

鲁德金,胡姮,吴蕾,等,2024.天气雷达间一致性评估算法影响因子分析及改进[J].气象,50(4):475-487. Lu D J, Hu H, Wu L, et al, 2024. Influence factors analysis and improvement of consistency evaluation algorithm between weather radars[J]. Meteor Mon, 50(4):475-487(in Chinese).

天气雷达间一致性评估算法影响因子分析及改进^{*}

鲁德金^{1,2} 胡 姮¹ 吴 蕾¹ 柳云雷¹ 李瑞义¹ 吴林林³ 袁 野²

1 中国气象局气象探测中心,北京 100081

2 安徽省人工影响天气办公室,合肥 230031

3 中国气象局人工影响天气中心,北京 100081

提 要: 基于基数据的雷达间一致性评估的基本方法,分析了雷达高差、地形遮挡、噪声、充塞、时空重叠率、衰减等对一致性评估算法的结果质量的影响,并采取了相应的改进措施:使用雷达的波束遮挡比例数据进行遮挡订正或直接剔除存在遮挡的重叠点;对信噪比较低、充塞不充分及存在异常的重叠点予以剔除;增加了时间、空间重叠率因子,分析了不同阈值时间、空间重叠率对评估结果的影响。改进措施对一致性评估结果中的偏差均值、标准偏差的质量均有了一定的提高。使用改进后的算法对岳阳站雷达系统偏差和苏皖地区雷达回波一致性做了评估。结果表明:岳阳站在维护前后与周边雷达的偏差值有明显的降低,并回到正常水平,标准偏差值也略有降低;苏皖地区雷达间偏差均值大部分在 2 dB 以内,雷达间偏差均值所组成的矢量三角形闭合度较好,标准偏差在 2.9~3.3 dB,相关系数在 0.40~0.55。

关键词: 雷达基数据,一致性评估,影响因子,算法改进

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.121201

Influence Factors Analysis and Improvement of Consistency Evaluation Algorithm Between Weather Radars

LU Dejin^{1,2} HU Heng¹ WU Lei¹ LIU Yunlei¹ LI Ruiyi¹ WU Linlin³ YUAN Ye²

1 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

2 Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031

3 CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the basic method of consistency evaluation between radar base data, this article analyzes the influence of radar altitude difference, terrain blockage, noise, congestion, temporal and spatial overlap rate, attenuation, etc. on consistency evaluation algorithm result quality, and takes corresponding improvement measures, that is, using radar beam blockage percentage data to correct or directly eliminate overlapping points with blockage, eliminating the overlapping points with low SNR, incomplete filling and abnormality, adding the factors of temporal spatial overlap rate, and analyzing the impact of different threshold temporal and spatial overlap rates on the evaluation results. The improvement measures have improved the quality of the deviation mean and standard deviation in the consistency evaluation results. The improved algorithm is used to evaluate the radar system deviation of Yueyang Station and the consistency of radar echoes in Jiangsu and Anhui regions. The results show that the deviation value between the

^{*} 中国气象服务协会气象科技创新平台项目(CMSA2023MB005)、国家重点研发计划(2019YFC1510303)、安徽省重点研究与开发计划(1704f0804055)和安徽省自然科学基金项目(2208085UQ05)共同资助

2023 年 3 月 7 日收稿; 2023 年 11 月 3 日收修定稿

第一作者:鲁德金,主要从事雷达气象探测、人工影响天气研究. E-mail:ludejin0123@aliyun.com

通讯作者:胡姮,主要从事雷达气象探测、地基导航卫星遥感水汽技术研究. E-mail:huheng83@163.com

Yueyang Radar and the surrounding radars has obviously decreased after being maintained, returning to the normal level, and the standard deviation value has also decreased slightly. The average value of deviations between radars in Jiangsu and Anhui is mostly within 2 dB. The vector triangle composed of the deviation mean has a good closure, with standard deviation between 2.9 dB and 3.3 dB and correlation coefficient between 0.40 and 0.55.

Key words: radar base data, consistency evaluation, impact factor, algorithm improvement

引言

目前我国已有 237 部新一代天气雷达投入业务运行,其中有 73 部完成双偏振技术升级改造,新一代天气雷达观测几乎覆盖了全国多数人口密集区。我国雷达监测网规模为世界第一,与地面、高空、卫星观测共同构成了我国的综合观测体系,基本建成全球最大综合气象观测系统。

雷达回波强度观测的准确性一直以来都至关重要,雷达回波强度在 $Z-R$ 关系的定量估测降水产品中有着广泛的应用(李腹广和王芬,2007;郑媛媛等,2004;陈静等,2015;张鹏等,2021)。伍静等(2010)在研究中发现雷达网系统间不同雷达存在反射率系统偏差,当系统偏差较大时,用 $Z-R$ 关系估测降水存在较大的降水估测差值,直接影响了基于 $Z-R$ 关系的定量估测降水产品质量。雷达反射率是大部分雷达二次产品的基本产品,如直接应用于组网拼图产品(肖艳姣和刘黎平,2006)、风暴识别追踪(韩雷等,2007),以及雷达资料同化(陈锋等,2020)应用。唐菁等(2023)利用雷达反射率峰值分析了其与对流降水频次和空间分布的关系。反射率是双偏振雷达中水凝物粒子相态分类识别方法(Snyder et al, 2010;Chandrasekar et al, 2013)中的基本物理量。反射率也被用来估算 C 波段(Bringi et al, 2001)和 X 波段(Park et al, 2005)雨区径向远端差分反射率值,从而进行差分反射率的衰减订正。

单站雷达的反射率误差受到雷达自身设备参数欠定标、探测波束阻挡、杂波干扰、雷达测雨空间不均匀(张凌等,2003)等影响,对同一点气象目标物,不同雷达因探测目标物的方向、大气环境、衰减、遮挡、充塞等众多不同因素的影响,导致各站点雷达观测结果的不同。许多专家、技术人员通过硬件信号处理技术对雷达反射率进行定标(张沛源等,2001;潘新民等,2010)。国外使用星载测雨雷达 TRMM/PR (tropical rainfall measuring mission/precipitation

radar)与地基雷达比较之间反射率因子偏差,从而订正雷达反射率值(Wang and Wolff, 2009; Park et al, 2015),国内何会中等(2002)、罗布坚参等(2015)、王振会等(2015)使用热带降水测量卫星 TRMM 上降水雷达 PR 测到的反射率与我国地基雷达回波强度的一致性作了对比,取得了较好的效果。以上技术是借助了外部探测工具,如标定后的卫星探测工具(TRMM/RR、GPM 卫星)或天气雷达成标定仪器设备(金属球、示波器、功率计等设备),但卫星与地基雷达进行评估时需要卫星运行到雷达观测区域上方,且必须有合适的降水过程,导致卫星对雷达的一致性评估所需的周期较长。同样,采用天气雷达成标定仪器设备对雷达成标需要专业技术人员携带标设备到现场进行定标工作,一般只在特殊情况下才进行定标。也可以利用相邻雷达间业务观测数据,只通过软件设计来分析评估天气雷达网间的回波一致性,Gourley et al(2003)提出了一种软件的方法,来评估相邻雷达间的一致性,并给出了相邻匹配点的质量控制方法;张志强等(2008)将雷达回波插值到三维网格中,对华北地区四部雷达在定位、回波强度上的一致性情况进行了分析;肖柳斯等(2021)将 X 波段双偏振相控阵雷达衰减订正前后的数据与 S 波段多普勒雷达及相邻的 X 波段相控阵雷达数据做了对比评估;吴翀等(2014)、张林等(2018)分别对相控阵天气雷达与新一代多普勒天气雷达及新一代多普勒天气雷达间的一致性回波差异做了对比研究;叶飞等(2020a;2020b)基于质量控制后的 CAPPI 数据,对相邻雷达的等距离线上的回波强度一致性做了研究,并集成于全国新一代天气雷达一致性评估系统中。

受大气折射率的变化、雷达设备参数标定、遮挡等诸多因素的影响,天气雷达一致性评估是一个非常复杂的问题。本文针对新一代多普勒天气雷达从数据源、雷达相对位置、相邻点时空匹配规则、地形遮挡等方面来分析各个因子对雷达间一致性评估算法的影响,并对天气雷达间一致性评估算法作改进,

以更科学地评估我国新一代多普勒天气雷达一致性状况。

1 雷达间一致性评估基本方法

雷达是对一个波束空间探测的信号,相邻雷达间存在着共同的雷达波束照射空间,基于两部雷达的同一气象目标点的时间和空间上的一致性,把相对于两部雷达重叠的目标区域称为重叠点,通过地理信息坐标与雷达坐标的精确计算及时间一致性的筛选可以得到这些重叠点信息。

吴翔等(2014)、张志强和刘黎平(2011)在SPAR相控阵天气雷达与新一代天气雷达数据匹配过程中,因两部雷达空间分辨率不一致,利用极坐标与经纬度坐标转换、反射率空间插值等方法,设计了针对不同地理位置不同分辨率的雷达数据空间匹配方法。张林等(2018)针对业务运行的新一代多普勒天气雷达,将第一部雷达的极坐标转换为经纬度投影坐标,在第二部雷达的极坐标中寻找投影一致的目标,设定高度阈值达到两部雷达数据的空间匹配。

本文针对的数据是业务中使用的新一代多普勒天气雷达基数据,在空间匹配算法中也使用了以上方法,过程如下。

第一步,如图1,设雷达1、2的站点经度、纬度、海拔高度分别为 (λ_1, ϕ_1, h_1) 、 (λ_2, ϕ_2, h_2) ,雷达1每个体扫数据点极坐标方位、仰角、斜距分别为 a_1, e_1, L_1 ,利用雷达极坐标转经纬度公式、雷达测高公式转化为经纬度及海拔高度 (λ, ϕ, H_1) ,其地面投影点的经度、纬度分别为 λ, ϕ ,计算公式如下:

$$\phi = \sin^{-1}(\cos\beta_1 \sin\phi_1 + \sin\beta_1 \cos\phi_1 \cos a_1) \quad (1)$$

$$\lambda = \sin^{-1}\left(\frac{\sin a_1 \sin\beta_1}{\cos\phi}\right) + \lambda_1 \quad (2)$$

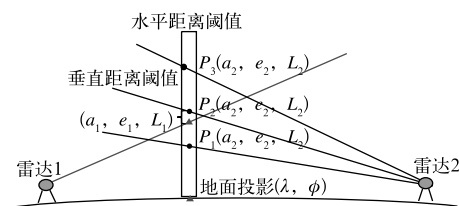


图1 雷达间空间一致性的数据匹配方法示意

Fig. 1 Schematic diagram of two radars' spatial consistency algorithm

β_1 为该投影点与雷达1地心处的夹角:

$$\beta_1 = K_m \tan^{-1}\left(\frac{L_1 \cos e_1}{R_m + h_1 + L_1 \sin e_1}\right) \quad (3)$$

式中: $K_m=4/3$, R_m 为等效地球半径。

第二步,利用经纬度坐标转雷达极坐标公式计算在该投影下的雷达2的数据坐标。雷达2有多层扫描仰角,数据点的扫描仰角 e_2 是已知的,利用坐标转化公式计算出雷达2下的数据极坐标方位、仰角、斜距 (a_2, e_2, L_2) (点数目由交叉的雷达2径向层数决定),及其高度 H_2 ,根据经纬度坐标转雷达极坐标。

$$\cos\beta_2 = \sin\phi \sin\phi_2 + \cos\phi \cos\phi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda) \quad (4)$$

这里 β_2 为投影点与雷达2地心处的夹角,根据 $\cos\beta_2$ 求得 $\sin\beta_2$,则

$$\sin a_2 = \frac{\cos\phi \sin(\lambda - \lambda_2)}{\sin\beta_2} \quad (5)$$

根据式(1)求得 $\cos a_2$,则方位角 a_2 、斜距 L_2 计算如下:

$$a_2 = \text{atan2}(\sin a_2, \cos a_2) \quad (6)$$

式中 atan2 为C语言中返回方位角的函数。若 $a_2 < 0$,则 $a_2 = a_2 + 2\pi$ 。

$$L_2 = \frac{\tan \frac{\beta_2}{K_m}}{\cos e_2 - \sin e_2 \tan \frac{\beta_2}{K_m}} (R_m + h_2) \quad (7)$$

得到两部雷达目标点极坐标后,利用测高公式计算目标海拔高度:

$$H = h + L \sin e + \frac{L^2}{2R_m} \quad (8)$$

最后,当两部雷达的目标点坐标的垂直高度差 $\Delta H < H_{\text{thre}}$ (H_{thre} 为高度差阈值)时,则认为其空间数据坐标是匹配的。

重叠点在时间上的一致性要求为观测时间上接近,这个时间差可以使用雷达体扫时间来计算,或者使用基数据中径向扫描时间来精确计算。先通过雷达体扫时间选择接近的数据,再根据径向时间进一步筛选。

两部雷达的基数据经时空匹配后得到重叠点反射率样本,将两部雷达在重叠点反射率(单位: dBZ)的差值称为偏差(单位: dB),使用偏差的均值(称为偏差均值 AVG)、标准偏差(SD)和两部雷达在重叠点观测的反射率的相关系数(CC)作为一致性评估指标。

2 影响因子分析与改进

2.1 雷达间空间重叠区

相邻雷达间的重叠区域受仰角和雷达高度差影响,当两部雷达高度接近时,相同仰角层的重叠区域在与两部雷达距离相等的中间并呈一条直线。当两部雷达的扫描仰角不同时,采样空间会向高仰角的雷达靠近(张林等,2018)。当两部雷达的扫描仰角相等而高度相差较大时,采样空间会向海拔较高的雷达靠近。

图 2 为相邻雷达的前 5 层仰角间的重叠区域的地面投影,重叠点距离两部雷达中心的距离比例阈值 r_{thre} 设置为 0.1,其中黑色重叠点距离两部雷达中心的距离比例阈值为 0.9。图 2a 中南昌站、上饶站雷达馈源海拔高度接近。图 2b 中两部雷达分别为九江站和景德镇站,九江站雷达馈源海拔高度比景德镇站高 1.26 km,不同仰角的重叠区投影偏向九江站。在重叠点距离两部雷达中心的距离比例阈值较低(0.1)的情况下,重叠区域为灰色和黑色点集合,重叠点的位置分布较广,且有距离其中一部雷达特别近的情况,而雷达信号可能受传输距离衰减、干扰等影响,从而影响雷达一致性结果的可靠性。

雷达间一致性评估算法的数据源有雷达基数据和拼图(CAPPI)数据。CAPPI 数据是由多层反射率插值得到在同一等高面的反射率,雷达重叠区域值选择在等距离线上,这样存在一定的局限性:第一,雷达距离越远、仰角越往上扫描间隙越大,高层等高面数据需要通过插值来补充,就会造成较大的等高面插值误差,导致 CAPPI 数据质量下降;第二,雷达站海拔差引起的偏差,从图 2b 可以看出重叠区受雷达高差影响不一定在等距离线上。

因此,采取的改进措施为:选择雷达基数据作为一致性评估算法的数据源,选择体扫前 5 层仰角间的重叠区域,将重叠点距离两部雷达中心的距离比例阈值设置为 0.9,以得到一个较合理的重叠区域。

2.2 地形遮挡影响

相邻雷达间匹配时,可能因为其中一部雷达在重叠点方向有着比较严重的地形遮挡,从而造成雷达探测回波强度偏弱,引起两部雷达在重叠点的回波差异较大,造成一致性评估结果的不准确,这种情况不是雷达本身的因素。

对于地形遮挡,柳云雷等(2020)利用 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) v4.1 数字高程数据对我国目前业务运行的新一代天气雷达波束遮挡情况进行模拟计算分析:对雷达探测范围进行

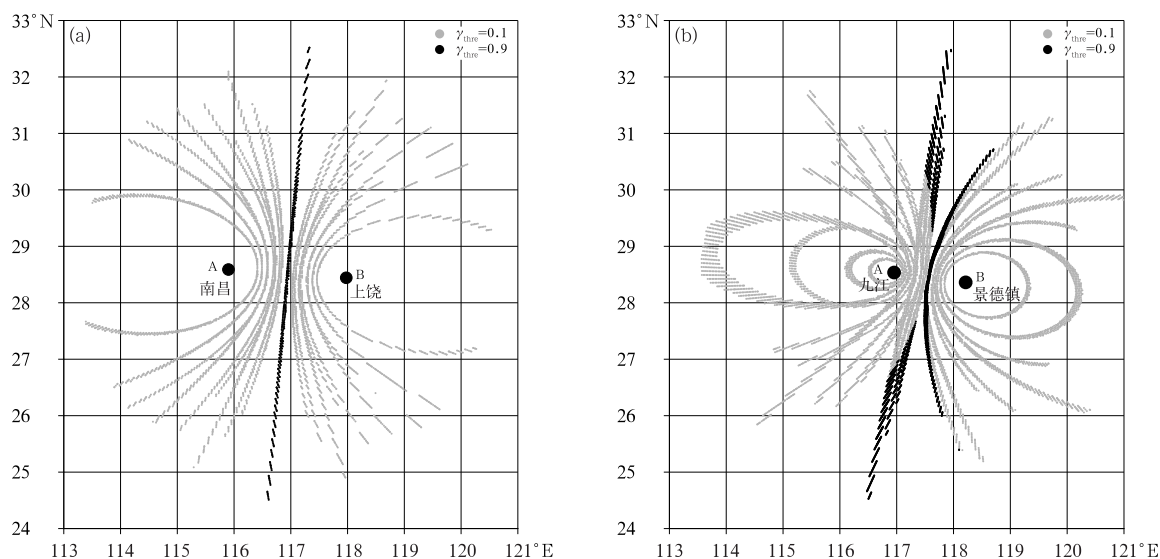


图 2 不同海拔差的相邻雷达的重叠区分布

(a)南昌-上饶,(b)九江-景德镇

Fig. 2 Overlapping area distribution of adjacent radars with different altitude differences

(a) Nanchang-Shangrao, (b) Jiujiang-Jingdezhen

采样,根据雷达站信息计算目标点经纬度与探测高度,对比该经纬度地形数据高度;基于雷达测高公式、波束展宽信息,计算该点某仰角时波束截面遮挡情况,得到各个台站雷达波束遮挡比例(以下简称遮

挡率)数据。如图3为宜春、岳阳站在前3层仰角的遮挡情况,岳阳站在宜春站西北方向,两部雷达遮挡程度随仰角增加而逐渐减小。使用2022年6月9—11日宜春、岳阳站雷达的 0.5° (图4a)、 1.5° (图4b)

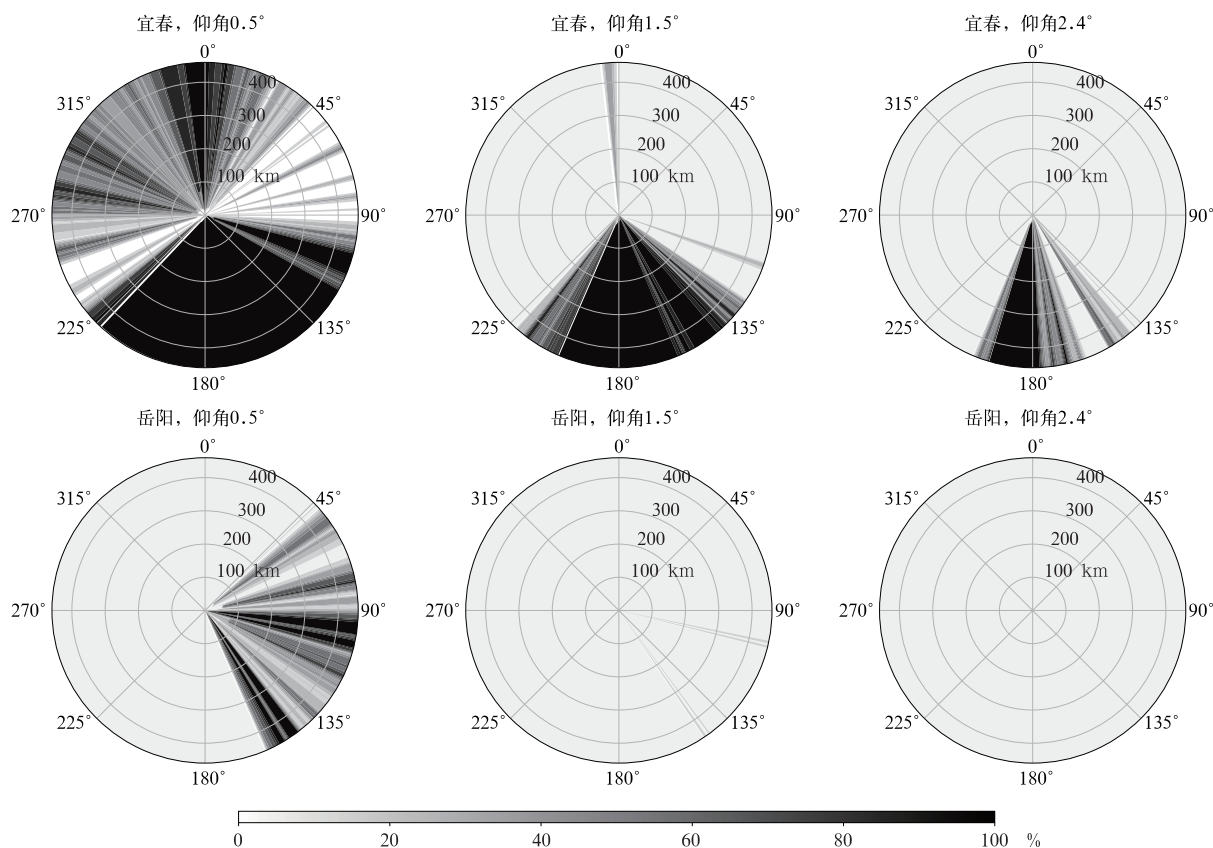


图3 宜春、岳阳雷达遮挡率分布

Fig. 3 Distribution of blockage percentages of Yichun Radar and Yueyang Radar

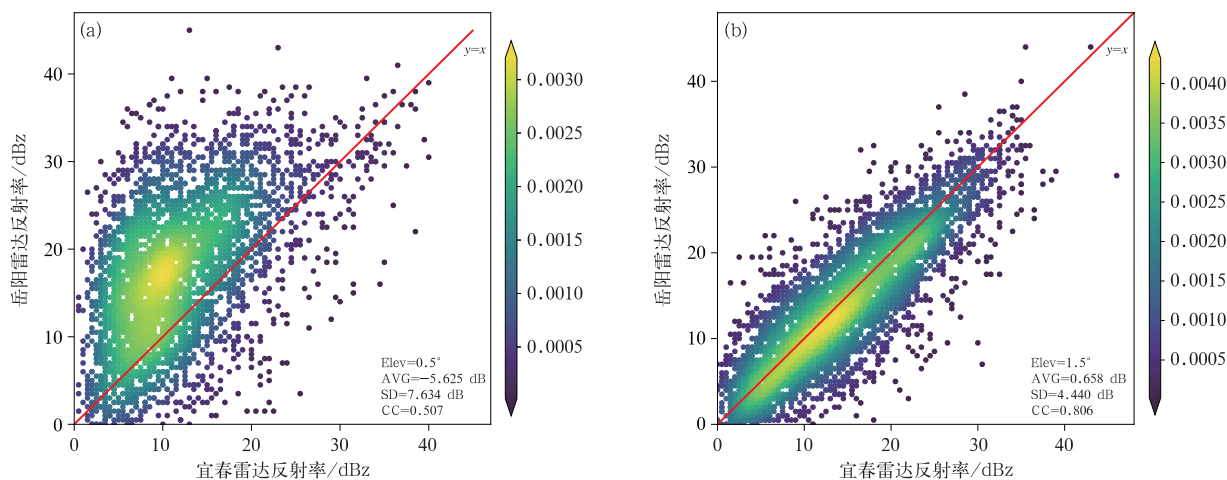


图4 2022年6月9—11日宜春、岳阳雷达在重叠点反射率密度

(a) 0.5° PPI层, (b) 1.5° PPI层

Fig. 4 Density of reflectivity overlapping plots between Yichun Radar and Yueyang Radar in (a) 0.5° PPI and (b) 1.5° PPI from 9 to 11 June 2022

PPI 资料做一致性评估,得到两部雷达在重叠点反射率的密度图,使用的是一致性评估的基本方法,设置垂直高度差(H_{thre})、距离比例(r_{thre})、时间差的阈值分别为 75 m、0.9、30 s,未做其他质量控制。可以看到在 0.5° ,因宜春站西北方向遮挡比岳阳站的东南方向严重,偏差均值为 -5.625 dB,宜春站在重叠点的反射率明显小于岳阳站;在 1.5° ,两部雷达的重叠区方向基本无遮挡,偏差均值为 0.658 dB,其反射率一致性较好,可见遮挡数据严重影响了雷达一致性评估结果。

大部分雷达都有一定程度的地形遮挡,针对遮挡影响,在计算相邻雷达一致性时,有两种改进方案。第一种为设置遮挡率阈值来剔除遮挡率较高的数据点,一般将遮挡率阈值设置为 $1\% \sim 10\%$ 。第二种为使用柳云雷等(2020)的方法对低层仰角径向的反射率进行订正;波束遮挡率低于 10% 不进行反射率订正; $11\% \sim 29\%$ 反射率订正 $+1$ dB; $30\% \sim 43\%$ 反射率订正 $+2$ dB; $44\% \sim 55\%$ 反射率订正 $+3$ dB; $56\% \sim 60\%$ 反射率订正 $+4$ dB,对于遮挡部分大于 60% 则将重叠点予以剔除。按照此方法计算宜春、岳阳站遮挡订正后的反射率,重新计算两部雷达 0.5° PPI 重叠点反射率的密度(图 5),偏差均值降至 -1.574 dB。遮挡订正对一致性评估结果有一定的改善,同时一致性算法也验证了遮挡订正的结果。可以根据需求来选择使用何种方法,本研

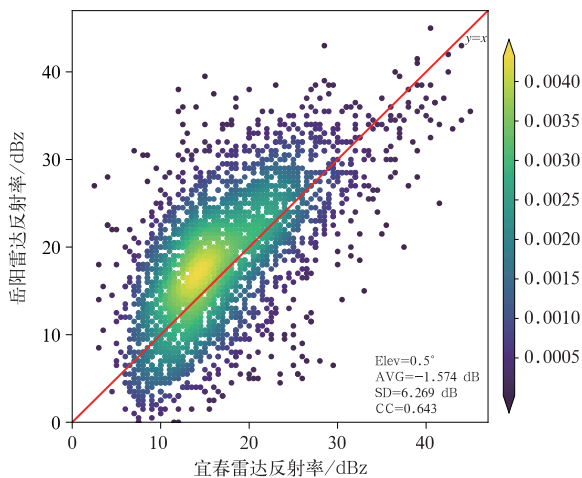


图 5 2022 年 6 月 9—11 日宜春、岳阳雷达在重叠点遮挡订正后 0.5° PPI 层反射率密度

Fig. 5 Density of reflectivity overlapping plots after beam occlusion correction between Yichun Radar and Yueyang Radar in 0.5° PPI from 9 to 11 June 2022

究为了能准确地评估一致性算法,选择第一种方法,将遮挡率阈值设置为 1% 来剔除存在地形遮挡的重叠点。

2.3 噪声、充塞不充分等异常回波影响

在雷达间一致性评估算法中需要考虑重叠点异常回波的影响,这些回波可能是由于噪声、目标物充塞不充分等原因造成的。

针对噪声影响,使用了筛选信噪比的方法进行改进,目前滤除信噪比小于一定阈值(这里取为 15 dB)的目标点,减少噪声对评估结果的影响。对于充塞程度的计算,目前考虑了水平充塞情况,一般回波边缘点的目标物充塞程度较低,使用雷达回波与周围点的反射率标准偏差(SD_{ref})来表示反射率水平充塞不完全的程度(图 6), SD_{ref} 值越大,水平充塞充分程度越低。去除大于一定阈值(这里设置为 12 dB)反射率标准偏差值可实现去除回波边缘的水平充塞不完全的目标重叠点。

雷达重叠点经过去遮挡、信噪比筛选、充塞程度筛选后,仍有可能存在未知因素的异常值(Gourley et al, 2003),在对雷达评估过程中发现部分台站评估结果的偏差会超过 8 dB,这类回波可能受雷达本身信号不稳定、超折射等其他未知因素影响,对评估结果影响较大,对于这类重叠点数据,改进措施为:第一步计算体扫时刻的一致性评估结果的偏差均值 AVG;第二步剔除偏差在 $\pm(AVG+8)$ dB 的重叠点,并重新计算评估结果。图 7 为 2022 年 6 月 9—11 日宜春、岳阳站雷达的 1.5° PPI(图 4b)资料经过信噪比筛选、充塞程度筛选、异常值质量控制后的一

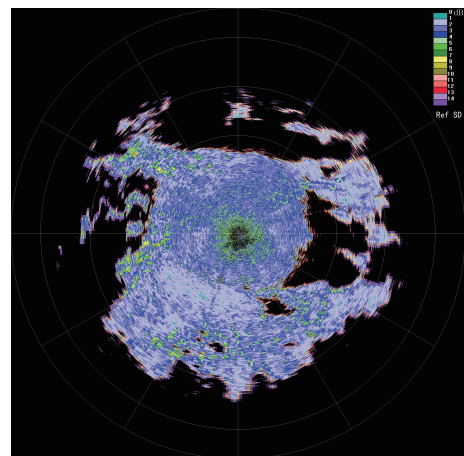


图 6 雷达回波水平充塞不完全程度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the beam incomplete filling degree of radar echo

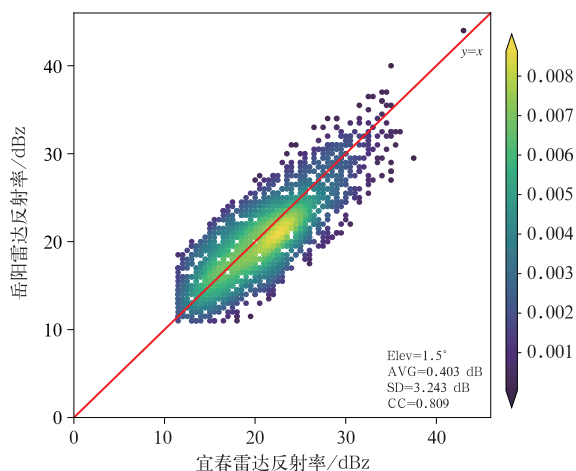


图7 2022年6月9—11日宜春、岳阳雷达在重叠点质量控制后1.5°PPI层反射率密度

Fig. 7 Density of reflectivity overlapping plots after quality control between Yichun Radar and Yueyang Radar in 1.5° PPI from 9 to 11 June 2022

致性评估结果,AVG降至0.403 dB,标准偏差(SD)降至3.243 dB,评估结果有所改善。

2.4 时间、空间重叠率影响

雷达间一致性评估结果受重叠区域目标空间的重叠程度和时间的重叠程度的影响(Vukovic et al, 2014),本文定义了时间重叠率 Ψ_t 和空间重叠率 Ψ_v 。

对于时间重叠率 Ψ_t ,在雷达数据匹配时,时间上选择相邻两部雷达体扫数据间隔一定时间内的数据,两部雷达的天线转动速度不一样,对同一个重叠目标区的观测的时间存在差异性,根据两部雷达基数据中存储的径向扫描时间 t_1 、 t_2 (单位:s)得出扫描时间差(Δt):

$$\Delta t = |t_1 - t_2| \quad (9)$$

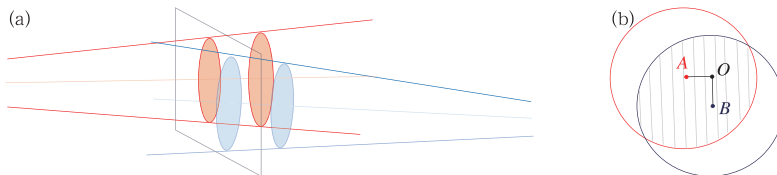


图8 (a)雷达波束重叠区示意图,(b)图8a中波束沿方框的剖面图

Fig. 8 (a) Schematic diagram of overlapping volume of adjacent radars, (b) beam cross-section along box in Fig. 8a

雷达回波会随着时间变化而改变,时间差较小的匹配点的回波强度一致性应优于时间差较大的匹配点。

时间重叠率应与大气环境条件中回波变化的快慢有关系。设计时间重叠率 Ψ_t 函数如下:

$$\Psi_t = e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad (10)$$

式中: T 为时间阈值,单位:s。水滴下落末速度为 $0 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其速度与雨滴大小相关,雨滴大小与雷达平均回波强度有一定的关系(张林等,2018)。 $\bar{Z}$ 为一段观测时间内的重叠区的平均回波强度(单位:dBZ),建立时间(T)与平均回波强度 $\bar{Z}$ 的关系,其计算方式如下:

$$T = \begin{cases} T_1 & \bar{Z} < 15 \text{ dBZ} \\ T_1 + \frac{(T_2 - T_1)(\bar{Z} - Z_1)}{(Z_2 - Z_1)} & 15 \text{ dBZ} \leq \bar{Z} < 40 \text{ dBZ} \\ T_2 & \bar{Z} \geq 40 \text{ dBZ} \end{cases} \quad (11)$$

其中设置经验阈值 $T_1=10 \text{ s}$, $T_2=3 \text{ s}$, $Z_1=15 \text{ dBZ}$, $Z_2=40 \text{ dBZ}$ 。将式(11)代入式(10),可求得时间重叠率 Ψ_t 。

同样地,对于重叠区的空间一致性,提出了空间重叠率 Ψ_v 。S波段新一代多普勒天气雷达中,在重叠区斜距 $L=100 \text{ km}$ 处的重叠区截面圆直径(波束展宽) $2r$ 约为 1.75 km ,约为有效照射深度(0.25 km)的7倍,所以选择两个雷达波束夹角较小的重叠区,其一致性较好。假设两个雷达波束平行相向,匹配空间与二者的距离相近,则重叠区为两部雷达的有效照射体积的重叠空间(图8a),其重叠率与共同照射体积 V_{12} 、两部雷达的照射体积 V_1 、 V_2 的表达式如下:

$$\Psi_v = \frac{V_{12}}{\sqrt{V_1 V_2}} \quad (12)$$

空间重叠率简化为横截面重叠率与斜距重叠率的乘积,其重叠波束的剖面如图 8b 所示, OA 为方位差引起的距离差, OB 为高度差, AB 为截面的中心距离,阴影部分为重叠面积。

$$\overline{OA} = L\Delta\alpha \quad (13)$$

$$\overline{OB} = \Delta H \quad (14)$$

式中: L 为斜距, $\Delta\alpha$ 为方位差,由于雷达波束宽度 θ 一致,重叠区距离,即截面圆半径 r 为:

$$r = L \frac{\theta}{2} \quad (15)$$

计算出重叠横截面重叠率 Ψ_s ,斜距的重叠率为 $\frac{B_w - \Delta L}{B_w}$, B_w 为波束有效照射深度,则空间重叠率 Ψ_v 表达式为:

$$\Psi_v = \Psi_s \frac{B_w - \Delta L}{B_w} \quad (16)$$

时间、空间的重叠率均接近 1 时,则认为两部雷达采样一致性较好。为了分析时间、空间重叠率,对 2022 年 5 月 26—30 日合肥、南京两部雷达的基

数据作一致性评估,添加了遮挡筛选、信噪比筛选、充塞程度筛选。此次过程中尺度带状回波为主。

计算时间重叠率对评估结果的影响时,为了避免其他条件对一致性评估的影响,筛选空间重叠率 ≥ 0.7 的重叠点,径向时间差阈值设为 100 s。表 1 为不同时间重叠率的评估指标结果,时间重叠率较高的重叠点的各项指标能准确反映雷达真实的一致性,不同的重叠率主要对标准偏差的影响较大,时间重叠率较高的样本标准偏差较低,时间重叠率在 0.4 以上其标准偏差降到 3 dB 以下,0.8 以上其标准偏差下降到 2.7 dB,偏差随时间重叠率的增加有所减小,且相关系数随时间重叠率的增加有所增加,一致性有所提升。

表 2 为不同空间重叠率的评估指标结果,筛选的时间重叠率阈值为 0.5,显示空间重叠率在 0.4~1.0 的评估指标,可以看出空间重叠率高的点其各项指标均有略微提高,标准偏差由 2.85 dB 降至 2.73 dB,相关系数由 0.656 提升至 0.687。

表 1 2022 年 5 月 26—30 日合肥-南京在不同时间重叠率的一致性评估指标

评估指标	0.1~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
AVG/dB	-0.31	-0.04	-0.18	-0.14
SD/dB	3.32	2.90	2.85	2.70
CC	0.618	0.686	0.775	0.696

表 2 2022 年 5 月 26—30 日合肥-南京在不同空间重叠率的一致性评估指标

评估指标	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
AVG/dB	-0.14	-0.11	-0.11
SD/dB	2.85	2.84	2.73
CC	0.656	0.652	0.687

时间、空间重叠率的计算和筛选过程提高了雷达重叠点的一致性程度,在算法改进措施中加入了时间、空间重叠率的筛选,可以提高雷达间一致性评估算法的准确性,使用时间重叠率阈值为 0.5,空间重叠率阈值为 0.6。

2.5 其他影响分析、改进

天气雷达间一致性评估受许多因素影响,除了上述几个影响因子外,还受到雷达本身伺服参数的

准确性、降水目标物类型分布、大气中电磁波折射率、衰减等影响。

降水目标物类型分布的影响是因为在雷达探测对流过程中,对流云由于移动速度和回波波形变化较快,对相邻雷达的一致性分析造成误差加大,应尽量选择稳定的层状云降水回波进行评估分析,可以通过一定的反射率阈值来对重叠点进行筛选。

电磁波在大气中受温度、压强、湿度等不连续引起的折射指数变化,其折射情况并非符合标准大气

折射,计算得到的重叠区域有时并不能代表实际情况,非标准大气折射的情况比较复杂,随着技术条件的不断进步,可以根据大气中具体的温湿压参数来计算大气空间的折射指数,校准重叠点。

在对X、C波段雷达做一致性评估时,需要注意的是X、C波段电磁波在穿过雨区时会受到较强的衰减影响,S波段雷达在特强降水时也需要考虑其衰减影响。虽然可以通过各种方法来订正反射率,然后再进行雷达间一致性评估,但最后得到的结果误差包含了雷达本身的系统偏差和衰减订正误差,不能直接用于雷达系统偏差分析,不过雷达间一致性评估算法可以用来检验衰减订正方法。

雷达间一致性评估算法的改进措施,除了以上叙述的外,还有:

(1)两部雷达中心距离应小于一定阈值,一般S波段雷达间为300 km,其他情况为200 km。

(2)重叠点的两部雷达的反射率大于15 dBz,且小于一定阈值(该阈值设置为35~40 dBz),保证重叠点是清洁的液态降水回波。

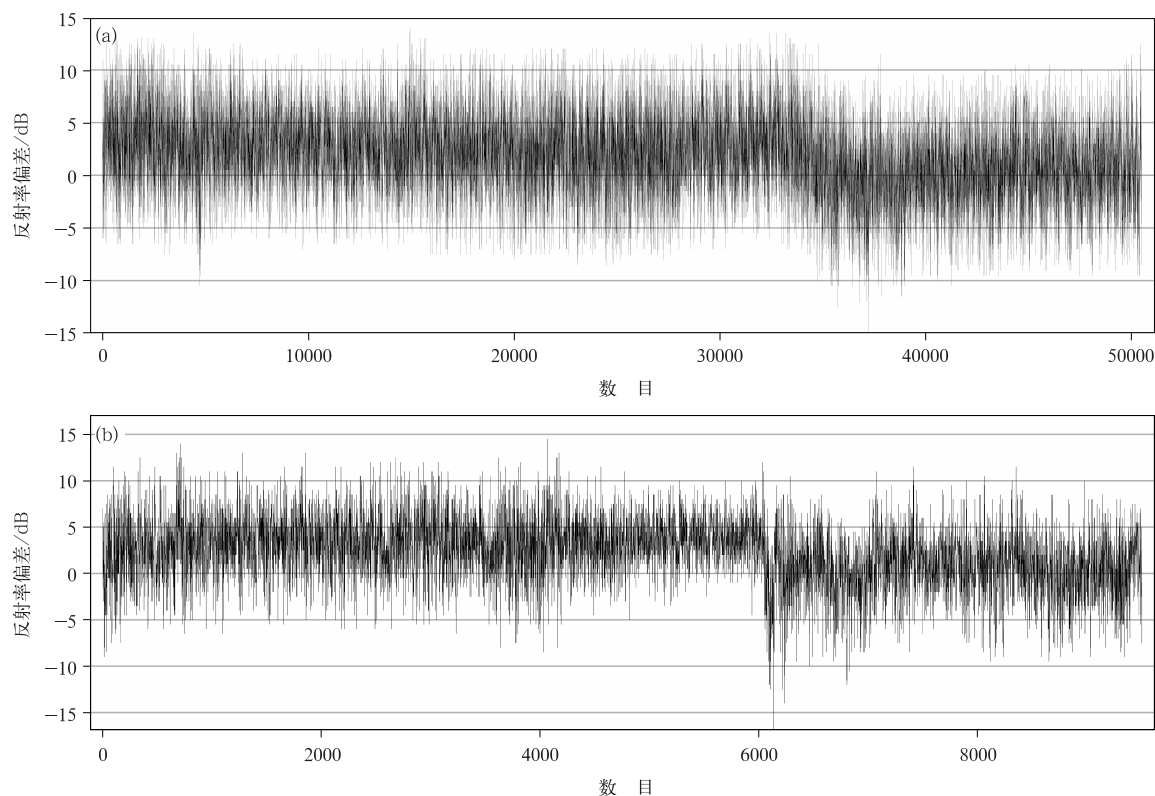
3 应用与分析

3.1 雷达系统偏差个例分析

岳阳站在2022年6月6日对雷达进行了一次维护改造,调整了雷达天线与收发支路损耗参数。针对岳阳站及其周边雷达站在2022年6月2—10日期间的雷达体扫数据,使用改进的一致性评估算法进行处理分析,采用的数据为质量控制前雷达基数据。下面给出岳阳站与周边雷达站点的回波一致性关系结果。

图9是维护改造前后的岳阳站与周边站湘潭雷达和常德雷达的反射率偏差时序图,该图使用的反射率筛选阈值为15~35 dBz,横坐标是按照时间顺序排列的两相关雷达匹配点数,岳阳站雷达与周边两部雷达的偏差值均出现了突然降低、又回到正常水平的情况,其时间在岳阳站雷达维护改造时段。

图10a,10c为岳阳站升级改造前的雷达偏差值



注:横坐标是按照时间顺序排列的两相关雷达匹配点数。

图9 2022年6月2—10日岳阳站与(a)湘潭站,(b)常德站降水期间反射率偏差时序图

Fig. 9 Time series of reflectivity difference between Yueyang Radar and (a) Xiangtan Radar, (b) Changde Radar for precipitation period from 2 to 10 June 2022

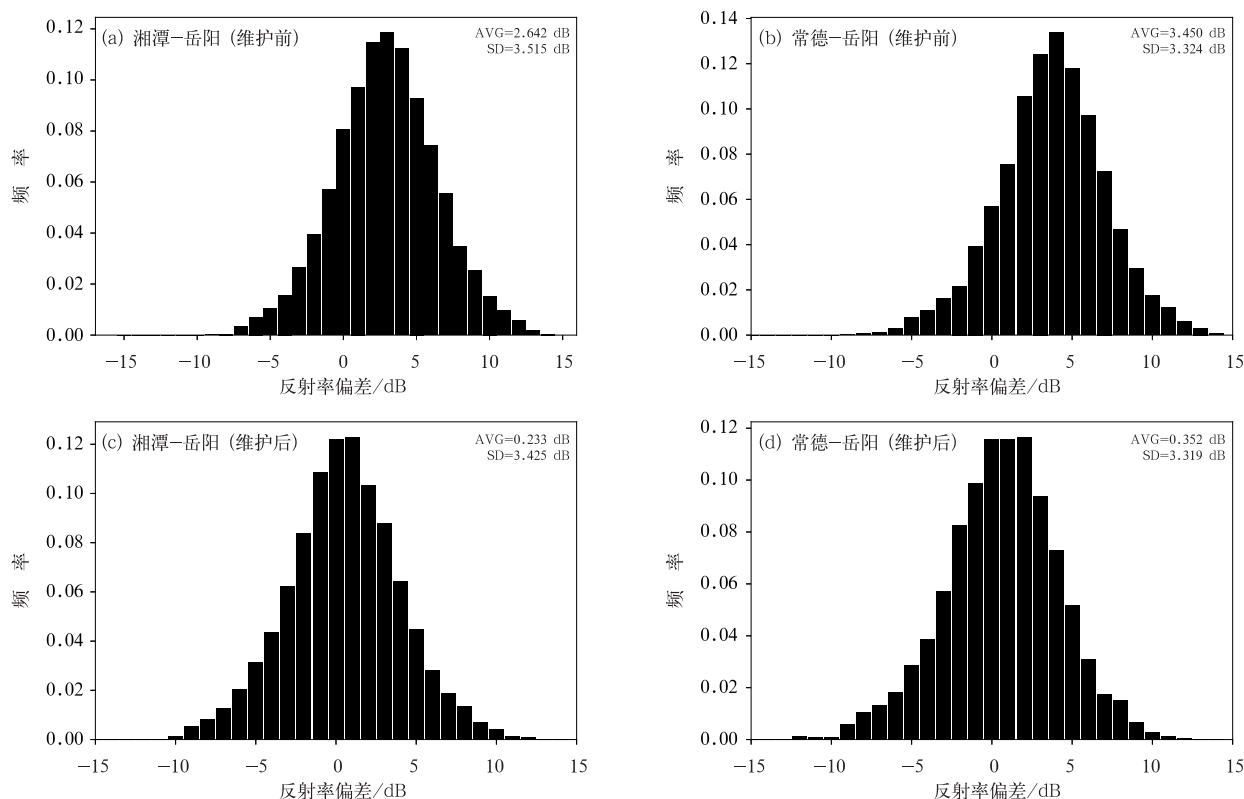


图 10 岳阳站 2022 年 6 月 2—6 日维护前和 6—10 日维护后与(a,c)湘潭站, (b,d)常德站的反射率偏差的频率分布直方图

Fig. 10 Frequency histogram of reflectivity difference between Yueyang Radar and (a, c) Xiangtan Radar, (b, d) Changde Radar before maintenance (from 2 to 6 June), and after maintenance (from 6 to 10 June) in 2022

频率分布直方图,图 10b,10d 为维护改造后的雷达偏差值频率分布直方图,可以看出反射率偏差密度分布均呈正态分布。在雷达维护改造前,岳阳站与湘潭和常德雷达的偏差均值均较大,偏差均值分别为 2.642 dB 和 3.450 dB,而雷达维护改造后,岳阳站与湘潭和常德雷达的偏差均值回到正常水平(分别为 0.233 dB 和 0.352 dB)。维护改造后,岳阳站与湘潭和常德雷达的标准偏差值也有所减小,分别从 3.515 dB、3.324 dB 减小至 3.425 dB、3.319 dB。

此次个例中,在岳阳站维护前后,岳阳站与周边湘潭站、常德站雷达的一致性偏差值有明显的降低,并回到正常水平,标准偏差值也略有降低,通过偏差序列曲线偏离零刻度线的情况来检测雷达的偏差情况,通过与周边多个雷达的情况做对比,可以很好地判断出哪部雷达出现了问题。

3.2 区域雷达回波一致性分析

算法对 2022 年 8 月 11 日至 10 月 9 日安徽、江

苏 16 部 S 波段新一代多普勒天气雷达的一致性做了评估。图 11 为雷达间的反射率偏差均值图(为了美观,省略了部分距离较远的雷达间的偏差均值比较),箭头的方向由探测回波低值的雷达指向探测高值的雷达,可以比较清晰地看出各个站与周边站反射率强弱,如合肥、宿迁在探测反射率值的低值,黄山、连云港在探测反射率值的高值,各站点间偏差均值大部分在 2 dB 以内,偏差均值较为合理。

雷达间偏差均值所组成的矢量三角形闭合度(图 11 红色数据)可以反映相邻雷达一致性评估算法的准确性,可以看到绝大部分的三角形框的闭合都较好(红色数据较低),说明本算法评估相邻雷达一致性反射率偏差的准确性比较好。

图 12 为 16 部雷达间的一致性回波偏差的标准偏差和相关系数,标准偏差分布在 2.9~3.3 dB,相关系数在 0.40~0.55。

通过使用偏差均值、标准偏差、相关系数指标对安徽、江苏 16 部 S 波段新一代多普勒天气雷达的一

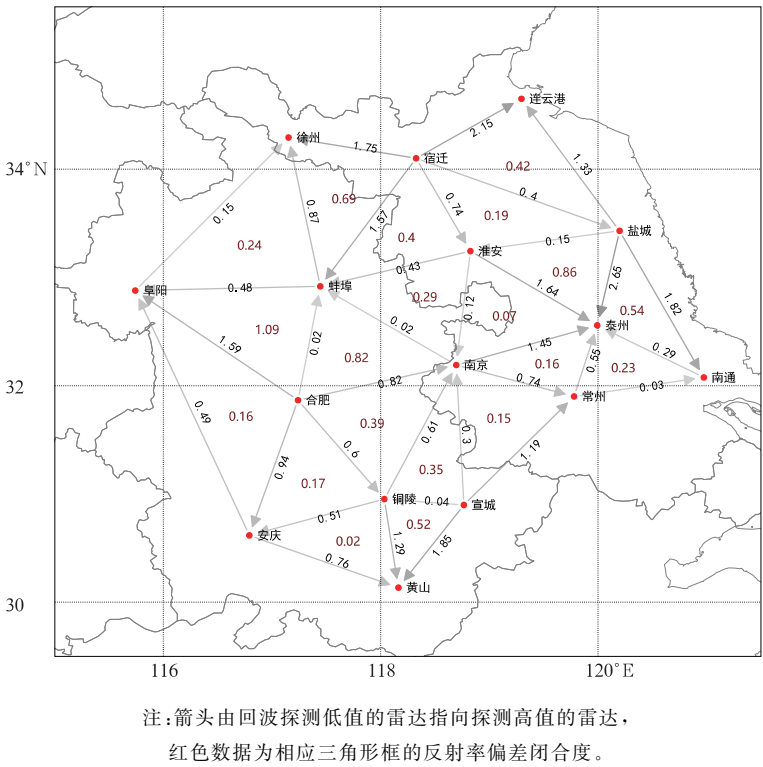


图 11 2022 年 8 月 11 日至 10 月 9 日安徽、江苏 S 波段新一代多普勒天气雷达的反射率偏差均值
Fig. 11 Average reflectivity difference of the Anhui and Jiangsu radars from 11 August to 9 October 2022

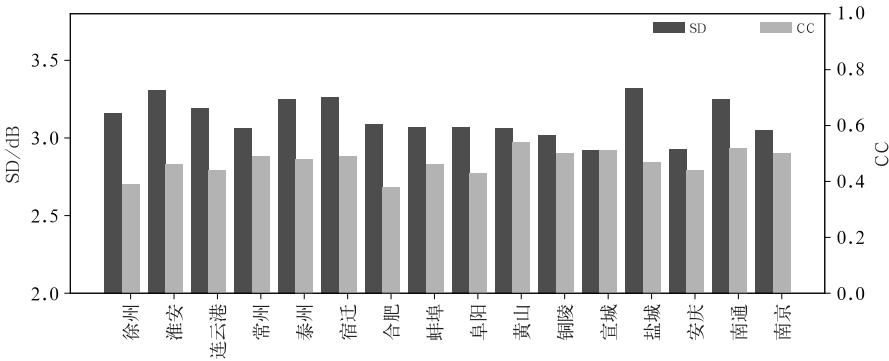


图 12 2022 年 8 月 11 日至 10 月 9 日安徽、江苏 S 波段新一代多普勒天气雷达的一致性评估标准偏差、相关系数
Fig. 12 Standard deviation and correlation coefficient of reflectivity differences of the Anhui and Jiangsu radars from 11 August to 9 October 2022

致性评估,期间各雷达间回波一致性较好。

4 结论与讨论

(1)本文在雷达间一致性评估的基本方法的基础上,从雷达数据源、空间重叠区、地形遮挡、时空重叠率等方面分析了其对一致性评估结果的影响,通

过详细的空间、时间重叠率阈值分析、遮挡剔除、异常值剔除、边缘充塞不完全回波剔除、低信噪比剔除等途径改进了该方法,提高了评估质量。使用改进的方法对一次雷达系统偏差的个例和苏皖地区雷达回波一致性作了评估,取得了较好的应用效果。

(2)相邻雷达的重叠区域不一定在两部雷达的中线位置,会随两部雷达的仰角和天线高度差发生

变化。本算法直接使用雷达基数据,结合了雷达天线高度,计算了重叠区域的坐标形状,一般重叠区域坐标是固定不变的。通过加入多种阈值控制来筛选符合重叠条件的重叠点,严格的阈值筛选可以更客观地反应雷达本身的系统偏差状况,提高样本的一致性评估指标结果质量。

(3)评估指标偏差均值能较好地反映雷达回波的标定情况,偏差的标准偏差、相关系数能反映雷达在一段时间内的运行稳定情况。通过偏差均值、标准偏差指标能较好地评估相邻雷达间的一致性,长时间的偏离零刻度的偏差以及较大的标准偏差可以表明雷达反射率数据上的不准确,这具有很好的指示意义。

(4)S波段新一代多普勒天气雷达间的一致性指标均较好。而X、C波段雷达相对于S波段雷达存在比较明显的衰减,在S波段天气雷达与C波段天气雷达的评估中也发现C波段雷达探测反射率值弱于S波段雷达,需要结合衰减订正来做进一步的研究。

参考文献

- 陈锋,董美莹,苏涛,等,2020. 雷达资料同化对一次浙江初春罕见飑线过程数值模拟的影响分析[J]. 气象,46(4):462-477. Chen F, Dong M Y, Su T, et al, 2020. Influence of radar data assimilation on the numerical simulation of a rare squall line in Zhejiang Province in early spring[J]. Meteor Mon, 46(4):462-477 (in Chinese).
- 陈静,铃伟妙,韩军彩,等,2015. 基于动态Z-I关系雷达回波定量估测降水方法研究[J]. 气象,41(3):296-303. Chen J, Qian W M, Han J C, et al, 2015. An approach for radar quantitative precipitation estimate based on Z-I relations varying with time and space[J]. Meteor Mon, 41(3):296-303(in Chinese).
- 韩雷,王洪庆,谭晓光,等,2007. 基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警的研究进展[J]. 气象,33(1):3-10. Han L, Wang H Q, Tan X G, et al, 2007. Review on development of radar-based storm identification, tracking and forecasting[J]. Meteor Mon, 33(1):3-10(in Chinese).
- 何会中,程明虎,周康军,等,2002. TRMM/PR与香港雷达资料对比分析[J]. 气象,28(10):32-36. He H Z, Cheng M H, Zhou K J, et al, 2002. Comparison of data and product obtained by TRMM/PR and Hong Kong Radar[J]. Meteor Mon, 28(10):32-36(in Chinese).
- 李腹广,王芬,2007. 用天气雷达回波强度资料估测降水[J]. 气象科技,35(2):286-288. Li F G, Wang F, 2007. Estimate of rainfall using weather radar echo data[J]. Meteor Sci Technol, 35(2):286-288(in Chinese).
- 柳云雷,李昌兴,张乐坚,等,2020. 基于高分辨率高程数据统计分析新一代天气雷达组网的地形遮挡影响[J]. 气象学报,78(4):705-720. Liu Y L, Li C X, Zhang L J, et al, 2020. Statistical analysis of terrain blockage impacts on the CINRAD network based on DEM data[J]. Acta Meteor Sin, 78(4):705-720(in Chinese).
- 罗布坚参,翟盘茂,假拉,等,2015. 西藏高原测站降水与TRMM估测降水一致性评估[J]. 气象,41(9):1119-1125. Luo B J C, Zhai P M, Jia L, et al, 2015. Consistency evaluation for observation and TRMM precipitation estimation in Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 41(9):1119-1125(in Chinese).
- 潘新民,柴秀梅,崔柄俭,等,2010. CINRAD/SB雷达回波强度定标调校方法[J]. 应用气象学报,21(6):739-746. Pan X M, Chai X M, Cui B J, et al, 2010. The method of CINRAD/SB radar echo intensity calibration and adjustment[J]. J Appl Meteor Sci, 21(6):739-746(in Chinese).
- 唐菁,陈生,李峙,等,2023. 基于雷达观测的华南夏季降水类型日变化的时空分布特征[J]. 气象,49(3):279-290. Tang J, Chen S, Li Z, et al, 2023. Spatio-temporal distribution characteristics of diurnal variation of summer rainfall in South China based on radar observation[J]. Meteor Mon, 49(3):279-290(in Chinese).
- 王振会,李圣殷,戴建华,等,2015. 星载雷达与地基雷达数据的个例对比分析[J]. 高原气象,34(3):804-814. Wang Z H, Li S Y, Dai J H, et al, 2015. Comparative case study on the observations between the space-borne radar and ground-based radar[J]. Plateau Meteor, 34(3):804-814(in Chinese).
- 吴翀,刘黎平,张志强,2014. S波段相控阵天气雷达与新一代多普勒天气雷达定量对比方法及其初步应用[J]. 气象学报,72(2):390-401. Wu C, Liu L P, Zhang Z Q, 2014. Quantitative comparison algorithm between the S-band phased array radar and the CINRAD/SA and its preliminary application[J]. Acta Meteor Sin, 72(2):390-401(in Chinese).
- 伍静,刘黎平,尤卫红,等,2010. 应用雷达拼图数据估测降水试验[J]. 气象科技,38(2):175-181. Wu J, Liu L P, You W H, et al, 2010. Application experiment on quantitative rainfall estimation with radar mosaic data[J]. Meteor Sci Technol, 38(2):175-181(in Chinese).
- 肖柳斯,胡东明,陈生,等,2021. X波段双偏振相控阵雷达的衰减订正算法研究[J]. 气象,47(6):703-716. Xiao L S, Hu D M, Chen S, et al, 2021. Study on attenuation correction algorithm of X-band dual-polarization phased array radar[J]. Meteor Mon, 47(6):703-716(in Chinese).
- 肖艳姣,刘黎平,2006. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报,64(5):647-657. Xiao Y J, Liu L P, 2006. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics[J]. Acta Meteor Sin, 64(5):647-657(in Chinese).
- 叶飞,梁海河,文浩,等,2020a. 基于单站CAPPI格点数据的相邻天气雷达均一性评估系统研究[J]. 气象,46(1):50-62. Ye F, Liang H H, Wen H, et al, 2020a. Research on homogeneity evaluation system of neighboring weather radars based on single-station CAPPI grid data[J]. Meteor Mon, 46(1):50-62(in Chinese).

- 叶飞,梁海河,文浩,等,2020b. 新一代天气雷达均一性评估[J]. 气象科技,48(3):322-330. Ye F, Liang H H, Wen H, et al, 2020b. Evaluation of homogeneity of new generation weather radar[J]. Meteor Sci Technol, 48(3):322-330(in Chinese).
- 张林,杨洪平,裴翀,等,2018. 相邻雷达回波差异检测方法研究与应用[J]. 气象,44(2):268-276. Zhang L, Yang H P, Pei C, et al, 2018. Analysis and application of the test method of reflectivity difference between adjacent radars[J]. Meteor Mon, 44(2):268-276(in Chinese).
- 张凌,吕达仁,段树,等,2003. 降雨空间不均匀性与雷达测雨空间平滑误差[J]. 遥感技术与应用,18(6):364-373. Zhang L, Lü D R, Duan S, et al, 2003. Rain spatial nonuniformity and spatial smoothing error of radar rainfall measurement[J]. Remote Sens Technol Appl, 18(6):364-373(in Chinese).
- 张沛源,周海光,梁海河,等,2001. 数字化天气雷达定标中应注意的一些问题[J]. 气象,27(6):27-32. Zhang P Y, Zhou H G, Liang H H, et al, 2001. Some problems of the calibrations of digit weather radars[J]. Meteor Mon, 27(6):27-32(in Chinese).
- 张鹏,刘西川,周则明,等,2021. 基于实测雨滴谱数据的微波链路和天气雷达降水估计关系研究[J]. 气象,47(7):843-853. Zhang P, Liu X C, Zhou Z M, et al, 2021. Research on precipitation estimators of microwave link and weather radar based on raindrop size distribution data[J]. Meteor Mon, 47(7):843-853(in Chinese).
- 张志强,刘黎平,2011. S波段相控阵天气雷达与新一代天气雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析[J]. 气象学报,69(4):729-735. Zhang Z Q, Liu L P, 2011. A simulation and analysis of the observation errors of cloud intensity and structure with the S-band phased array radar and the CINRAD/SA[J]. Acta Meteor Sin, 69(4):729-735(in Chinese).
- 张志强,刘黎平,王红艳,等,2008. 华北区域四部雷达探测强度与定位一致性分析[J]. 气象,34(9):22-27. Zhang Z Q, Liu L P, Wang H Y, et al, 2008. Analysis on the consistency of intensity and positioning in four radars of North China[J]. Meteor Mon, 34(9):22-27(in Chinese).
- 郑媛媛,谢亦峰,吴林林,等,2004. 多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验[J]. 热带气象学报,20(2):192-197. Zheng Y Y, Xie Y F, Wu L L, et al, 2004. Comparative experiment with several quantitative precipitation estimator techniques based on doppler radar over the Huaihe Valley during rainy season[J]. J Trop Meteor, 20(2):192-197(in Chinese).
- Bringi V N, Keenan T D, Chandrasekar V, 2001. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: a selfconsistent method with constraints[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 39(9):1906-1915.
- Chandrasekar V, Keraenen R, Lim S, et al, 2013. Recent advances in classification of observations from dual polarization weather radars[J]. Atmos Res, 119:97-111.
- Gourley J, Kaney B, Maddox R A, 2003. Evaluating the calibrations of radars: a software approach[C] // Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorology. Seattle: American Meteorological Society:459-462.
- Park S, Jung S H, Lee G, 2015. Cross validation of TRMM PR reflectivity profiles using 3D reflectivity composite from the ground-based radar network over the Korean Peninsula[J]. J Hydrometeorol, 16(2):668-687.
- Park S G, Maki M, Iwanami K, et al, 2005. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part II: evaluation and application[J]. J Atmos Oceanic Technol, 22(11):1633-1655.
- Snyder J C, Bluestein H B, Zhang G, et al, 2010. Attenuation correction and hydrometeor classification of high-resolution, X-band, dual-polarized mobile radar measurements in severe convective storms[J]. J Atmos Oceanic Technol, 27(12):1979-2001.
- Vukovic Z R, Young J M C, Donaldson N, 2014. Inter-radar comparison accounting for partially overlapping volumes[C] // Proceedings of the 8st European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Garmisch-Partenkirchen: ERAD.
- Wang J X, Wolff D B, 2009. Comparisons of reflectivities from the TRMM precipitation radar and ground-based radars[J]. J Atmos Oceanic Technol, 26(5):857-875.

(本文责编:俞卫平)