

文章编号: 2096-1618(2022)06-0635-07

X波段双偏振天气雷达组网反射率因子订正研究

高霞¹, 周晔¹, 周淑玥², 杜捷², 王海江²

(1. 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214000; 2. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要: X波段双偏振天气雷达具有造价低、探测精度高等特点, 能够在业务应用上与常规天气雷达形成互补作用, 但由于其波长较短, 电磁波经过雨区时会发生衰减。因此, 对组网前的单部雷达反射率因子进行适当订正处理, 再依据 S 波段天气雷达波长较长、电磁波经过雨区时衰减更小的特点设计算法对组网区域的反射率因子进行协同对比订正。实验结果表明, 设计算法能够对组网反射率因子进行有效订正。

关键词: X波段双偏振天气雷达; 组网拼图; 衰减订正

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2022.06.004

0 引言

雷达电磁波在传输过程中, 能量会被沿途接触到的各类粒子吸收转变成机械能、内能、热能等^[1], 电磁波的衰减与波长成反比。X波段双偏振天气雷达由于其波长较短, 在探测降雨时能量会被降水粒子吸收等, 导致能量衰减, 在远距离处的弱雷达回波返回时很难被雷达接收机接收, 导致远距离处信息丢失, 严重影响雷达的探测精度以及雷达探测资料的应用。

X波段双偏振天气雷达存储有差分传播相移 Φ_{DP} , 该参数为距离累积量不受衰减影响^[2], 因此被广泛用于反射率因子的衰减订正。目前较为广泛的衰减订正方法是通过计算衰减率来完成反射率因子的订正, 但衰减率大都是给定一个固定的区间范围^[3], 存在诸多弊端, 如不能灵活适应不同降水粒子的衰减。因此可以根据差分传播相移 Φ_{DP} 不受衰减的影响来设计自适应算法完成衰减订正工作^[4-5]。

首先对单部雷达进行反射率因子衰减订正处理, 其次将衰减订正处理后的 3 部 X 波段双偏振天气雷达反射率因子插值到统一的 CAPPI 网格上, 再对组网反射率因子 CAPPI 进行缺空补值和斑点滤波处理, 最后设计区域检测算法, 对组网反射率因子进行订正。

1 资料选取

3 部 X 波双偏振天气雷达隶属于北京市气象局各区分局的雷达站点, 分别是北京房山站雷达、北京昌平

站雷达、北京顺义站雷达, 另外用于验证的 1 部 SA 波段雷达为北京大兴站雷达。各站点雷达的详细参数如表 1 所示。

表 1 雷达站点及详细参数

参数	X 波段站点			SA 波段站点
	BXJFS	BJXCP	BJJSY	BeijingZ9010
经度/°E	116.1906	116.3461	116.6153	116.4719
纬度/°N	40.1269	40.1731	40.1269	39.8089
天线高度/m	42	39	29	92.40
工作频率/MHz	9455	9485	9495	2870.00
最大探测距离/km	75	75	75	460
距离库长/m	75	75	75	1000
体扫时长/min	3	3	3	6
水平波束宽度/(°)	0.94	0.94	0.98	0.95
垂直波束宽度/(°)	0.94	0.94	0.98	

研究数据来源于 2020 年夏季(8-9 月)雷达探测数据(表 1), 由于夏季降水丰沛, 雷达联合组网后效果更佳。

2 单部雷达反射率因子衰减订正

因为衰减是双程的累积量, 故衰减订正为

$$Z_{订} = Z_H + 2 \int_{r_0}^r A_H(s) ds \quad (1)$$

2.1 AH-KDP 法

对于衰减率的计算, Bringi 等^[5]通过散射的模拟

实验发现反射率因子的衰减率 A_H 与差分传播相移率 K_{DP} 基本上呈线性关系,并在实验的基础上提出了衰减订正公式:

$$A_H = \alpha K_{DP} \quad (2)$$

$$K_{DP} = \frac{1}{2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\Phi_{DP}(r_2) - \Phi_{DP}(r_1)}{r_2 - r_1} \quad (3)$$

其中, α 为衰减系数, Testud 指出对于 X 波段雷达, 衰减系数 α 在 0.139 ~ 0.335^[3], 本文取其均值 0.237。

2.2 自适应算法

为更好地适应不同降雨类型, Bringi 等^[5] 对上节算法进行改进, 命名为自适应约束算法。自适应约束算法在计算中使用了差分传播相移 Φ_{DP} 和水平反射率因子 Z_H , 并根据误差大小不断调整衰减系数 α , 将其调整为最佳值。自适应算法流程多, 迭代次数大, 算法涉及大量区间内积分运算, 对差分传播相移有较高的质量要求, 因此需要对其进行质控, 该算法流程如图 1 所示。

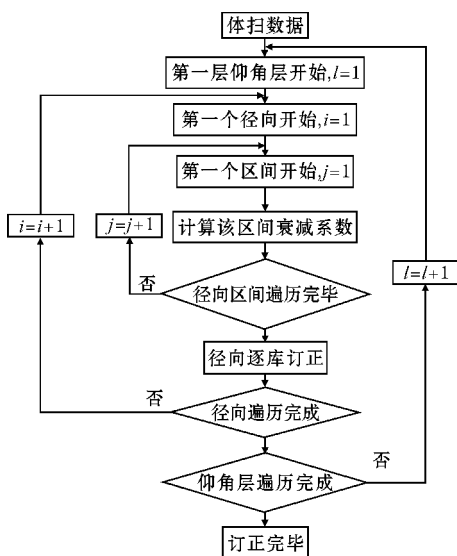


图1 自适应算法流程

自适应算法流程可以概括为: 对每个体扫数据的所有仰角层逐层订正, 每层进行逐径向订正, 将每个待订正的径向分为若干区间, 分别计算这些区间内对应的衰减系数 α , 再根据径向内所有区间的衰减系数对该径向进行订正, 然后完成整层数据的订正, 最后再完成整个体扫数据的订正。算法具体步骤如下:

(1) 给定衰减系数 α 的初始值为 0.01。

(2) 利用 Z_H 、降水量 I 和差分传播相移 Φ_{DP} 计算衰减率 A_H 。

$$A_H(r) = \frac{Z_H(r)^b (10^{0.1ab\Delta\Phi_{DP}} - 1)}{I(r_0, r_1) + (10^{0.1ab\Delta\Phi_{DP}} - 1)I(r, r_1)} \quad (4)$$

$$I(r_0, r) = 0.46 \int_{r_0}^r Z_H(s)^b ds \quad (5)$$

其中, I 为降水量, b 为衰减指数常数, 取值 0.76 ~ 0.84, 本文取均值 0.8, α 为区间待求衰减系数, Z_H 为订正前水平反射率因子 (雷达存储值)。

(3) 根据 K_{DP} 和 A_H 的关系、 K_{DP} 和 Φ_{DP} 的关系估算 Φ'_{DP} 。

$$\Phi'_{DP}(r) = 2 \int_{r_0}^r \frac{A_H(s, \alpha)}{\alpha} ds \quad (6)$$

(4) 将该估算值 Φ'_{DP} 与实测值 Φ_{DP} 对比。

(5) 衰减系数 α 以 0.05 为步长, 递增, 重复步骤 (4), 当两者的差值最小时, 即得到最佳衰减系数。

(6) 应用最佳衰减系数 α 进行订正。

2.3 两种衰减订正方法效果对比分析

因 S 波段天气雷达波长较长, 电磁波受雨区衰减影响较小, 因此验证数据集为北京大兴站同时刻 (两雷达探测误差在 1 分钟以内) 同区域内的 S 波段单偏振天气雷达数据。通过两种方法对不同地区雷达反射率因子数据进行订正发现, 固定衰减系数的 A_H - K_{DP} 法在近雷达处能够对反射率因子有较弱订正, 在远离雷达处效果不佳。 A_H - K_{DP} 法的反射率因子订正前后距离廓线对比如图 2 所示。反射率因子订正前后对比 PPI 图如图 3 所示。而自适应算法在近、远离雷达处效果都较明显, 能较好地恢复真实降雨区数据。自适应算法的反射率因子订正前后距离廓线对比如图 4 所示。反射率因子订正前后对比 PPI 图如图 5 所示。

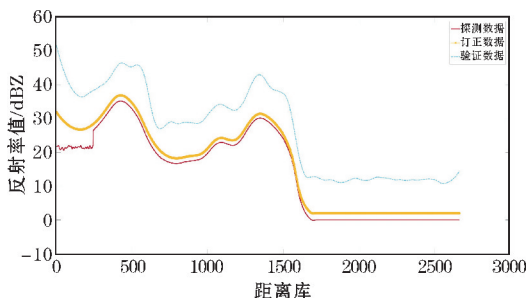
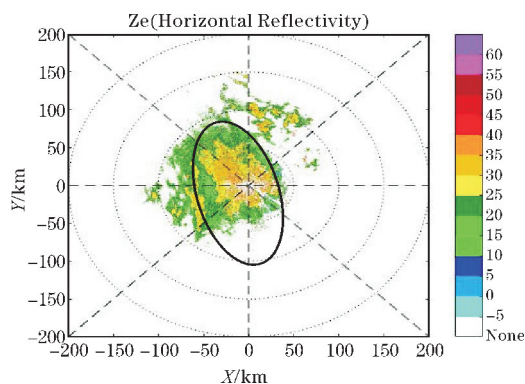


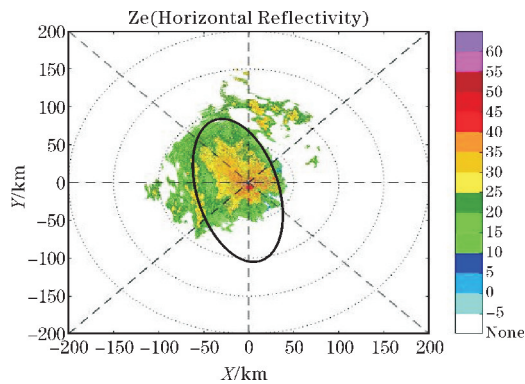
图2 A_H - K_{DP} 法订正值与探测值及验证值对比图

为更直观反映两种算法的优劣, 对同种 X 波段雷达探测数据分别用两种算法进行订正, 并以同时刻 (误差在 1 分钟左右) S 波段雷达探测数据作验证, 结果表明自适应算法明显优于 A_H - K_{DP} 法, 对比图见图 6。

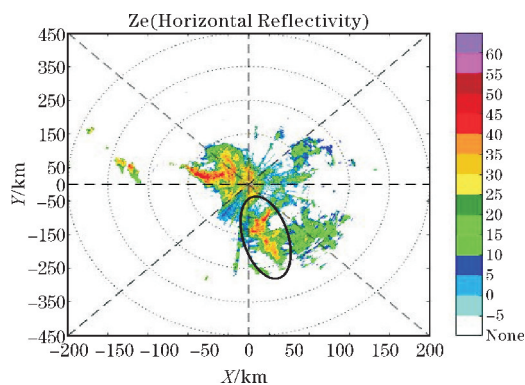
根据自适应算法和 A_H - K_{DP} 法的效果对比, 本文最终选择自适应算法对组网前的 3 部 X 波段双偏振天气雷达的反射率因子数据进行第一步衰减订正处理。



(a)衰减订正前 PPI 图



(b)衰减订正后 PPI 图



(c)S 波段验证 PPI 图

图3 A_H-K_{DP} 法衰减订正效果对比图

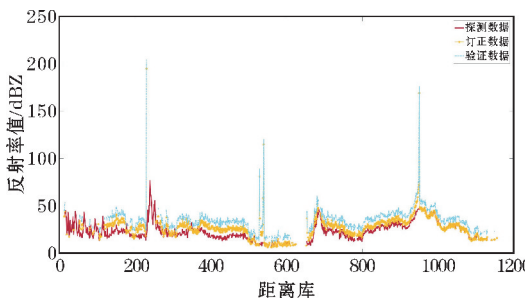
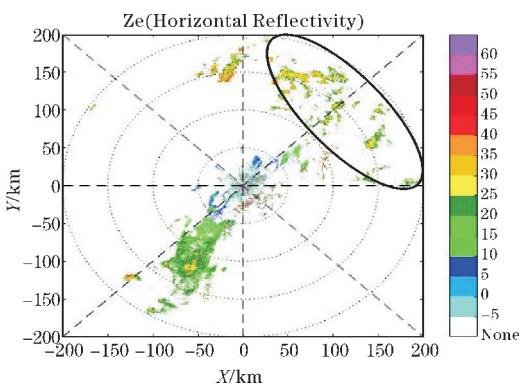
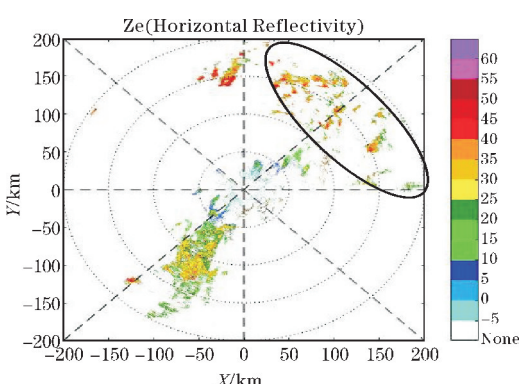


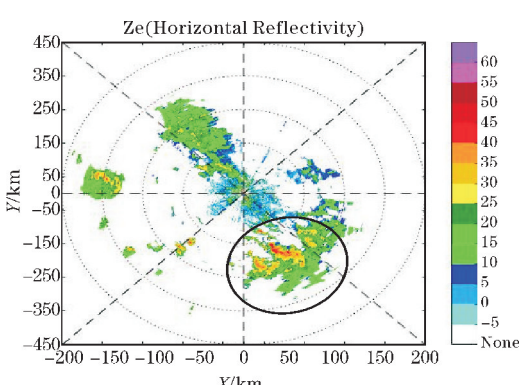
图4 自适应算法订正值与探测值及验证值对比图



(a)衰减订正前 PPI 图



(b)衰减订正后 PPI 图



(c)S 波段验证 PPI 图

图5 自适应算法衰减订正效果对比图

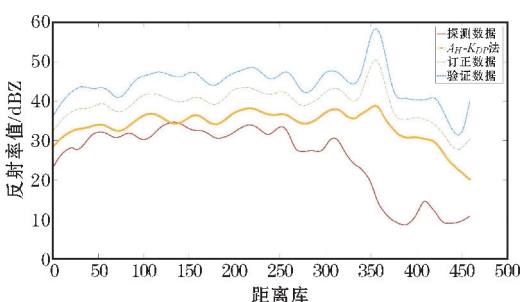


图6 A_H-K_{DP} 法与自适应算法效果对比图

3 网格化处理

3.1 插值处理

常用的线性插值算法包括:垂直线性插值、垂直水

平线性插值和八点线性插值算法。八点线性内插(EPI)选取网格点周围8个相关联的距离库作为参考点,将参考维度扩展至仰角、方位角、径向上,能够提升内插的可靠性。该算法解释为选取该网格点对应在极

坐标系下最近的两个仰角层和方位角(或径向)上六面体的8个顶点作为参考点^[6]。

如图7所示, p_1, p_2, p_3, p_4 为位于该网格点 p 上方仰角层内最近的4个距离库参考点, p_5, p_6, p_7, p_8 为位于该网格点 p 下方仰角层内最近的4个距离库参考点; p_1, p_3, p_5, p_7 位于同一方位角, p_2, p_4, p_6, p_8 位于同一方位角; p_1, p_2, p_5, p_6 拥有相同的径向距离库, p_3, p_4, p_7, p_8 拥有相同的径向距离库。 $p_1 \sim p_8$ 对应坐标为 $p_1(e_1, a_1, r_1), p_2(e_1, a_2, r_1), p_3(e_1, a_1, r_2), p_4(e_1, a_2, r_2), p_5(e_2, a_1, r_1), p_6(e_2, a_2, r_1), p_7(e_2, a_1, r_2), p_8(e_2, a_2, r_2)$ 。 $p_1 \sim p_8$ 对应值为 $V_1 \sim V_8$,待插值点 p 在空间笛卡儿坐标系下的坐标为 $p(x, y, z)$,需要将其转换至极坐标系下的坐标 $p(e, a, r)$,转换公式如式(7),最后用三个维度的线性插值对待插值点 p 的值 V_p 进行计算,计算公式如式(8)。

$$\begin{cases} e = \arctan(z/\sqrt{x^2+y^2}) \\ a = \arctan(y/x) \\ r = \sqrt{x^2+y^2+z^2} \end{cases} \quad (7)$$

$$V_p = w_{e1}[w_{r1}(w_{a1}V_1 + w_{a2}V_2) + w_{r2}(w_{a1}V_3 + w_{a2}V_4)] + w_{e2}[w_{r1}(w_{a1}V_5 + w_{a2}V_6) + w_{r2}(w_{a1}V_7 + w_{a2}V_8)] \quad (8)$$

其中的 w_e, w_r, w_a 分别为各参考点在仰角、径向距离和方位角上的权重系数,其计算公式如式(9)~(11)所示。

$$\begin{cases} w_{e1} = (e - e_2)/(e_1 - e_2) \\ w_{e2} = (e_1 - e)/(e_1 - e_2) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} w_{r1} = (r_2 - r)/(r_2 - r_1) \\ w_{r2} = (r - r_1)/(r_2 - r_1) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} w_{a1} = (a_2 - a)/(a_2 - a_1) \\ w_{a2} = (a - a_1)/(a_2 - a_1) \end{cases} \quad (11)$$

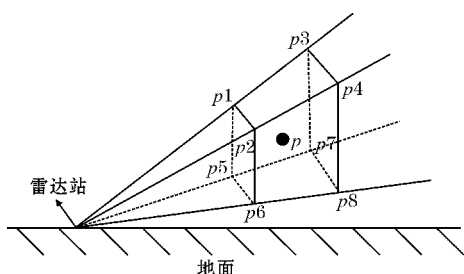


图7 八点线性插值法示意图

3.2 组网拼图处理

在得到多部雷达网格化处理后的雷达资料后,常见的拼图算有以下几种:最临近法、最大值法、反距离

权重函数法^[7]。反距离权重函数法相较于最大值法和最临近法,综合考虑了组网所用的多部雷达反射率因子在同一网格点的贡献,能够明显地减少其他两种方法带来的色标跳变现象,组网图像更连续。因此,组网处理部分最终选择反距离权重函数法,其示意图如图8所示。

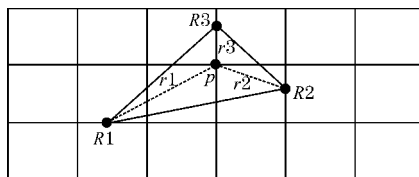


图8 反距离权重法示意图

由图8可知,3部雷达形成一个三角形区域,网格点 p 的值由该网格点到3部雷达 R_1, R_2, R_3 距离决定,最后根据网格点 p 到3部雷达在三维 $x-y-z$ 空间上的直线距离 r_1, r_2, r_3 进行反距离加权,设 r_1, r_2, r_3 大小递减。3部雷达的坐标为 $R_1(x_1, y_1, z_1), R_2(x_2, y_2, z_2), R_3(x_3, y_3, z_3)$, p 点的坐标为 $p(x, y, z)$ 。3部雷达在 p 点的值分别为 V_1, V_2, V_3 , p 点拼图后的值应为 V_p 。拼图公式如下:

$$V_p = w_1V_1 + w_2V_2 + w_3V_3 \quad (12)$$

$$\begin{cases} w_1 = r_3/(r_1 + r_2 + r_3) \\ w_2 = r_2/(r_1 + r_2 + r_3) \\ w_3 = r_1/(r_1 + r_2 + r_3) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \\ r_3 = \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} \end{cases} \quad (14)$$

3.3 网格化处理结果

对2020年8月12日10:00:00北京房山站、北京昌平站、北京顺义站X波段双偏振天气雷达的水平反射率因子PPI以八点线性插值方法进行3 km高的CAPPI插值与组网处理,其插值结果、组网拼图结果分别如图9所示。

由图9可知,EPI法在3个维度(仰角、方位角、距离)上选择8个参考点,能够对3部X波段双偏振天气雷达极坐标系下的反射率因子资料合适地插值到统一的空间笛卡尔坐标系下(CAPPI)。由图10可知,反距离权重函数法基本能将3部雷达的插值结果较完整的组网到同一个网格上。至此,完成前期的3部雷达的反射率因子组网处理。

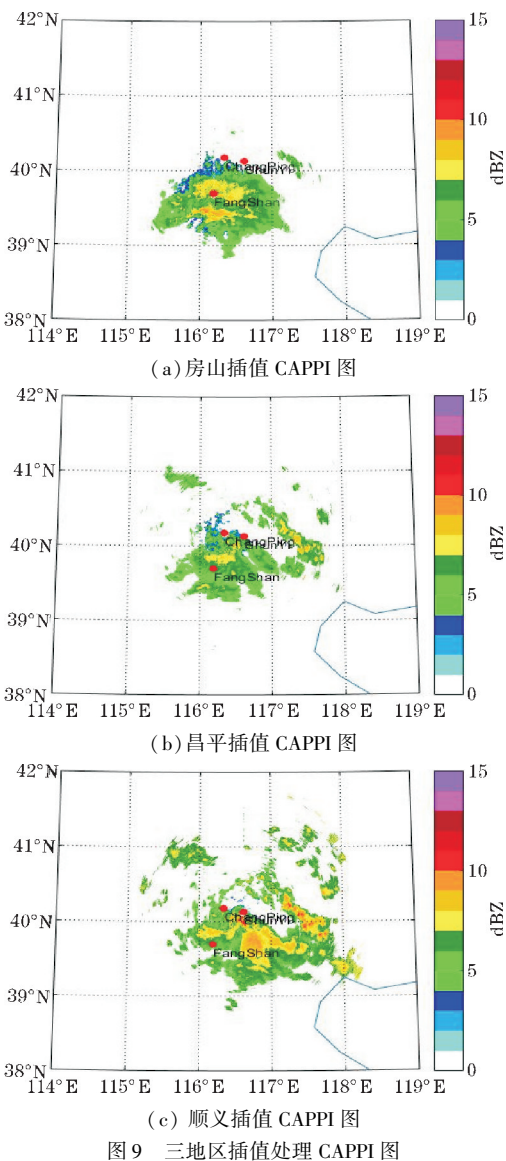


图9 三地区插值处理 CAPPI 图

4 组网反射率因子订正

4.1 预处理

预处理部分主要分为缺空补值和斑点滤波^[8-9],

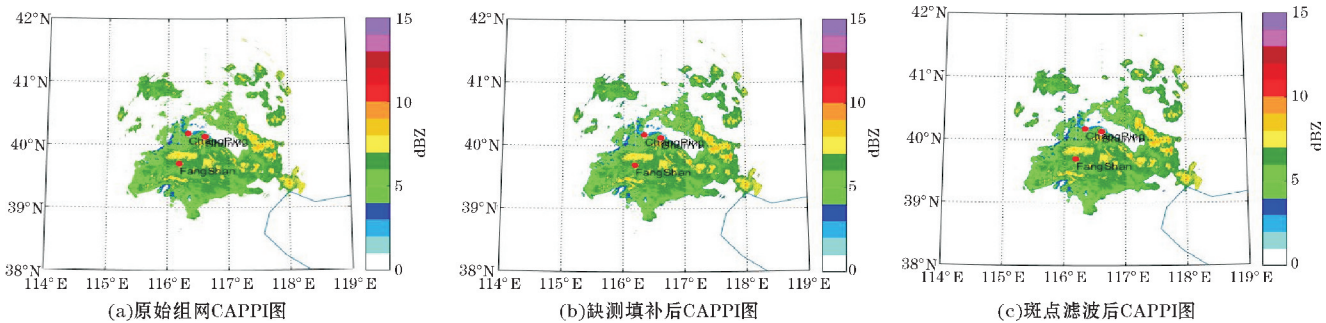


图11 预处理前后 CAPPI 图

由图 11 预处理前后对比,可知预处理能够对边缘空缺值进行有效回填,并对组网区域内的斑点杂波进行相应的去除。

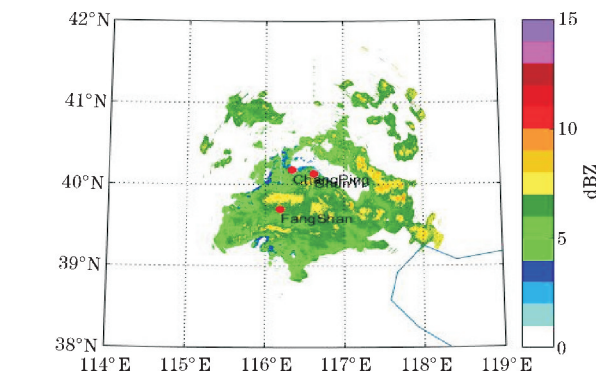


图10 组网拼图处理 CAPPI 图

关于反射率因子 CAPPI 的缺空补值处理,设计 $N_A \times N_R$ 窗口滤波函数^[10]对所有网格点上的值进行滤波检测。该窗口滤波函数可描述为:在每格网格点的第 i 个经度和第 j 个纬度处的有效值,其经度方向上的窗口尺度为 N_A ,其纬度方向上的窗口尺度为 N_R ,当窗口内的有效数据总数 $T_{i,j}$ 在窗口内总库数占比 $P_{i,j}$ 小于阈值 Thr_1 时,则将该库视为孤立回波^[11],并将该库处的值设置为无效值 NaN,如公式(15)。当窗口内的有效数据总数 $T_{i,j}$ 在窗口内总库数占比 $P_{i,j}$ 大于阈值 Thr_2 时,则将该库视为缺测值库,并将该库处的值从 NaN 设置为一个有效值,该有效值 F 为该窗口内所有有效值的均值,如式(16)。

$$P_{i,j} = \frac{T_{i,j}}{N_A \times N_R}$$
 (15)

$$F = \frac{1}{N_A \times N_R} \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} \text{Val}_{i,j}, \quad \text{Val}_{i,j} \neq \text{NaN}$$
 (16)

其中阈值 Thr_1 设置为0.45,阈值 Thr_2 设置为0.3,对北京房山、昌平、顺义地区经过 EPI 法得到的反射率因子 CAPPI 进行缺空补值、斑点滤波处理前后的对比如图 11 所示。

4.2 区域检测算法

关于组网反射率因子 CAPPI 的订正处理,由于在

应用反射率因子进行 CAPPI 组网拼图前,已经对 3 部雷达的反射率因子以自适应算法进行订正处理,但这种处理不够彻底。因为订正是基于雷达电磁波在发射方向上不断衰减能量的前提下,运用最佳衰减系数和差分传播相移使探测值尽量靠近真实值。因此在反射率因子 CAPPI 组网之后,也要对网格点上的反射率因子值进行适当订正。本文设计使用区域检测算法对 CAPPI 每个网格点进行订正。该算法整体思路为以 S 波段雷达为参考,对拼图 CAPPI 和 S 波段雷达 CAPPI 的每个网格点建立维度为 N 的搜索框,并分别计算其均值 Mean_S 和 Mean_X ,当前者与后者的差值大于阈值 Thr_C 时,则判定为偏差严重,该偏差包括系统误差和衰减,需要进行订正。为防止订正后的值大于真实值,以尽量靠近真实值的为原则,订正后的值 V_p 为当前拼图 CAPPI 值 V_x 加上 Mean_S 与 Mean_X 的差值,

其中 N 取 5, 阈值 Thr_C 取 2 dBZ。建立的搜索框示意图如图 12。

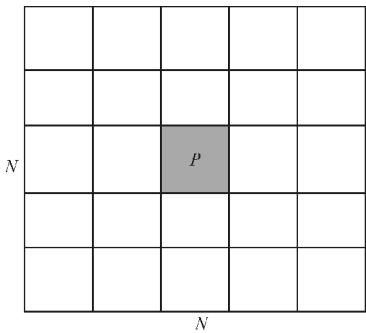
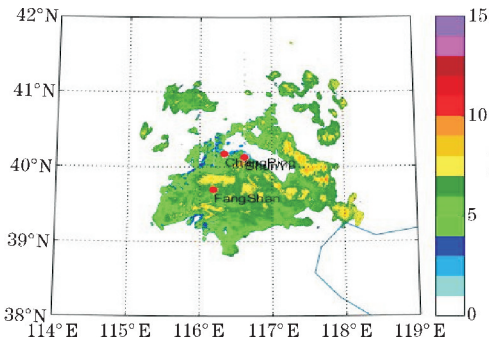


图 12 搜索框示意图

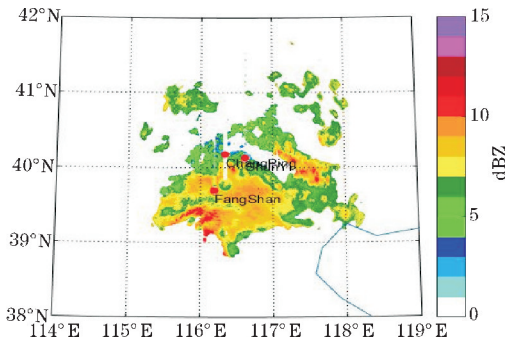
订正公式如式(17),组网反射率因子 CAPPI 订正前后对比效果如图 13。

$$V_p = V_x + (\text{Mean}_S - \text{Mean}_X)$$

(17)



(a) 订正处理前组网反射率因子 CAPPI 图

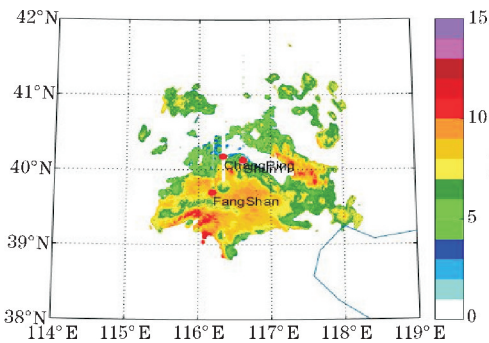


(b) 订正处理后组网反射率因子 CAPPI 图

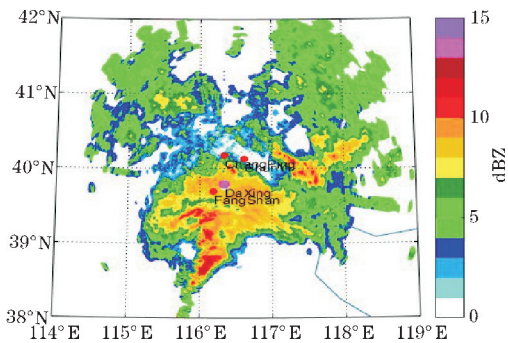
图 13 订正处理前后对比图

由图 13 可知,订正部分主要在 $39^{\circ}\text{N} \sim 40.3^{\circ}\text{N}$ 、 $115.5^{\circ}\text{E} \sim 118^{\circ}\text{E}$ 附近,将订正后的组网反射率因子

CAPPI 与同时刻同地点的 S 波段雷达反射率因子 CAPPI 进行对比,如图 14。



(a) 订正处理后组网反射率因子 CAPPI 图



(b) 验证用 S 波段雷达数据 CAPPI 图

图 14 订正 CAPPI 与验证 CAPPI 对比图

4.3 订正结果分析

由图 13 可知, $115.5^{\circ}\text{E} \sim 118^{\circ}\text{E}$, $39^{\circ}\text{N} \sim 40.3^{\circ}\text{N}$ 为主要订正区域,区域检测算法以待订区域内同时刻下 S 波段天气雷达探测资料为参考,对每个待

订正的网格点反射率因子建立搜索框,并计算两个搜索框内的区域均值,当两均值差异较大时,则判定为偏差过大,利用 S 波段雷达资料对其进行订正处理。由图 14 可知,主要订正区域内的订正结果基本与验证用 S 波段雷达反射率因子 CAPPI 相吻合,该算法订正效

果表现良好。

5 结束语

在前人研究的基础上,首先通过分析2种常规衰减订正算法的优劣,选择较优算法对单部雷达反射率因子订正处理;其次运用经典八点线性插值算法和反距离权重函数法对订正后的3部X波段双偏振天气雷达反射率因子进行网格化处理,最后设计了区域检测算法对组网反射率因子CAPPI进行适当的订正处理,实验结果表明,本文设计的区域检测算法在CAPPI网格上表现良好的效果,具有一定的参考价值,但该方法局限于组网区域内需要存在衰减较小的长波长天气雷达用以验证算法效果,极大限制了该方法在业务上的应用,未来需设计其他数值订正方案来优化该算法。

参考文献:

- [1] 何宇翔,吕达仁,肖辉,等. X波段双线极化雷达反射率的衰减订正[J]. 大气科学,2009,33(5):11.
- [2] 吴仁彪,韩雁飞,李海,等. 气象雷达衰减订正方法的研究现状与展望[J]. 中国民航大学学报,2012,30(3):22-27+31.
- [3] Testud, Jacques, Le, et al. The Rain Profiling Algorithm Applied to Polarimetric Weather Radar[J]. J. Atmos. Oceanic Technol, 2000.
- [4] 李宗飞,肖辉,冯亮,等. X波段双偏振天气雷达

衰减订正方法及效果检验[J]. 气象科技,2019,47(5):731-739.

- [5] Bringi V N, Keenan. Correcting C-Band Radar Reflectivity and Differential Reflectivity Data for Rain Attenuation: A Self-Consistent Method With Constraints[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2001.
- [6] 邹海波,单九生,邓诗茹. 多普勒雷达资料的网格化研究[J]. 气象与减灾研究,2014,37(2):23-30.
- [7] 肖艳姣,刘黎平. 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,2006(5):647-657.
- [8] 江源,刘黎平,庄薇. 多普勒天气雷达地物回波特征及其识别方法改进[J]. 应用气象学报,2009,20(2):203-213.
- [9] Lakshmanan V, Hondl K, Stumpf G, et al. Quality control of weather radar data using texture features and a neural network [C]. Preprints, 31st Radar Conference, 2003:522-525.
- [10] Zhang J, Wang S, Clarke B. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure, paper presented at Preprints, 11th Conf [C]. 11th conference Aviation, Range, and Aerospace Meteor., Amer. Meteor. Soc., Hyannis, Mass, 2004.
- [11] 杨川. 新一代天气雷达资料质量分析和处理方法研究[D]. 成都:成都信息工程学院,2012.

Study on Reflectivity Factor Correction of X-band Dual Polarization Weather Radar Network

GAO Xia¹, ZHOU Ye¹, ZHOU Shuyue², DU Jie², WANG Haijiang²

(1. Aviation Industry Corporation of China Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214000, China; 2. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: X-band dual polarization weather radar is characteristic of low cost and high detection accuracy, which can make up for the shortcomings of conventional weather radar in business application, but because of its short wavelength, the electromagnetic wave will attenuate when it passes through the rain area. Therefore, this paper first corrects the reflectivity factor of a single radar before networking, and then designs an algorithm to compare and correct the reflectivity factor of the netted area. In order to analyze the effect of the algorithm, the data of a S-band weather radar which has a longer wavelength and less attenuation when passing through a rainy area is selected for comparison with the results of the network correction. The results show that the algorithm designed in this paper can correct the reflectivity factor effectively.

Keywords: X-band dual polarization weather radar; network mosaic; attenuation correction