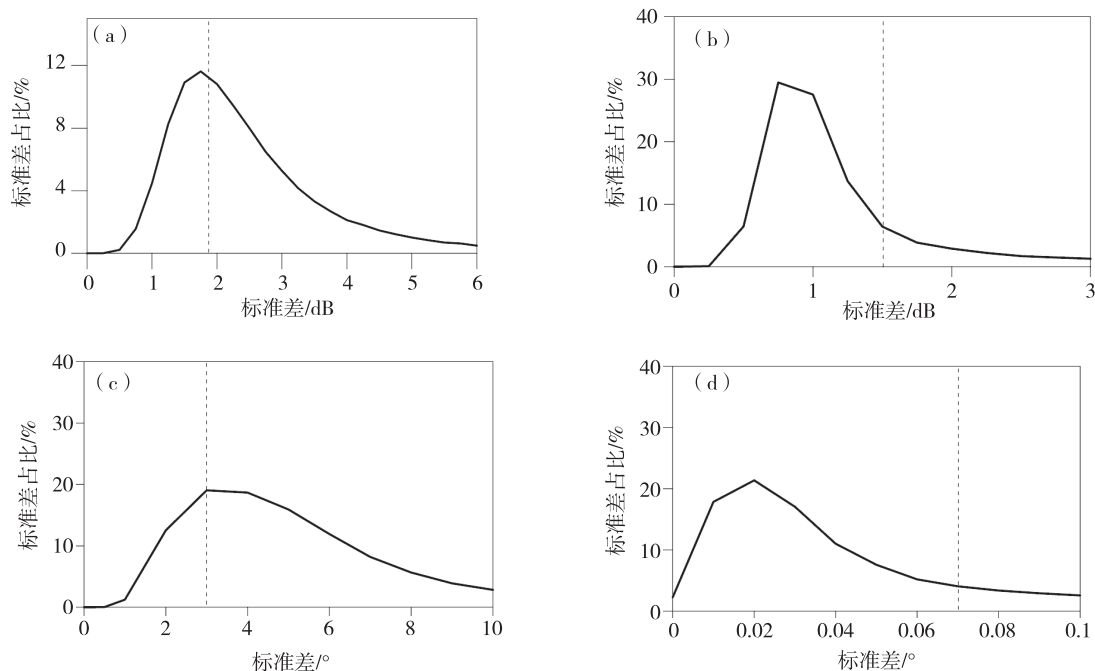
Fig. 3 Comparison chart of calculating the standard deviation of normal (a)、error (b) echo data before and after the algorithm improvement

4 评估结果

4.1 Z_h 评估结果

根据本文改进后的天气雷达标准差算法,统计分析 2022 年 2—10 月成都 CINRAD/SAD 新一代天气雷达基数据的数据质量,图 4a 给出了成都雷达反

射率因子 Z_h 标准差分布结果,统计样本量超过 80 万。另外,根据表 1 的标准差理论值结果,成都雷达的 SD_{Z_h} 标准值为 1.89 dBz,如图 4a 中虚线所示。可见,成都雷达 Z_h 标准差低于 SD_{Z_h} 标准值上限的比例不大,仅为 43.67%,反映出 Z_h 的数据质量较差, Z_h 数据存在较大波动。

图 4 成都雷达 Z_h (a)、 Z_{dr} (b)、 Φ_{dp} (c)、 CC (d)标准差分布图Fig. 4 Distribution chart of standard deviation of Z_h (a)、 Z_{dr} (b)、 Φ_{dp} (c)、 CC (d) in Chengdu radar

4.2 Z_{dr} 标准差评估

根据表 1 得到的结果,成都差分反射率因子标准差 $SD_{Z_{dr}}$ 上限为 1.46,图 4b 给出了成都雷达 Z_{dr} 标准差的分布情况,成都雷达 Z_{dr} 标准差总体都小于 1.46 dB,图中虚线表示 $SD_{Z_{dr}}$ 的位置, Z_{dr} 标准差低于 $SD_{Z_{dr}}$ 上限的比例为 84.09%,可以认为 Z_{dr} 数据的波动性较小。

4.3 Φ_{dp} 标准差评估

根据表 1 得到的结果,成都雷达差分相移标准差 $SD_{\Phi_{dp}}$ 上限为 3.14°,图 4c 给出了成都雷达 Φ_{dp} 标准差的分布情况,成都雷达的 Φ_{dp} 标准差总体都大于 3.14°,图中虚线表示 $SD_{\Phi_{dp}}$ 的位置, Φ_{dp} 标准差低于 $SD_{\Phi_{dp}}$ 上限的比例为 34.54%, Φ_{dp} 数据的波动性较大。

较低的比例反映出 Φdp 数据的稳定性较差,因此需要定期对 Φdp 数据进行定量校准。利用 Φdp 数据参与进行雷达定量降水估测(QPE)时, Φdp 数据自己的波动可能会导致估测结果的偏差变大^[11]。

4.4 CC 标准差评估

成都雷达相关系数 CC 的标准差 SD_{cc} 上限为 0.07,图 4d 给出了成都雷达 CC 标准差的分布情况, CC 标准差总体都小于 0.07,图中虚线表示 SD_{cc} 的位置,低于 SD_{cc} 上限的比例为 87.10%, CC 数据的波动性很小,标准差为 0 的占比也较高。

5 结论与讨论

文章针对 S 波段双偏振天气雷达设计了一种改良的标准差分析方法,用以评估雷达数据质量。该算法在保障计算准确性的前提下,减少了算法的空间随机性,也能反映出异常回波数据的数据质量情况,通过评估 2022 年 2—10 月成都雷达基数据 Zh 、 Zdr 、 CC 和 Φdp 的数据质量,得到了如下结果:

(1)改良的标准差计算方法在计算正常雷达数据时,能得到与原始方法相同趋势的标准差分布结果,而在计算异常雷达数据的标准差时,能得到较大的标准差结果。

(2)成都雷达 Zh 存在较大波动,标准差低于 SD_{Zh} 标准值的比例仅 43.67%。

(3)成都雷达 Zdr 和 CC 数据质量较好,标准差

低于 SD_{Zdr} 和 SD_{cc} 标准值的比例分别为 84.09% 和 87.10%, Φdp 的数据波动较大,标准差低于 $SD_{\Phi dp}$ 上限的比例仅 34.54%。

参考文献

- [1] 谢晓林,胡迪,罗宇昂,等.新一代天气雷达标准格式数据可视化监控系统设计与实现方法[J].气象水文海洋仪器,2022,39(3):65-69.
- [2] 邱双.雅安一次极端强降水的超级单体风暴特征及成因分析[J].中低纬山地气象,2022,46(2):55-62.
- [3] 宋雄,马中元,洪丽霞,等.雷电天气监测与雷电回波特征分析[J].气象水文海洋仪器,2021,38(1):27-30.
- [4] 宋歌,雷蕾,马建立,等.北京强对流天气中 X 波段双偏振雷达特征及应用[J].中低纬山地气象,2022,46(6):63-69.
- [5] 叶飞,梁海河,文浩,等.新一代天气雷达均一性评估[J].气象科技,2020,48(3):322-330.
- [6] 李霞,杨熠,武正敏,等.一次极端特大暴雨天气过程 C 波段双偏振雷达资料分析[J].中低纬山地气象,2022,46(5):45-50.
- [7] 李思腾,仰美霖,李林,等.基于标准差分析法的 X 波段双偏振天气雷达资料质量评估[J].干旱气象,2019,37(3):467-476.
- [8] GUIFU ZHANG. Weather radar polarimetry[M]. Boca Raton: CRC Press,2016.
- [9] 史朝,何建新,李学华,等. X 波段天气雷达地物回波的双偏振参量特征分析及应用[J].高原气象,2013,32(5):1478-1484.
- [10] 胡隐樵,陈晋北,吕世华.从湍流经典理论到大气湍流非平衡态热力学理论[J].高原气象,2012,31(1):1-27.
- [11] 陈昊,汪章维,王晗,等.基于 CINRAD-SA 双偏振雷达新型定量降水估测方法研究[J].气象科技,2022,50(5):611-622.