

S/C 波段雷达和 X 波段雷达混合仰角反射率拼图方法*

朱自伟^{1,2,3} 戚友存^{1,2} 张哲⁴ 刘瑞芳⁵ 乔娟⁵ 张春生⁴ 罗鸣⁴

1.中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京, 100101

2.中国科学院大学, 北京, 100049

3.福建省灾害天气重点实验室, 福州, 350007

4.深圳市国家气候观象台, 深圳, 518040

5.西安市气象局, 西安, 710016

摘要 气候变化使得灾害性天气事件发生频率增加, 这对灾害性天气监测提出了更高的要求。近年来, 我国许多城市组建了 X 波段天气雷达监测网作为对传统的 S 波段和 C 波段业务天气雷达监测网的补充, 以提高灾害性天气监测的时空分辨率, 同时改善对天气系统低层信息的观测。混合仰角反射率是从天气雷达覆盖范围内的多仰角反射率观测信息中, 提取出的离地面最近且未受地形或地物遮挡影响的反射率, 对于监测对流系统低层的发生、发展具有重要的价值。为了充分发挥 S/C 波段雷达探测范围广与 X 波段雷达观测时空分辨率高的优势, 提出了 S/C 波段雷达和 X 波段雷达混合仰角反射率拼图方法, 步骤包括: (1) 混合仰角反射率形成; (2) 不同波段雷达反射率转换; (3) 多雷达反射率拼图。基于上述方法, 产生了深圳市和西安市混合仰角反射率拼图产品, 空间分辨率为 30 m, 时间分辨率为 1 min。利用全球降水观测计划(Global Precipitation Measurement, GPM) 双频测雨雷达(Dual-frequency Precipitation Radar, DPR) 观测的反射率, 通过不同降水类型的个例对拼图产品进行了评估。结果表明, 混合仰角反射率拼图产品与 GPM-DPR 的反射率观测数据具有较高的一致性, 平均偏差在 ± 1 dB 以内。

关键词 X 波段天气雷达 混合仰角反射率 雷达组网拼图

文章编号 1006-9895.2306.23055

中图法分类号 P412.25

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2306.23055

Mosaicking hybrid-tilt radar reflectivities from S- or C-band weather radars and X-band weather radars

ZHU Ziwei^{1,2} QI Youcun^{1,2} ZHANG Zhe³ LIU Ruifang⁴ QIAO Juan⁴ ZHANG Chunsheng³

LUO Ming³

*收稿日期 2023-04-08 网络预出版日期

作者简介 朱自伟, 男, 博士, 主要从事雷达定量降水估测研究。E-mail: zhuziwei_hhu@126.com

通讯作者 戚友存, E-mail: youcun.qi@igsrr.ac.cn

资助项目 国家重点研发项目(2022YFC3002904, 2022YFC3004101)、海南省重点研发项目(ZDYF2023SHFZ125)、安阳市重大科技专项(2022A02SF005)、陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划(2023-JC-YB-282)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-132)和福建省灾害天气重点实验室开放课题(2021KFKT01)。

Funded by National Key R&D Program of China (Grant 2022YFC3002904, Grant 2022YFC3004101), Key R&D Program of Hainan (Grant ZDYF2023SHFZ125), Major Scientific and Technological Special Project of Anyang (Grant 2022A02SF005), Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (Grant 2023-JC-YB-282), Review and Summary Special Project of China Meteorological Administration (Grant FPZJ2023-132), Fujian Key Laboratory of Severe Weather (2021KFKT01).

1. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
3. *Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou, 350007, China*
4. *Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, China*
5. *Xi'an Meteorological Bureau, Xi'an 710016, China*

Abstract The changing climate has increased the frequency of hazardous weather events, which has placed higher demands on monitoring hazardous weather. In addition to the conventional S-band and C-band operational radar networks, in recent years, many cities in China have built X-band weather radar monitoring networks to improve the spatiotemporal resolution of hazardous weather monitoring and the low-level observation information of weather systems. The hybrid-tilt reflectivity is extracted from the multi-tilt radar measurements over the radar domain, which is closest to the surface and unaffected by blockage due to terrain or surface features. It is important for monitoring the occurrence and development of convective systems. In order to take advantages of the wide detection range of S-band or C-band weather radars and the high spatiotemporal resolution of X-band weather radars, this study presents a method of mosaicking hybrid-tilt radar reflectivities derived from the measurements of S-band or C-band and X-band weather radars. This method includes 1) generation of hybrid-tilt reflectivity, 2) conversion of radar reflectivity in different frequencies, and 3) mosaicking of reflectivity measurements from multiple radars. Based on this method, the hybrid-tilt reflectivity mosaic products of Shenzhen and Xi'an are generated, with the spatial resolution of 30 m and the temporal resolution of 1 min. During the events of different precipitation types, the hybrid-tilt reflectivity mosaic products are evaluated using the reflectivity measurements from the Dual-frequency Precipitation Radar onboard the Global Precipitation Measurement Core Observatory (GPM-DPR). The result shows that the hybrid-tilt reflectivity mosaic products are highly consistent with the GPM-DPR reflectivity measurements, and the mean errors are within ± 1 dB.

Key words X-band Weather Radar, Hybrid-tilt Radar Reflectivity, Radar Mosaicking

1 引言

在气候变化的背景下, 极端降水发生的频率和严重程度增加, 由此引发的洪水灾害日益加剧 (Imhoff et al., 2020), 这对灾害性天气系统监测提出了更高的要求。我国建设的新一代多普勒天气雷达监测网 (China New generation RADar, CINRAD) 目前由总数超过 200 部的 S 波段和 C 波段天气雷达构成, 有效探测范围覆盖我国绝大部分地区, 可提供较高时空分辨率的降水观测信息, 对灾害性天气监测和临近预报发挥了重要作用 (段文广等, 2009; 俞小鼎等, 2012, 2020; 郑永光等, 2015)。然而, CINRAD 天气雷达平均站点间距超过 200 公里, 当探测距离较远时空间分辨率低,

且对天气系统低层监测不足。同时,由于扫描速度慢且仰角数较少(约6分钟完成9个仰角的体扫),难以完全满足城市对于灾害性天气过程快速识别、天气系统结构特征精细化监测以及精准预报预警的实际需求。

许多国家的业务天气雷达监测网由 S/C 波段雷达组成 (Tabary, 2007; Zhang et al., 2016), 因此也存在类似不足。通过布设 X 波段雷达, 可以很好地补充 S/C 波段天气雷达网的观测。例如, 美国国家科学基金会大气协作自适应感应工程研究中心 (Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere, CASA) 提出了通过建设高密度的 X 波段雷达来补充甚至取代美国 S 波段 WSR-88D (Weather Surveillance Radar-1988 Doppler) 天气雷达监测网的设想 (McLaughlin et al., 2009)。X 波段雷达相比传统的长波段 (S/C 波段) 天气雷达具有径向分辨率高、扫描速度快、维护成本低等优势。随着相控阵技术的发展, 相同体扫时间内仰角数目大大增加, 使其对天气系统垂直结构的观测更加完整和精细, 可实现对强对流风暴快速演变过程的监测 (Kollias et al., 2022)。此外, 相控阵雷达可以灵活调整扫描模式, 对不同的应用场景下具有很高的适应性 (Palmer et al., 2022)。结合电磁波双偏振探测能力, 可以进一步提供降水的微物理信息, 改善单偏振雷达在质量控制、降水类型划分、相态识别、定量降水估计等方面的不足 (Kumjian., 2013; Zhao et al., 2019)。利用 X 波段雷达网进行天气系统监测已在不同国家和地区得到测试及应用。CASA 提出的分布式协同自适应传感 (Distributed Collaborative Adaptive Sensing, DCAS) 模式首先在美国俄克拉荷马地区进行实验, 投入 4 部 X 波段双偏振雷达, 产生高时空分辨率、高精度的降水产品以服务山洪和城市洪水的预测 (McLaughlin et al., 2009; Chandrasekar et al., 2012)。意大利在托斯卡纳地区 (意大利中部) 建设了 3 部 X 波段天气雷达用于强降水的观测和临近预报, 服务该地区水文-地质灾害风险管理 (Antonini et al., 2014)。依托高分辨率天气雷达降水和衰减估计 (Precipitation and Attenuation Estimates from a High-Resolution Weather Radar Network, PATTERN) 项目, 德国在北部地区建设了 4 部 X 波段天气雷达来服务城市洪水预报 (Lengfeld et al., 2014)。法国在阿尔卑斯山区布设了 4 部 X 波段雷达, 大大提高了对复杂地形区的气象监测能力 (Faure et al., 2017)。

近年来, X 波段雷达在国内得到了快速推广和应用, 很多城市正在组建或已经组建了 X 波段雷达监测网。例如, 深圳市和西安市分别建设了由 2 部和 5 部 X 波段雷达组成的观测网。X 波段雷达相关的研究也取得了一定的进展, 如观测量的评估分析 (张蔚然等, 2021; 张羽等, 2022), 衰减订正方法研究 (肖柳斯等, 2021), 以及对典型强对流个例的分析 (于明慧等, 2019; 潘佳文等, 2022)。这些工作使得我们对 X 波段雷达的实际观测质量及其对强对流的监测能力有了较为深入的认识。充分利用 X 波段雷达以及 CINRAD 天气雷达观测信息, 将更好地提供灾害性天气监测服务。CINRAD 天气雷达时间分辨率为 6 min, 径向分辨率为 250~1000 m, 探测范围大多在 400 km 左右。国内目前布设的 X 波段雷达时间分辨率为 1~3 min, 径向分辨率为 30~75 m, 探测范围为 40~75 km。为了结合 CINRAD 天气雷达探测范围广和 X 波段雷达时空分辨率高的特点, 实现雷达观测信息优势互补, 可将 CINRAD 雷达与 X 波段雷达产品进行拼图融合, 这样不仅可以在较大的范围内获得 CINRAD 雷达提供的降水系统整体观测信息, 在重点关注区通过 X 波段雷达的覆盖可以获取精细

化降水特征。需要注意的是，由于雷达电磁波频率不同，CINRAD 雷达与 X 波段雷达观测相同降水时的反射率存在差异，这在进行多波段雷达反射率组网融合时必须加以考虑。目前前人研究中提出的多波段雷达组网融合方法主要针对降水率进行拼图组网 (Barbieri et al., 2022; 张哲等, 2023)，从而规避了由于电磁波频率不同造成的反射率观测信息不一致的问题。然而，除了降水率产品之外，反射率产品，尤其是混合仰角反射率产品对于实际业务应用十分重要。混合仰角反射率是从天气雷达覆盖范围内每一个格点上的多仰角反射率观测信息中，提取出的离地面最近且不受地形或地物遮挡影响的反射率。这样的反射率信息对于监测对流降水系统低层发生和发展情况、准确把握对流降水系统强度和降水落区极其重要，对于灾害预警信息的发布可提供重要参考。

针对多波段雷达组网融合的实际需求，本文基于深圳市、西安市 CINRAD 业务雷达以及近年来布设的 X 波段雷达，提出多波段雷达混合仰角反射率拼图融合方法。文章从单雷达混合仰角反射率的产生、不同波段雷达反射率的转换、多雷达反射率拼图 3 个方面进行方法的介绍，最后通过 GPM-DPR 的反射率观测信息对混合仰角反射率拼图产品性能进行分析。

2 数据和方法

2.1 数据

本文使用的雷达反射率观测数据来自深圳市 1 部 S 波段双偏振天气雷达 (Z9755)、2 部 X 波段双偏振相控阵天气雷达 (ZSE01、ZSE02) 以及西安市 1 部 C 波段天气雷达 (Z9290)、3 部 X 波段双偏振相控阵天气雷达 (ZXA01、ZXA02、ZXA03)。X 波段雷达反射率通过自适应方法进行衰减订正处理 (肖柳斯等, 2021)，该功能已在雷达内置的处理软件中实现。因此，本文使用的 X 波段双偏振相控阵雷达反射率为经衰减订正后的反射率。为行文简洁，使用“大雷达”指代 Z9755 和 Z9290 两部雷达，使用“小雷达”指代 X 波段雷达。各雷达的主要观测参数如表 1 所示；组网拼图区域的地形及雷达的空间分布如图 1 所示。

表 1 天气雷达主要观测参数

Table 1 Principal observation parameters of the weather radars

城市	雷达名	体扫时间 (min)	径向分辨率 (m)	波束宽度 (°)	仰角数	最低仰角 (°)	最大探测距离 (km)
深圳	Z9755	6	250	0.95	9	0.5	460
	ZSE01	1.5	30	0.9	12	0.9	约 42
	ZSE02	1.5	30	0.9	12	0.9	约 42
西安	Z9290	6	500	0.95	9	0.5	400
	ZXA01	1	30	1.2	68	0.9	约 55
	ZXA02	1	30	1.2	68	0.9	约 55
	ZXA03	1	30	1.2	68	0.9	约 55

本文使用 GPM-DPR 最新算法版本 (V7) 下的二级产品来进行不同波段雷达反射率转换模型的构建，以及对混合仰角反射率拼图产品性能的分析。GPM-DPR 利用 Ku (13.6 GHz) 和 Ka (35.5

GHz) 双波段的电磁波、以交叉轨道扫描的方式进行降水探测, 探测范围覆盖南北纬 68° 之间的地区。GPM-DPR 的扫描轨道宽度为 245 km, 观测像元的水平分辨率约为 $5 \times 5 \text{ km}^2$; 波束径向原始观测信息的分辨率为 250 m, 经过超采样技术处理后数据产品的径向分辨率提高到 125 m (Iguchi et al., 2021)。

本文使用的 GPM-DPR 产品包括: (1) Ku 波段雷达反射率因子数据 (已经过衰减订正); (2) 雨滴谱参数反演数据, 即粒子质量加权平均直径 (D_m) 和数浓度参数 (N_w); (3) 降水粒子相态识别信息。以上均为共享数据 (<https://storm.pps.eosdis.nasa.gov/storm/> [2023-06-08], 需注册)。从上述产品中分别提取出 2014 年 3 月至 2022 年 12 月深圳市 (图 1a)、西安市 (图 1b) 的数据, 以进行后续的研究。

此外, 本文使用 30 米分辨率的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 地形数据进行天气雷达电磁波遮挡情况的分析和计算。SRTM 是由美国国家航空航天局、国防部国家测绘局联合意大利航天机构完成的机载雷达地形测量任务, 数据可在线获取 (<https://search.earthdata.nasa.gov/> [2023-06-08])。

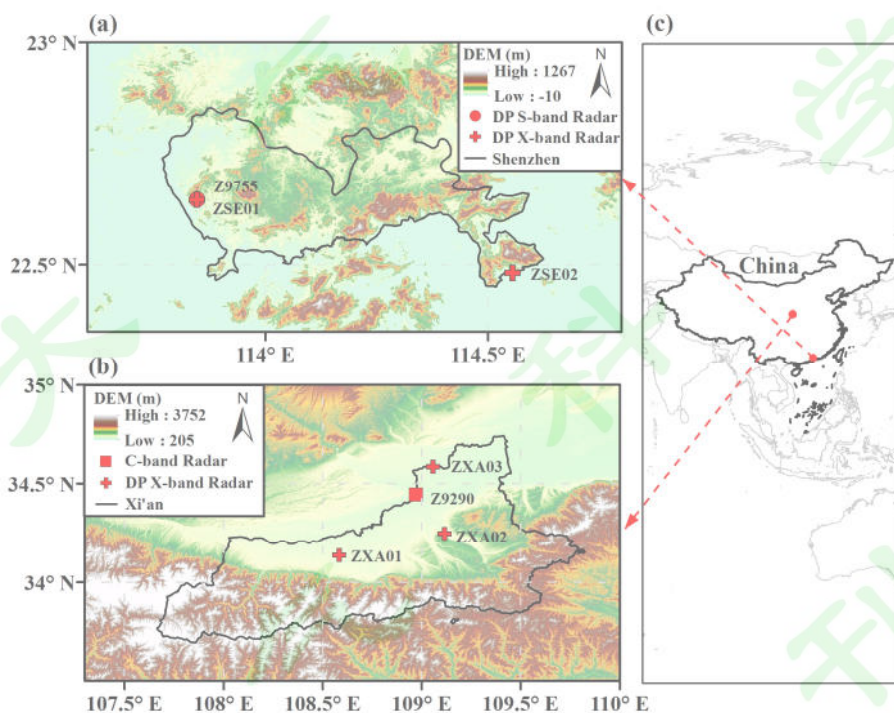


图 1 研究区地形及雷达空间分布 (a.深圳市, b.西安市)

Fig.1 Maps of terrain and weather radar locations of (a) Shenzhen and (b) Xi'an

2.2 方法

本文的目标是综合大、小雷达观测优势, 形成混合仰角反射率拼图产品, 来更好地指示降水系统低层的强度信息。图 2 对技术流程进行了概括。首先, 利用 SRTM 地形数据对雷达的电磁波遮挡情况进行计算, 得到不同仰角雷达电磁波遮挡率的空间分布; 在不同格点上选取不受地形遮挡影响的最低仰角, 形成混合扫描仰角场, 并通过雷达历史观测对混合扫描仰角场进行优化; 基于优化后的混合扫描仰角场, 可在雷达反射率体扫数据中提取出混合仰角反射率。其次, 根据 GPM-DPR

提供的雨滴谱参数建立不同波段雷达反射率转换关系，并对 X 波段雷达反射率进行转换，得到等效的 S/C 波段雷达反射率。最后，对大、小雷达的混合仰角反射率进行组网拼图。下面以深圳市为例，对 S 和 X 波段雷达混合仰角反射率拼图融合方法进行详细介绍。

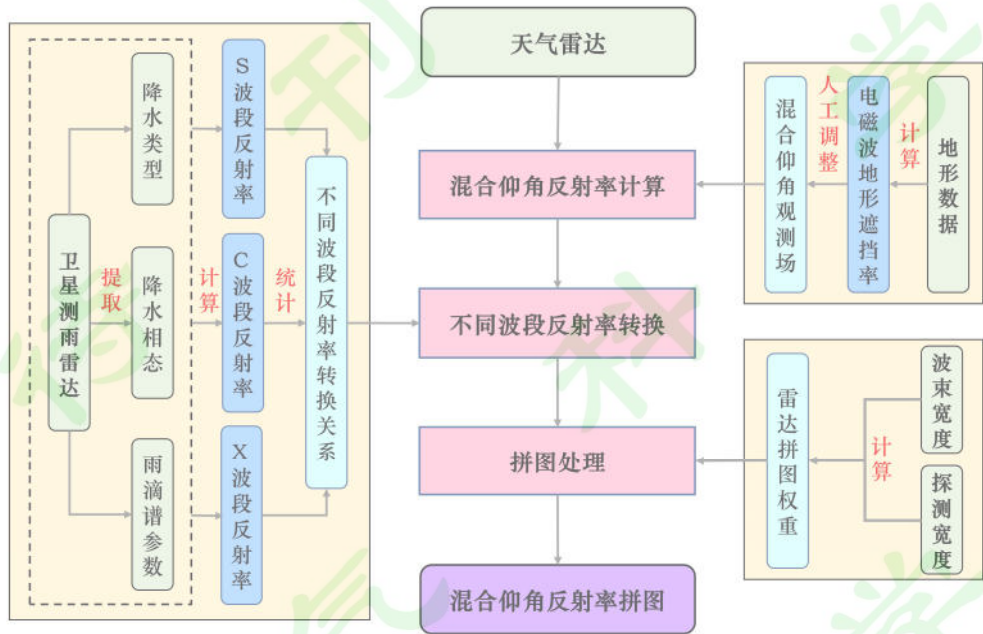


图 2 多波段雷达混合仰角反射率拼图技术流程

Fig.2 Technical flow chart of hybrid-tilt reflectivity mosaic for radars operating at different frequencies

2.2.1 混合仰角反射率计算

根据雷达的体扫方式，雷达覆盖范围内的任意格点上将产生一个或多个仰角的反射率观测信息。在每一个格点上，提取出雷达观测信息中离地面最近且不受地形或地物遮挡影响的反射率，最终形成混合仰角反射率。混合仰角反射率的形成最大限度地利用了雷达对降水系统低层的观测信息，因此可以更准确地反映降水系统的强度和落区。使用 SRTM 地形数据，结合天气雷达观测参数和电磁波在标准大气中的传播规律，可以计算任意格点上雷达不同仰角的地形遮挡率。在每个格点上，选取地形遮挡率小于 50% 的最低观测仰角，形成混合扫描仰角场。然后，对混合扫描仰角场进行一定的人工调整，修正地形数据所不能反映的波束遮挡情况，如新建建筑物产生的遮挡。根据调整后的混合扫描仰角场，可从雷达反射率体扫数据中提取出混合仰角反射率场。该方法在李巧等（2021）、张哲等（2021, 2023）中已有详细介绍，此处不再赘述。

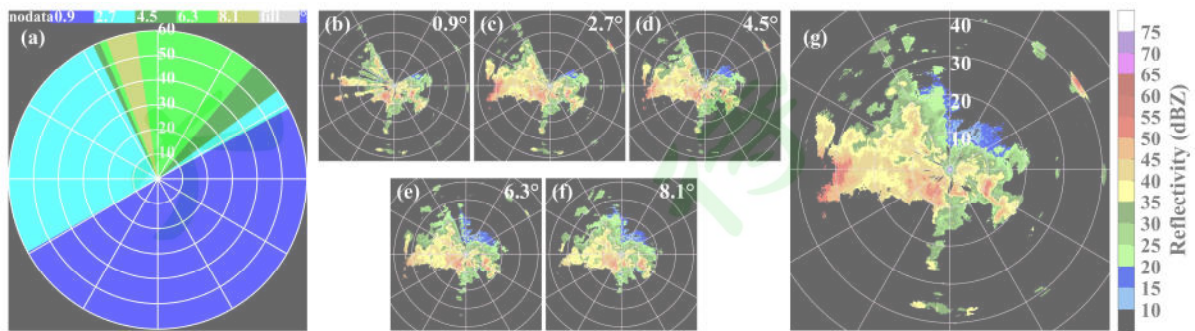


图 3 2020 年 8 月 18 日 15 点 19 分 ZSE02 雷达不同仰角反射率和混合仰角反射率的对比（a. 混合扫描仰角场，

b-f. 不同仰角雷达反射率, g. 混合仰角反射率)

Fig.3 (a) Hybrid scan tilt, (b-f) radar reflectivities in different elevation angles and (g) hybrid-tilt reflectivity for ZSE02 radar at 1519 UTC 18 August 2020.

以深圳 ZSE02 雷达为例, 图 3 给出了混合扫描仰角场以及 2020 年 8 月 18 日 15 点 18 分 (协调世界时; 下同) 雷达各仰角反射率与混合仰角反射率的对比。由于 ZSE02 雷达东面和南面向海, 最低的 0.9° 仰角并不受地形遮挡的影响; 西面和北面环山, 则需要通过更高的仰角进行降水系统的探测 (图 1 和图 3a)。在雷达的西面, 0.9° 仰角观测受到部分遮挡的影响, 观测质量下降, 而使用 2.7° 仰角即可提供有效的降水系统近地面观测信息 (图 3b-c); 北面的遮挡严重且不同区域遮挡情况差异较大, 距离地面最近的有效观测信息需要通过 $2.7\sim 8.1^\circ$ 仰角提供, 且大部分区域需要用到 6.3° 以上仰角 (图 3c-f)。混合仰角反射率充分考虑了雷达对不同区域进行探测时电磁波遮挡情况的差异, 确保反射率信息完整、有效地反映降水系统实际强度和落区信息 (图 3g)。

2.2.2 不同波段反射率转换

反射率代表雷达发射电磁波探测目标时, 天线接收到的后向散射回波功率大小, 与电磁波波段直接相关 (公式 1)。也就是说, 当 S 或 C 波段雷达与 X 波段雷达探测相同的气象目标时, 反射率将存在差异。雷达反射率可由公式 (1) 表示:

$$Z = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_w|^2} \langle |F_{hh}(\lambda)|^2 \rangle \quad (1)$$

$$\langle |F_{hh}(\lambda)|^2 \rangle \approx (1 - 2\sigma_\phi^2) \langle |f_a|^2 \rangle + 2\sigma_\phi^2 \langle f_a f_b^* \rangle \quad (2)$$

$$N(D)dD = N_w f(\mu) \left(\frac{D}{D_m}\right)^\mu \exp\left[-\frac{(\mu+4)D}{D_m}\right] dD \quad (3)$$

$$f(\mu) = \frac{6}{4^4} \frac{(\mu+4)^{\mu+4}}{\Gamma(\mu+4)} \quad (4)$$

Z 表示雷达反射率; λ (mm) 表示电磁波的波长; $K_w = |\epsilon_w - 1|/|\epsilon_w + 1|$, ϵ_w 表示水的介电常数; σ_ϕ 表示降水粒子下落过程中倾角的标准差, 对雨滴粒子设为 0° ; f_a 和 f_b 分别沿降水粒子 (近似为椭球体) 长轴和短轴的后向散射振幅, 可根据 T 矩阵方法 (Mishchenko et al., 2000; Mishchenko, 1996) 计算, 二者均为复数, * 表示复共轭; $\langle \dots \rangle$ 在雨滴谱上的积分运算; D_m 的取值范围大致在 0.3 到 3.0 mm 之间, N_w 的取值范围大致在 100 到 1000 $\text{mm}^{-\mu} \text{m}^{-3}$ 之间, 其中 μ 表示雨滴谱的形状参数, 在 GPM-DPR 的反演算法中固定为 3; Γ 表示伽马函数。

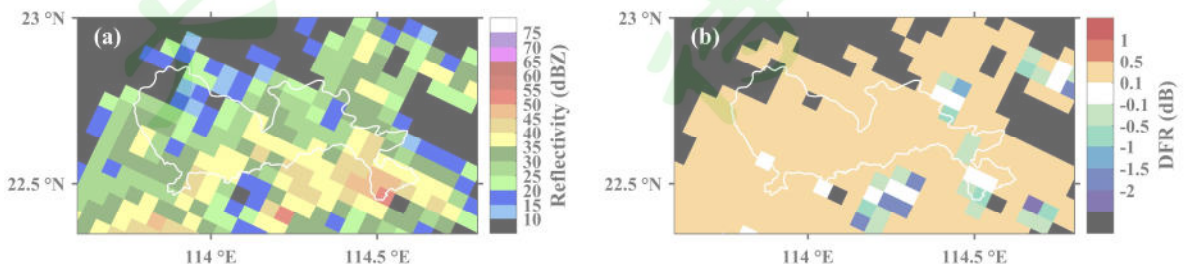


图 4 2020 年 8 月 18 日 15 点 20 分 GPM-DPR 提供的 1.5 km 海拔高度雨滴谱参数计算的雷达反射率 (a. X 波段反射率, b. S 波段与 X 波段反射率的差)

Fig.4 (a) X-band reflectivity and (b) the difference between S- and X-band reflectivities calculated from the DSD parameters 1.5 km above sea level provided by the GPM-DPR at 1520 UTC 18 August 2020.

根据 GPM-DPR 提供的雨滴谱参数,可以分别计算 X 波段($\lambda = 3.2$ cm)和 S 波段($\lambda = 10.7$ cm)的反射率。由于卫星雷达距离地面 1 km 以下的观测信息极易受到地物回波的干扰,本文选取 1.5 km 海拔高度的雨滴谱参数进行计算。以 GPM-DPR 深圳降水观测个例(2020 年 8 月 18 日 15 点 20 分)为例,图 4 显示了 GPM-DPR 雨滴谱参数计算的 X 波段反射率以及 S 波段反射率减去 X 波段反射率(DFR)的结果。该个例为对流性降水,可以看到,近地面反射率高值区出现在研究区南部,特别是东南方向上,最大反射率超过 50 dBZ(图 4a)。理论计算结果表明,使用 X 波段与 S 波段电磁波探测相同降水个例时,反射率呈现出显著差异。DFR 与 X 波段反射率强度具有较强的相关性:当 X 波段反射率强度小于 35 dBZ 时,DFR 基本为正值,数值在 0.5 dB 以内;当 X 波段反射率强度大于 35 dBZ 时,部分区域 DFR 为负值,且总体上随反射率强度增加而降低,最小值约为-2.5 dB。由此可见,如果忽视反射率观测的差异直接进行大、小雷达反射率拼图,会造成结果的不连续和不准确。本文通过建立不同波段雷达反射率转换关系,将 X 波段雷达反射率转换为 S 或 C 波段反射率,确保大、小雷达反射率的一致性。

表 2 X 波段雷达反射率向 S 波段(深圳)和 C 波段(西安)反射率转换的参数

Table 2 Polynomial coefficients of reflectivity conversions from Ku-band to S- (Shenzhen) and C-band (Xi'an).

城市	a0	a1	a2	a3	a4	a5
深圳	-9.067	1.354	-7.211e-02	1.779e-03	-2.154e-05	1.0256e-07
西安	-1.425e01	2.988	-2.424e-01	9.595e-03	-1.839e-04	1.350e-06

根据 Zhu et al. (2021) 提出的方法,利用 2014–2019 年 GPM-DPR 在深圳、西安研究区(图 1)的雨滴谱参数反演和降水相态识别数据,分别形成 X-S 和 X-C 雷达反射率在液态降水区的转换关系(表 2)。该方法简述如下。首先,根据 GPM-DPR 降水相态识别数据提取液态降水区的雨滴谱参数;然后,根据公式(1)分别计算 S/C 波段和 X 波段雷达反射率以及反射率差值 DFR(S/C - X);最后,考虑到 DFR 与 X 波段反射率的相关性(图 4),通过多项式建立两者之间的拟合关系(公式 5)。

$$DFR = a_0 + a_1 \cdot Z_X + a_2 \cdot Z_X^2 + a_3 \cdot Z_X^3 + a_4 \cdot Z_X^4 + a_5 \cdot Z_X^5 \quad (5)$$

以 X 波段反射率转换为 S 波段反射率为例,可根据公式(6)进行转换:

$$Z_s^* = Z_X + DFR \quad (6)$$

式中, Z_s^* 表示由 X 波段雷达观测的反射率转换得到的 S 波段反射率,DFR 表示 S 波段和 X 波段雷达反射率差值。

图 5 给出了 2020 年 8 月 18 日 15 点 18 分 ZSE01 雷达转换前后的混合仰角反射率以及与 Z9755 雷达混合仰角反射率的对比。可以看出，由 X 波段向 S 波段反射率转换前后的差异主要体现在反射率高值区，即强降水区域。由于 DFR 总体为负值（图 5c），因此由 X 波段转为 S 波段反射率后，高于 40 dBZ 的范围明显缩小（图 5a 和 5b）。DFR 随 X 波段反射率强度的增加而递减，降水中心区域（反射率高于 45 dBZ）对应的 DFR 为-2~-2.5 dB（图 5c）。且根据统计关系，对于反射率高于 50 dBZ 的对流性强降水区，DFR 将达到-3 dB（X 波段反射率因子的强度比 S 波段高 1 倍以上）。这一结果表明，如果不进行反射率的转换，直接使用 X 波段反射率与 S 波段反射率形成拼图产品，可能会高估对流的强度。由于分辨率存在差异，相同时刻 S 波段 Z9755 雷达反射率的空间连续性低于 X 波段雷达的观测（图 5d）。从 Z9755 雷达反射率高于 40 dBZ 的区域来看，ZSE01 雷达经过转换后的反射率更接近 Z9755 雷达的反射率，这也说明了进行不同波段反射率转换的必要性以及本文建立的转换模型的准确性。

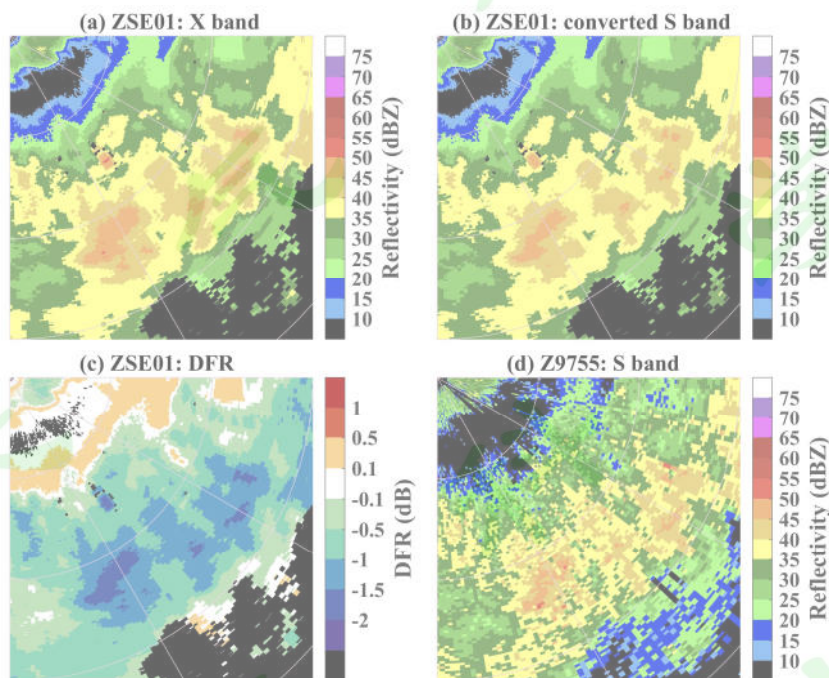


图 5 2020 年 8 月 18 日 15 点 18 分 ZSE01 雷达转换前后的混合仰角反射率以及与 Z9755 雷达混合仰角反射率的对比（a. ZSE01 观测的 X 波段反射率，b. 由 a 转换后的 S 波段反射率，c. S 波段和 X 波段反射率差值，d. Z9755 观测的 S 波段反射率）

Fig.5 Hybrid-tilt reflectivities before and after conversion for ZSE01 radar and their comparison with that derived from Z9755 radar at 1519 UTC 18 August 2020: (a) the measured X-band reflectivity from ZSE01, (b) the converted S-band reflectivity from (a), (c) the difference between the S-band and X-band reflectivities, and (d) the measured S-band reflectivity from Z9755.

2.2.3 多雷达反射率拼图

本文的拼图处理参考了张哲等（2023）的方法，形成空间分辨率为 0.0003° （约 30 m）、更新频率为 1 min 的混合仰角反射率拼图产品。具体处理包括雷达极坐标系下的混合仰角反射率向地理坐标系的转换以及拼图权重的确定。针对坐标系转换，传统基于球面模型的计算方法会导致 X 波

段雷达有效覆盖范围内定位误差达到 200 m。考虑到可能出现的定位误差在数值上大于 X 波段雷达径向分辨率 (30 m)，张哲等 (2023) 指出应采用精度更高的椭球面模型。针对拼图权重 w 的确定，主要考虑波束宽度 d (m) 和探测高度 h (m) 对天气系统低层信息代表性的影响，公式如下：

$$w = \frac{1000}{h} + \frac{1000}{d} \quad (7)$$

根据公式 (7)，在多雷达拼图时对越接近地面或波束宽度越窄的观测信息，赋予更高的权重。这样的设定可以使混合仰角反射率拼图产品更多地保留多雷达观测信息中更接近地面的、观测质量更高的信息。

图 6 给出了 2020 年 8 月 18 日 15 点 20 分深圳市三部雷达混合仰角反射率及拼图融合结果，其中小雷达反射率已转为 S 波段的反射率。通过 Z9755 雷达在较大探测范围上的观测信息，提供了对降水系统整体结构的描述。该降水系统主要为对流性降水，降水系统强度的空间分布差异较大。反射率高值区出现在南面距离雷达 50 km 左右的区域、以及东南方向距离雷达 50~100 km 的区域。通过融合两部小雷达的观测信息，提高了对该降水系统地层观测信息的精细化描述。由于 ZSE01 雷达和 Z9755 雷达站点位置很近，融合 ZSE01 雷达观测信息的主要贡献在于提高分辨率。对于研究区东南方向的强对流区域，由于对流性降水往往具有垂直向地面碰并增长的特征，使得雷达对降水系统低层观测的反射率高于高层反射率。Z9755 雷达距离该区域较远，波束探测高度距离地面 1~2 km，导致 Z9755 雷达的反射率观测信息不能准确代表该区域对流系统在近地面的强度；ZSE02 雷达距离该区域更近，其波束探测高度距地面仅 500 m 左右。可以看到，ZSE02 雷达反射率明显高于 Z9755 (图 5a 和 c)，即 ZSE02 雷达能较好地反映对流系统近地面的强度。通过融合 ZSE02 雷达的观测信息，有效弥补了大雷达对降水系统低层观测的不足 (图 5d)。总体而言，大、小雷达混合仰角反射率的融合提升了反射率产品质量，有助于准确把握降水系统近地面的强度信息。

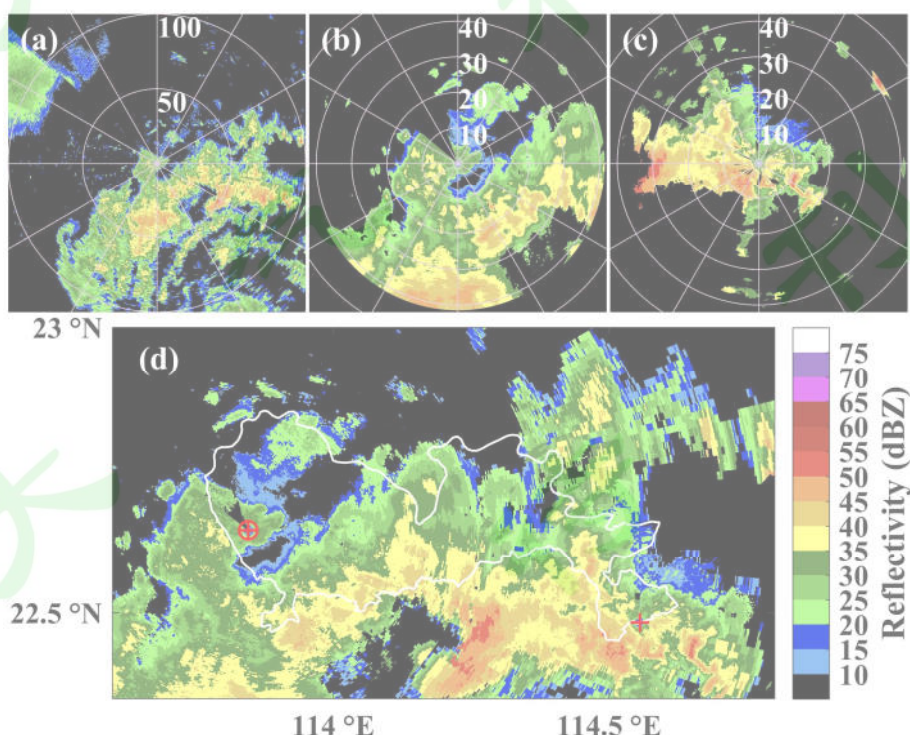


图 6 2020 年 8 月 18 日 15 点 20 分深圳市 S 和 X 波段雷达混合仰角反射率拼图 (a-c 分别是 Z9755、 ZSE01、 ZSE02 单站混合仰角反射率, d. 混合仰角反射率拼图)

Fig. 6 Mosaicking hybrid-tilt reflectivities from S-band and X-band radars at 1520 UTC 18 August 2020 in Shenzhen: (a)–(c) hybrid-tilt reflectivities from Z9755, ZSE01, and ZSE02 radars; (d) hybrid-tilt reflectivity mosaic

3 产品性能检验分析

通过第 2 节介绍的方法,解决了不同波段雷达数据拼图融合时由于电磁波频率不一致导致的观测差异问题,充分发挥大、小雷达各自观测的优势,形成了混合仰角反射率拼图产品。本节使用 GPM-DPR 的反射率观测数据,对深圳市和西安市大、小雷达混合反射率拼图产品进行性能检验,以评估拼图产品的质量。选取 GPM-DPR 和地面天气雷达同时观测到的大范围降水个例(降水面积达到研究区面积的 70%以上),以减少数据匹配产生的误差;同时要保证每部小雷达均能观测到较多的降水信息,以体现融合小雷达观测信息对反射率拼图产品质量的影响。研究中发现,每个城市 1 年中仅有 1~2 次降水个例符合上述要求。从这些个例中,选取了深圳市的 1 次对流性降水个例和西安市的 1 次层状云降水个例进行数据的对比分析。

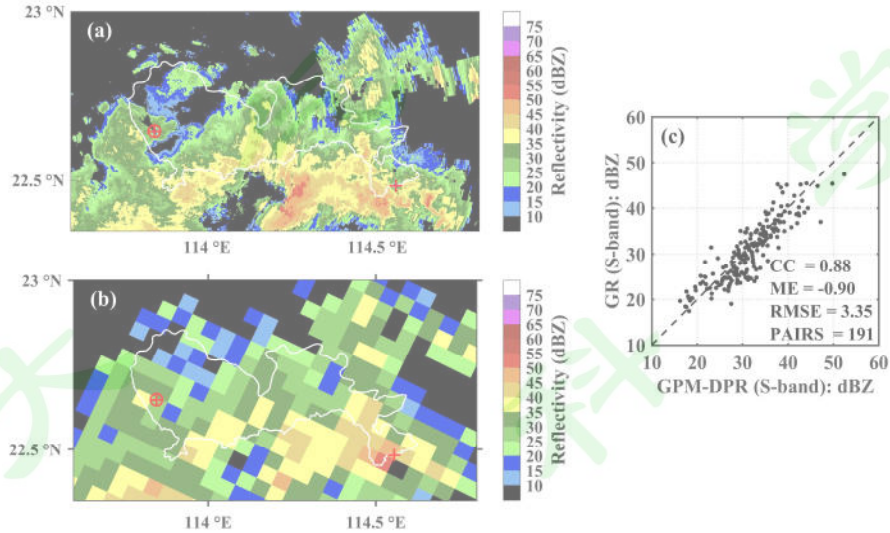


图 7 2020 年 8 月 18 日 15 点 20 分深圳市 S 和 X 波段雷达混合仰角反射率拼图与 GPM-DPR 反射率观测数据的对比 (a. 深圳市 S 和 X 波段雷达混合仰角反射率拼图, b. GPM-DPR 反射率观测数据, c. 数据对比散点图; 圆圈表示 S 波段雷达的位置, 十字表示 X 波段雷达的位置)

Fig. 7 (a) hybrid-tilt reflectivity mosaic data derived from the S-band radar and X-band radars in Shenzhen, (b) GPM-DPR reflectivity data at 1520 UTC 18 August 2020, and (c) scatterplot of the two kinds of data. The circle and crosses denote the locations of S-band radar and X-band radars, respectively.

GPM-DPR 与大、小雷达混合仰角反射率拼图产品的对比同样需要考虑电磁波频率差异的问题。因此,首先将 GPM-DPR 的 Ku 波段反射率分别转为 S 和 C 波段等效的反射率,分别用于与深圳和西安的大、小雷达混合仰角反射率拼图产品进行比较。此外,考虑到 GPM-DPR 在近地面的反射率观测数据容易受到地物杂波的干扰,本文选取 1.5 km 海拔高度的反射率观测数据与混合仰角反射率拼图进行对比。将 GPM-DPR 像元内的大、小雷达混合仰角反射率样本求平均,然后与 GPM-DPR 的像元值进行比较。两种数据的一致性通过三个常用的统计指标进行衡量,分别是相关系数(CC)、平均偏差(ME)以及均方根误差(RMSE)。公式分别如下:

$$CC = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (x_i - \bar{x})}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (8)$$

$$ME = \bar{y} - \bar{x} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (10)$$

式中, x 表示 GPM-DPR 的反射率数据, y 表示大、小雷达混合仰角反射率拼图数据, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示其均值; 下标 i 表示 n 个匹配样本个数中的第 i 个样本。

选取的深圳市对流性降水个例与图 6 所示一致。图 7 给出了深圳市大、小雷达混合仰角反射率拼图与 GPM-DPR 反射率数据的对比结果。对于此次对流性降水系统的观测, 大、小雷达的混合仰角反射率产品与 GPM-DPR 反射率在强度以及降水系统整体形态的描述上较为一致。可以看到, 从两种反射率产品上均显示出两条西北-东南走向的雨带, 反射率高值中心也较为一致, 说明本文形成的大、小雷达的混合仰角反射率产品能较好的捕捉整个对流系统的信息。高分辨率的深圳市大、小雷达混合仰角反射率产品提供了精细的对流系统反射率信息, 特别是在 X 波段雷达覆盖的区域 (图 7a 和 b), 这对于监测局地性和突发性强的对流性降水至关重要。两种数据对于该对流系统强度空间分布的描述一致性较高, CC 达到 0.88 且 ME 仅为 -0.90 dB (图 7c), 说明大、小雷达混合仰角反射率产品质量较高。在局部区域降水强度的描述上, 两种数据存在一定的差异。例如, 在研究区的西南角, 大、小雷达混合仰角反射率偏低; 而在研究区的正南边, 大、小雷达混合仰角反射率偏高。两种数据在局部区域出现明显差异的原因一方面可能是 GPM-DPR 反射率衰减订正不够准确; 另一方面可能由于两种数据对应的电磁波实际探测高度存在差异, 而对流性降水在垂直方向上降水强度变化较大。对比结果说明, 本文形成的大、小雷达混合仰角反射率拼图产品可以准确描述对流性降水系统在低层的强度, 同时提供精细的水平分布信息。

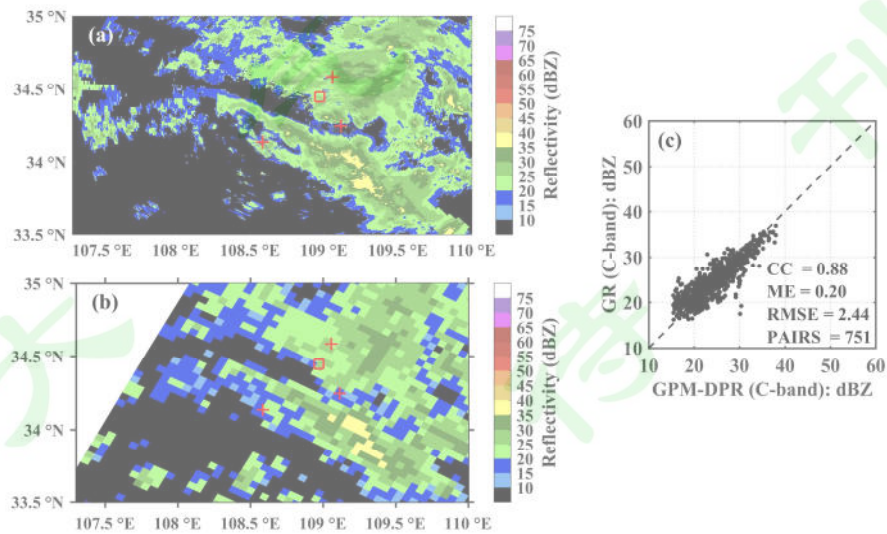


图 8 2022 年 8 月 27 日 15 点 57 分西安市 C 和 X 波段雷达混合仰角反射率拼图与 GPM-DPR 距地面 1.5 km 高

度的反射率观测数据的对比 (a. 西安市 C 和 X 波段雷达混合仰角反射率拼图, b. GPM-DPR 反射率观测数据, c. 数据对比散点图; 方框表示 C 波段雷达的位置, 十字表示 X 波段雷达的位置)

Fig. 8 (a) hybrid-tilt reflectivity mosaic derived from the C-band radar and X-band radars in Xi'an, (b) GPM-DPR reflectivity data that 1.5 km above the surface at 1557 UTC 27 August 2022, and (c) scatterplot of the two kinds of data.

The square and crosses denote the locations of C-band radar and X-band radars, respectively.

选取的西安市层状云降水个例观测时间为 2022 年 8 月 27 日 15 点 57 分。图 8 对比了西安市大、小雷达混合仰角反射率拼图与 GPM-DPR 反射率数据的对比结果。与对流性降水相比, 层状云降水的强度在水平分布上具有较高的均一性; 同时, 在液态降水区, 层状云降水的反射率垂直变化也较小。因此, 两种数据在此个例中的一致性也高于对流性降水个例中的结果。具体而言, 两种数据对降水系统强度空间分布的描述非常相近 (图 7a 和 b), 且总体偏差很小, ME 仅为 0.20 dB (图 7c)。相较对流性降水个例的对比结果, 尽管 CC 同样为 0.88, 但数据点的离散程度明显变小。平均偏差和数据点离散程度的减小, 使得层状云降水个例中的 RMSE (2.44 dB) 明显低于对流性降水个例 (3.35 dB)。

通过上述 2 个降水个例的对比分析, 说明本文形成的大、小雷达混合仰角反射率拼图产品在不同类型的天气系统中均能准确、精细地描述其低层强度信息。

4 结论

当前, 很多城市正在组建或已经组建了 X 波段双偏振天气雷达监测网。为实现与现有的 S 波段和 C 波段业务天气雷达配合使用、充分发挥多波段雷达各自的观测优势, 改善对天气系统、特别是对其低层强度的监测能力, 本文提出了 S/C 波段和 X 波段雷达混合仰角反射率拼图融合方法。首先, 根据高分辨率地形数据计算雷达电磁波地形遮挡情况, 结合人工调整优化, 确定雷达对不同区域的观测中不受地形或地物遮挡影响的最低仰角, 并生成单雷达混合仰角反射率场; 然后, 根据 GPM 卫星测雨雷达 (GPM-DPR) 的雨滴谱参数反演和相态识别信息建立 X 波段与 S/C 波段雷达反射率转换关系, 并对 X 波段反射率进行转换, 以修正大、小雷达观测相同降水时的反射率差异; 最后, 对大、小雷达混合仰角反射率场进行拼图融合, 形成混合仰角反射率网格产品, 空间分辨率为 0.0003° (约 30 m), 更新频率为 1 min。

将上述方法应用在深圳市和西安市大、小雷达监测网中, 利用 GPM-DPR 反射率观测数据对混合仰角反射率拼图产品进行性能检验。选用的降水个例分别是 2020 年 8 月 18 日 15 点 20 分发生在深圳的一次对流性降水个例和 2022 年 8 月 27 日 15 点 57 分发生在西安市的一次层状云降水个例。总体而言, 大、小雷达混合仰角反射率拼图数据与 GPM-DPR 的反射率数据在对降水系统强度的描述上具有较高的一致性, CC 达到 0.88, 平均偏差在 ± 1 dB 之间。在深圳市对流性降水个例中, 大、小雷达混合仰角反射率拼图相比 GPM-DPR 反射率略有偏低, 且在局部区域有一定差异, ME 和 RMSE 分别为 -0.90 dB 和 3.35 dB。造成两种数据在局部区域差异的原因可能是对流性降水在垂直方向上降水强度变化较大。在西安市层状云降水个例中, 由于层状云降水在近地面反射率垂直变化小, 大、小雷达混合仰角反射率拼图与 GPM-DPR 观测的反射率差异较小, ME 和 RMSE 分别为 0.20 dB 和 2.44 dB。

综上所述,本文形成的大、小雷达混合仰角反射率拼图产品具有较高的可信度,可以准确、精细地描述不同类型降水系统在近地面的强度分布。利用该产品时空分辨率高的优势,在业务应用中可以起到监测降水系统低层的发生和发展的情况、准确把握降水系统强度和降水落区的作用,这对于灾害预警信息的发布具有重要的参考价值。在后续的工作中,将开展本产品对降水短临预报中的应用研究。当前降水短临预报系统常使用给定高度层的雷达反射率作为输入场,例如业务上常用的光流法其驱动数据为 2 km 高度的反射率(Woo et al, 2017),这对于降水强度在垂直方向上变化较大的对流性强降水而言可能存在对低层降水信息代表性不足的问题。在现有短临预报方法的基础上,引入混合仰角反射率拼图数据,充分发挥大、小雷达的观测优势,或许能在一定程度上改善短临预报精度。

参考文献 (References)

- 段文广, 安林, 魏敏. 2009. 利用多普勒天气雷达资料建立灾害性天气的监测和预警系统 [J]. 干旱气象, 27(1): 82-87. Duan Wenguang, An Lin, Wei Min. 2009. Monitoring and warning system for severe weather based on doppler radar data [J]. J Arid Meteorol (in Chinese), 27(1): 82-87.
- 李巧, 戚友存, 朱自伟, 等. 2021. 复杂地形下 C 波段雷达定量降水估计算法 [J]. 气象学报, 79(4): 689-702. Li Qiao, Qi Youcun, Zhu Ziwei, et al. 2021. Quantitative precipitation estimation algorithm for C-band radar situated in complex topographical regions [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 79(4): 689-702.
- 潘佳文, 彭婕, 魏鸣, 等. 2022. 副热带高压背景下极端短时强降水的双偏振相控阵雷达观测分析 [J]. 气象学报, 80(5): 748-764. Pan Jiawen, Peng Jie, Wei Ming, et al. 2022. Analysis of an extreme flash rain event under the background of subtropical high based on dual-polarization phased array radar observations [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 80(5): 748-764.
- 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 Liusi, Hu Dongming, Chen Sheng, et al. 2021. Study on attenuation correction algorithm of X-band dual-polarization phased array radar [J]. Meteor Mon (in Chinese), 47(6): 703-716.
- 于明慧, 刘黎平, 吴翀, 等. 2019. 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日华南一次强对流过程的分析 [J]. 气象, 45(3): 330-344. Yu Minghui, Liu Liping, Wu Chong, et al. 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased array and dual-polarization radar [J]. Meteor Mon (in Chinese), 45(3): 330-344.
- 俞小鼎, 郑永光. 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展 [J]. 气象学报, 78(3): 391-418. Yu Xiaoding, Zheng Yongguang. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 78(3): 391-418.
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展 [J]. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 70(3): 311-337.
- 张蔚然, 吴翀, 刘黎平, 等. 2021. 双偏振相控阵雷达与业务雷达的定量对比及观测精度研究 [J]. 高原气象, 40(2): 424-435. Zhang Weiran, Wu Chong, Liu Liping, et al. 2021. Research on

- quantitative comparison and observation precision of dual polarization phased array radar and operational radar [J]. Plateau Meteorol (in Chinese), 40(2): 424-435.
- 张羽, 吴少峰, 李浩文, 等. 2022. 广州 X 波段双偏振相控阵天气雷达数据质量初步分析及应用 [J]. 热带气象学报, 38(1): 23-34. Zhang Yu, Wu Shaofeng, Li Haowen, et al. 2022. Data quality analysis and application of Guangzhou X-band Dual-polarization phased array radars [J]. J Trop Meteorol (in Chinese), 38(1): 23-34.
- 张哲, 戚友存, 兰红平等. 2023. 深圳 S 波段双偏振和 X 波段双偏振相控阵雷达定量降水估测网拼图系统介绍 [J]. 气象学报(接收). Zhang Zhe, Qi Youcun, Lan Hongping, et al. 2023. Introduction of radar quantitative precipitation estimation mosaicking system using S-band and X-band phase-array polarimetric radars in Shenzhen [J]. Acta Meteor Sinica (accepted; in Chinese).
- 张哲, 戚友存, 朱自伟, 等. 2021. 深圳 S 波段与 X 波段双偏振雷达在定量降水估计中的应用 [J]. 气象学报, 79(5): 786-803. Zhang Zhe, Qi Youcun, Zhu Ziwei, et al. 2021. Application of radar quantitative precipitation estimation using S-band and X-band polarimetric radars in Shenzhen [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 79(5): 786-803.
- 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 2015. 强对流天气监测预报预警技术进展 [J]. 应用气象学报, 26(6): 641-657. Zheng Yongguang, Zhou Kanghui, Sheng Jie, et al. 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning severe convective weather [J]. J Appl Meteorol Sci (in Chinese), 26(6): 641-657.
- Antonini A, Melani S, Corongiu M, et al. 2014. Radar Networking over the Tyrrhenian Sea [C]. Proceedings of the 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology ERAD. 2014.
- Barbieri S, Di Fabio S, Lidori R, et al. 2022. Mosaicking Weather Radar Retrievals from an Operational Heterogeneous Network at C and X Band for Precipitation Monitoring in Italian Central Apennines [J]. Remote Sens, 14.
- Chandrasekar V, Wang Y, Chen H 2012. The CASA quantitative precipitation estimation system: a five year validation study [J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 12: 2811-2820.
- Faure D, Gaussiat, N, Dupuy P, et al. 2017. Quality analysis of the 2016 quantitative precipitation estimates in the French Alps [C]. In Proceedings of the 38th Conf. on Radar Meteorol., Chicago, IL, USA: Amer Meteor Soc. 2017, 31.
- Iguchi T, Seto S, Meneghini R, et al. 2021. GPM/DPR Level-2 Algorithm Theoretical Basis Document [R]. NASA Goddard Space Flight Center.
- Imhoff R O, Brauer C C, Overeem A, et al. 2020. Spatial and Temporal Evaluation of Radar Rainfall Nowcasting Techniques on 1,533 Events [J]. Water Resour Res, 56.
- Kollias P, Palmer R, Bodine D, et al. 2022. Science Applications of Phased Array Radars [J]. Bull Amer Meteorol Soc, 103: E2370-E2390.
- Lengfeld K, Clemens M, Münster H, et al. 2014. Performance of high-resolution X-band weather radar networks – the PATTERN example [J]. Atmos Meas Tech, 7: 4151-4166.
- Kumjian M 2013. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: Warm- and cold-season applications [J]. Journal of Operational Meteorology, 1: 243-264.

- McLaughlin D, Pepyne D, Chandrasekar V, et al. 2009. Short-wavelength Technology and the Potential for Distributed Networks of Small Radar Systems [J]. Bull Amer Meteorol Soc, 90: 1797-1817.
- Mishchenko M I 2000. Calculation of the Amplitude Matrix for a Nonspherical Particle in A Fixed Orientation [J]. Appl Optics, 39: 1026-1031.
- Mishchenko M I, Travis L D, Mackowski D W 1996. T-Matrix Computations of Light Scattering by Nonspherical Particles: A Review [J]. J. Quant Spectrosc Radiat Transf, 55: 535-575.
- Palmer R, Bodine D, Kollias P, et al. 2022. A Primer on Phased Array Radar Technology for the Atmospheric Sciences [J]. Bull Amer Meteorol Soc, 103: E2391-E2416.
- Tabary P. 2007. The New French Operational Radar Rainfall Product. Part I: Methodology [J]. Weather Forecast., 22 (3): 393-408.
- Woo W C and Wong W K. 2017. Operational application of optical flow techniques to radar-based rainfall nowcasting [J]. Atmosphere, 8(3), 48.
- Zhang J, Howard K, Langston C, et al. 2016. Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) Quantitative Precipitation Estimation: Initial Operating Capabilities [J]. Bull Amer Meteorol Soc, 97 (4): 621-638.
- Zhao K, Huang H, Wang M, et al. 2019. Recent Progress in Dual-Polarization Radar Research and Applications in China [J]. Adv Atmos Sci, 36: 961-974.
- Zhu Z, Qi Y, Cao Q, et al. 2021. Conversion of the Vertical Profile of Reflectivity From Ku-Band to C-Band Based on the Drop Size Distribution Measurements of the Global Precipitation Measurement Mission Dual-Frequency Precipitation Radar [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 59: 5630-5641.