

X 波段双线偏振雷达不同衰减订正法对比分析

王晗^{1,2,3} 刘黎平² 张扬^{2,4}

(1 浙江省大气探测技术保障中心, 杭州 310017; 2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
3 成都信息工程大学, 成都 610225; 4 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要 X 波段双线偏振雷达的衰减是影响其回波强度(Z_H)和差分反射率因子(Z_{DR})应用的主要问题,影响了雷达的探测精度以及降水估测的精度。考虑到传播相移率(K_{DP})在低信噪比情况下数据质量问题,本文对比了 4 种订正方法(Z_H-K_{DP} 法,整段 ZPHI 法,20 库 ZPHI 法,80 库 ZPHI 法)的订正效果,将广州 S 波段双线偏振雷达数据作为标准来评判佛山 X 波段双线偏振雷达衰减订正效果,由于两部雷达的位置差异,为了得到精确的点对点(方位角、仰角、距离库)的数据对,对广州 S 波段双线偏振雷达数据进行坐标转换以及插值处理,通过与广州 S 波段雷达数据进行对比分析相对偏差以及相关系数等,得出 ZPHI 订正法的效果要优于 Z_H-K_{DP} 综合订正法。

关键词 X 波段双线偏振雷达; 衰减订正; Z_H-K_{DP} 订正法; ZPHI 降水廓线订正法

中图分类号: TN955+.2 DOI: 10.19517/j.1671-6345.20170042 文献标识码: A

引言

X 波段雷达具有体积小,成本低,方便移动的优点,而且与 S 波段、C 波段雷达相比较,有更高的探测分辨率和更强的差传播相移率(K_{DP}),大约分别为 C 波段的 1.5 倍, S 波段的 3 倍^[1]。但是,强烈的雨区衰减一直严重影响着 X 波段雷达的应用^[3],有资料表明, X 波段的雷达接收到的回波的衰减率(A_H)是波长较长的 S、C 波段雷达的 7~8 倍和 10 倍以上^[2],严重影响反射率(Z_H)和差分反射率(Z_{DR})的数据精确度。虽然用 K_{DP} 估测降水比传统的 Z-R 估测法要精确很多,但是在弱降水、低信噪比的情况下中存在不够准确的缺点。

双偏振多普勒雷达出现以后,由于 K_{DP} 不受衰减影响,所以用其进行衰减订正受到广泛研究。Bringi 等^[3-4](1990)通过散射的数值模拟表明,衰减率(A_H , 单位 dB/km),差分衰减率(A_{DP})与 K_{DP} 之间的关系基本上为线性,提出了 A_H 、 $A_{DP}-K_{DP}$ 经验公式,被广泛应用于 S、C 波段的衰减订正中。Ryzhkov^[5](1995)提出了一种可变参数的方法, Carey 等

(2000)讨论了温度,粒子形状的对 C 波段衰减的影响,并改进了 Ryzhkov 的方法,但是还是有一定的局限性(必须要求降水粒子分布比较均匀)。上述方法存在的主要问题是 K_{DP} 在低信噪比情况下数据稳定性不好。

Testud 等^[6-8](2000)提出了降水廓线订正算法(ZPHI),利用 Φ_{DP} 的值进行订正。ZPHI 订正法存在一个约束条件:路径总衰减与整个路径(r_1, r_2)里的 Φ_{DP} 的变化是一致的,另外 ZPHI 算法是分段进行衰减订正的,但是 A_H-K_{DP} 关系中仍然使用的固定系数。Bringi 等^[9](2001)提出了自适应约束算法,它是在 Testud 订正算法的基础上的推广,这种方法是利用雷达资料的本身,在给定的区间内,寻找使得路径(r_1, r_2)内 Φ_{DP} 计算值与观测值差别最小的 α ,即为 A_H-K_{DP} 关系中的最优系数,是一种相对较好的订正方法。

胡志群^[10](2008)比较了 K_{DP} 订正法、 Z_H 订正法,指出 K_{DP} 法要优于 Z_H 订正法,但是当 K_{DP} 较小时,订正存在较大的误差,最后通过设置 K_{DP} 的阈值,提出了综合利用两种订正方法。毕永恒等^[11]

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家自然科学基金项目(41675023)资助

作者简介:王晗,男,1991 年生,硕士,主要从事双线偏振雷达技术研究,Email:596976732@qq.com

收稿日期:2017 年 1 月 18 日;定稿日期:2017 年 6 月 12 日

(2012)以自适应约束算法为基础,进行改进,结合中层大气与 X 波段雷达的特点,提出了一种较适用的订正方法。

利用 K_{DP} 进行衰减订正虽然有一系列优点,但是存在上面提到的在低信噪比的情况下数据质量不高,会有比较大的误差,从而影响衰减订正的准确性。因此本文采取了 2 种订正方法: $Z_H - K_{DP}$ 方法、ZPHI 方法。 $Z_H - K_{DP}$ 方法通过设置阈值,从而在不同情况下分别利用 Z_H 和 K_{DP} 进行订正;ZPHI 方法是利用 Φ_{DP} 的值进行订正。利用中国气象科学研究院在佛山取得的一批 X 波段双线偏振雷达外场观测资料,以同一时次广州 S 波段双线偏振雷达数据作为标准,对这两种订正方法进行效果检验与分析。

1 X 波段雷达衰减订正方法

2 种衰减订正方法,分别是 $Z_H - K_{DP}$ 综合订正法和降水廓线订正法(ZPHI),其中第 2 种方法又选取了 3 种不同的分段方案(整段法,20 库法,80 库法)来验证不同的订正效果。

1.1 $Z_H - K_{DP}$ 综合订正法

在实际的雷达观测中,利用 K_{DP} 进行衰减订正的效果一般要比 Z_H 法好,但是 K_{DP} 的数据质量在低信噪比的情况下比较差,所以会对衰减订正的效果产生很大的影响^[12-14]。 $Z_H - K_{DP}$ 综合订正法是通过设置阈值,在 K_{DP} 不同情况下分别用不同的订正方法:

$$A_H = \begin{cases} a_1 K_{DP} & 0.1 \leq K_{DP} \leq 3 \\ a_2 Z_H^\beta & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

$$A_{DP} = \begin{cases} a_2 K_{DP} & 0.1 \leq K_{DP} \leq 3 \\ \lambda A_H^d & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

对于 X 波段,Bringi 通过假设雨滴谱为 gamma 分布,用数值模拟分别求得系数 a_1 的值为 0.247, a_2 为 0.033。式(1)中 $Z_H = 10^{Z_H}/10(\text{mm}^6/\text{m}^3)$, α, β 基本上不受雨滴形状影响,在这里分别取常数 1.370×10^{-4} 、0.779, d 的变化很小,取 1.13, λ 的变化范围为 0.114~0.166,取均值 0.14^[4]。

1.2 ZPHI 降水廓线订正法

Testud 等提出了降水廓线订正算法(ZPHI),通过 Φ_{DP} 的值来计算衰减率。ZPHI 订正法存在一个约束条件:路径总衰减(P_{1A})与整个路径(r_1, r_2)

里的 Φ_{DP} 的变化 $\Delta\Phi_{DP}$ 是一致的^[6-8]。

ZPHI 算法要进行雨区分段, A_H 的计算就是基于整个约束条件。通过设定 $n+1$ 个边界将 1 个径向分成 n 段来进行订正。在每 1 段中, A_H 的计算如下:

$$A_H(r) = \left(\frac{Z_H^b(r)}{I(r_1, r_0) + (10^{0.1\gamma\Delta\Phi} - 1)I(r, r_0)} \right) \cdot (10^{0.1\gamma\Delta\Phi} - 1) \quad (3)$$

差分反射率 Z_{DR} 的订正如下:

$$Z_{DR} = Z_{DRa} + 2 \int_{r_1}^{r_0} p [N_0^*]^{1-q} [A_H(s)]^q ds \quad (4)$$

式中: $I(r, r_0) = 0.46b \int_r^{r_0} Z_H^b(s) ds$

$$I(r_1, r_0) = 0.46b \int_{r_1}^{r_0} Z_H^b(s) ds$$

$$\Delta\Phi = \Phi_{DP}(r_0) - \Phi_{DP}(r_1)$$

$$N_0^* = \left[\frac{1}{a} \frac{1 - 10^{0.1\gamma\Delta\Phi}}{I(r_1, r_0)} \right]^{1/(1-b)} \quad (5)$$

其中, Z_H 为反射率雷达测量值, b 为常数, 范围为 0.757~0.804, γ 在 X 波段取 0.32, a 取 $(3.64e-6)$, p 取 4.38, q 取 1.224, Z_{DRa} 为差分反射率雷达测量值。

Park 等在每 1 条射线上用 Φ_{DP} 的标准差和 ρ_{hv} 进行雨区分段^[6]。本文在每条射线上利用 Z_H 进行雨区分段,当连续超过 M 个距离库的 Z_H 大于 0 dBZ 时,则认为是 1 个雨区段。我们采用了 3 种分段方法,第 1 种命名为整段 ZPHI 法:在整条射线提取 1 个雨区段,从第 1 个 Z_H 大于 0 dBZ 的距离库到最后 1 个 Z_H 大于 0 dBZ 的距离库。第 2 种命名为 20 库 ZPHI 法:取 N 等于 20(1.5 km);第 3 种命名为 80 库 ZPHI 法:取 N 为 80(6 km)。

2 数据处理

选取广州 S 波段双线偏振雷达的数据作为标准,通过进行定性定量分析,来评判衰减订正结果的好坏。但是由于两部雷达不在同一位置以及数据质量等问题,需要对雷达观测数据进行预处理。

X 波段双线偏振雷达位于佛山南海(23°145'N, 113°011'E),观测时间为 2016 年 5 月 6 日,天线海拔高度为 100 m,雷达频率为 9.464 GHz,水平波束宽度为 0.9°,雷达波束库长 75 m,用的第 2 层仰角,仰角为 1.5°,因为仰角较低,在 90 km 处波束高度

小于 3 km,故不考虑零度层亮带的影响。S 波段雷达数据为广州 SA 雷达升级改造的 S 波段双线偏振雷达 (23.00°N, 113.355°E), 天线海拔高度为 179 m, 雷达频率为 2.885 GHz, 水平波束宽度为 0.95°, 雷达波束库长 250 m。佛山雷达位于广州雷达的西偏北 23.5°左右, 距离 39.7 km。

2.1 差分相移 Φ_{DP} 的预处理

Φ_{DP} 是水凝物粒子所造成的电磁波在水平和垂直方向的相位差, 由于本文所用的雷达数据的 Φ_{DP} 波动很大, 为了提高订正效果, 要对 Φ_{DP} 进行预处理。先对每一个径向的 Φ_{DP} 进行判断是否发生相位模糊, 如果存在相位模糊, 则进行退模糊处理, 然后再进行中值滤波处理。

图 1(彩页)给出了 1 个径向的中值滤波前后的 Φ_{DP} 的变化, 可以看出经过滤波后, Φ_{DP} 变得平滑了许多, 而且在前 20 个距离库中有几个异常高值也滤掉了, 但是还是存在 Φ_{DP} 抖动的问题, 但是过度平滑反而会损失掉不同距离库的 Φ_{DP} 的数据特性。

2.2 坐标转换及插值处理

Chandrasekar 等认为 S 波段雷达基本上不存在在雨区衰减, 除非在一些湿雹区。指出了在瑞丽散射下, 反射率不会因频率的变化而变化。从而得出了 S 波段和 X 波段对比的可行性^[15]。

为了更好地评估衰减订正的效果, 将订正后的数据与 S 波段雷达数据作对比, 在这里, 就要对雷达资料通过坐标转换, 从而将广州的雷达数据处理到佛山的雷达数据格点上, 形成虚拟的相同位置观测资料^[16]。由于受到两部雷达的仰角层数和距离分辨率的影响, 数据俯仰分布不均匀, 即使进行了坐标转换, 也不一定能够匹配到源数据, 所以必须对数据插值处理将两部雷达的仰角进行匹配, 从而将广州的 S 波段雷达的观测数据处理到佛山 X 波段雷达的数据格点上^[16]。本文采用的是距离权重插值方法: 若上面计算的 e 在广州的雷达探测范围内, 则选择上下两个相邻的仰角 e_1 和 e_2 的数据进行插值处理 ($e_2 > e > e_1$)。两个点 (a, e_1, l) , (a, e_2, l) 是经过点 (a, e, l) 的垂线与广州雷达上下仰角雷达射线的交点, 其中 a 代表方位角, e 为仰角, l 为径向距离。那么该网格点的雷达参量值可以用这 2 个计算值作垂直直线性内插得到:

$$Z(a, e, l) = ((w_1 Z(a, e_1, l)) + (w_2 Z(a, e_2, l))) / (w_1 + w_2) \quad (6)$$

其中, w_1, w_2 分别是距离权重: $w_1 = (e_2 - e) / (e_2 - e_1)$, $w_2 = (e - e_1) / (e_2 - e_1)$ 。

通过上面的插值处理, 就能使佛山的 X 波段雷达的极坐标上的每个点的数据都能找到所对应的广州 S 波段在该位置的极坐标, 从而真正实现两部雷达的观测数据精确匹配, 方便分析订正效果。

2.3 雷达系统误差校正

由于需要比较两部雷达的数据来验证订正效果, 所以在验证之前必须确定两部雷达的系统误差值, 在衰减订正的算法中将两部雷达的系统误差消除掉。

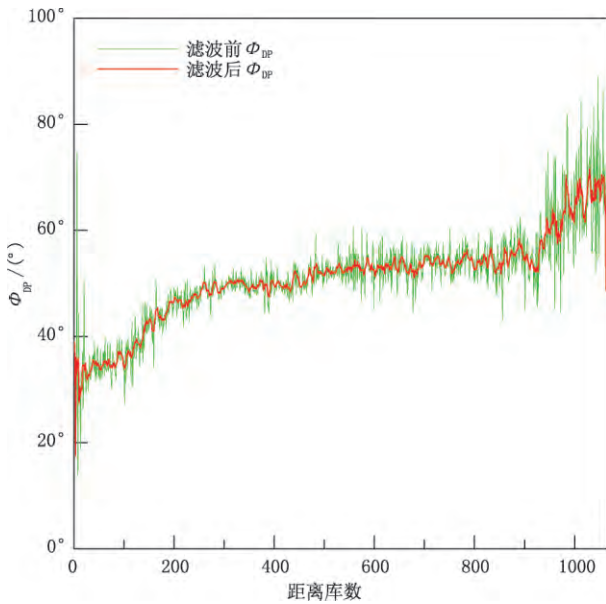
通过上面的坐标转换和插值处理, 已经可以将广州 S 波段雷达的数据处理到佛山 X 波段雷达的 PPI 图上(图 2, 彩页)。由于雨区衰减是叠加的, 在靠近雷达的前几十个距离库的数据值受衰减影响非常小, 可以认为是准确的。通过比较处理后的 S 波段雷达数据和佛山 X 波段雷达所有径向前 10 个距离库的反射率值和差分反射率值, 得出佛山的雷达的反射率值平均高出 2.5 dBz, 差分反射率值平均高出 0.6 dB。将上面得出的系统误差加入到衰减订正的算法中, 从而更好地验证订正效果。

3 订正结果分析

在 2016 年 5 月 6 日, 佛山附近地区有一次较强的降雨过程。就用这一次降水过程来验证这几种衰减订正方法的效果, 选取的数据时刻是 11:32。

由图 3(彩页)可以看出, 在方位角 30°~35°左右, 有一块区域是没有数据的, 造成这一结果的原因有可能是地形、建筑物、树木对雷达射线造成了遮挡。

从图 3a 中可以看出, 在区域 A 有很强的回波, 达到了 40~50 dBz, 所以造成了区域 A 雷达的远端受衰减影响只有 15~30 dBz, 同样在图 3b 中, 差分反射率 Z_{DR} 在区域 A 中也受到衰减的严重影响。从图 3c 中可以看出区域 A 的 K_{DP} 达到了 3 deg/km 以上, 而且在雷达的远端也有比较大的值, 但对应图 2a 的雷达远端地区则反射率却低于 20 dBz。图 3c 的 K_{DP} 大值区域 B 和区域 A 的值类似, 但是在图 3a、b 中对应的区域 B 的 Z_H 只有 15~35 dBz, Z_{DR} 值也较小, 与区域 A 的 Z_H 和 Z_{DR} 相比小了很多。这种 K_{DP} 相似值的区域之间 Z_H 、 Z_{DR} 的不同是由于这片区域受到雷达前端强回波区域的严重衰减的影响。

图 1 滤波前后的 ϕ_{DP}

注意到图 3 的 PPI 图的仰角为 1.49° , 选取了 1000 个距离库 (75 km) 的偏振参量数据, 在远端 75 km 所对应的高度为 1.96 km, 是低于当地零度层高度 (4 km 以上), 所以不用考虑零度层的影响。

图 4a、b (彩页) 是对广州 S 波段双线进行坐

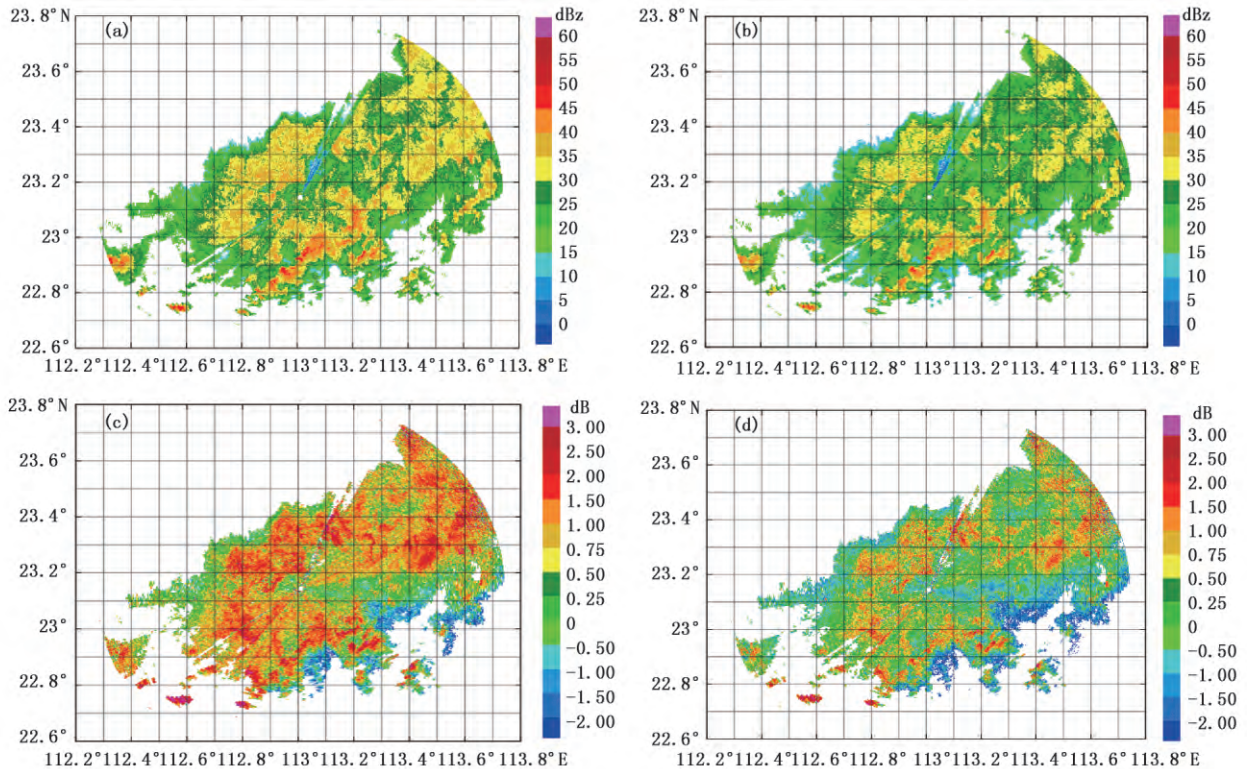


图 2 2016 年 5 月 6 日 11:32 修正系统误差前后佛山 X 波段雷达 PPI 图: (a) Z_H , (b) 修正后 Z_H , (c) Z_{DR} , (d) 修正后 Z_{DR} (中心点为雷达位置, 仰角 1.49° , 下同)

标转换和插值处理后的 Z_H 、 Z_{DR} PPI 图, 中心的空白是由于两部雷达高度和仰角的差异造成的数据空白区域。由图 4a 可以看出强回波 ($45 \sim 55$ dBZ) 主要集中在区域 A 和区域 B, 与图 3c 的 K_{DP} 大值区域位置吻合。图 4b 是转换坐标及插值处理后的 Z_{DR} PPI 图, 大值区域 ($1.5 \sim 2.5$ dB) 主要集中在区域 A, 区域 B 也存在一些大值。

图 5 (彩页) 给出了经过 $Z_H - K_{DP}$ 法订正后的 Z_H 和 Z_{DR} , 与图 3a、b 和图 4a、b 相比较, 区域 A 订正后的反射率最强的达到了 40 dBZ 以上, 并且 40 dBZ 区域明显增大, 但是在对应图 3c 中 K_{DP} 的大值区域订正不够, 特别是区域 A 的雷达远端地区, 订正后的反射率还是在 30 dBZ 以下, 并且由图 4a 可以看出, 对应区域的反射率在 45 dBZ 以上。区域 A 的 Z_{DR} 大值区也明显增大了, 但是依然存在远端区域订正值不够的问题。区域 B 中, 经过订正的反射率值集中在 35 dBZ 以上, 最强达到了 40 dBZ 左右, 与图 3c 的 K_{DP} 大值区域相对应。差分反射率 Z_{DR} 的值也由负值订正到正值以上。总体来说, 经过 $Z_H - K_{DP}$ 法订正后, 反射率和差分反射率都得到了有效的订正, 但是存在远端区域订正值不够的问题。

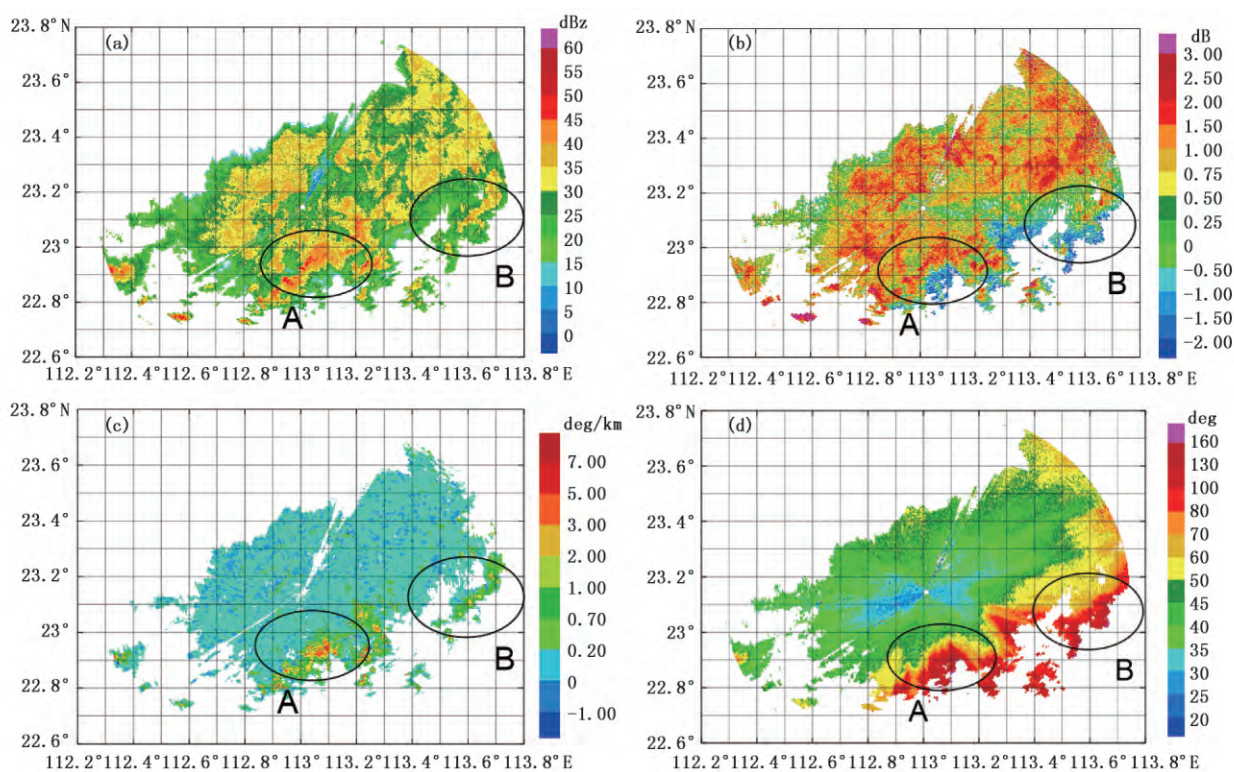


图 3 2016 年 5 月 6 日 11:32 佛山 X 波段雷达偏振参量 PPI 图:(a) Z_H ,(b) Z_{DR} ,(c) K_{DP} ,(d) Φ_{DP}

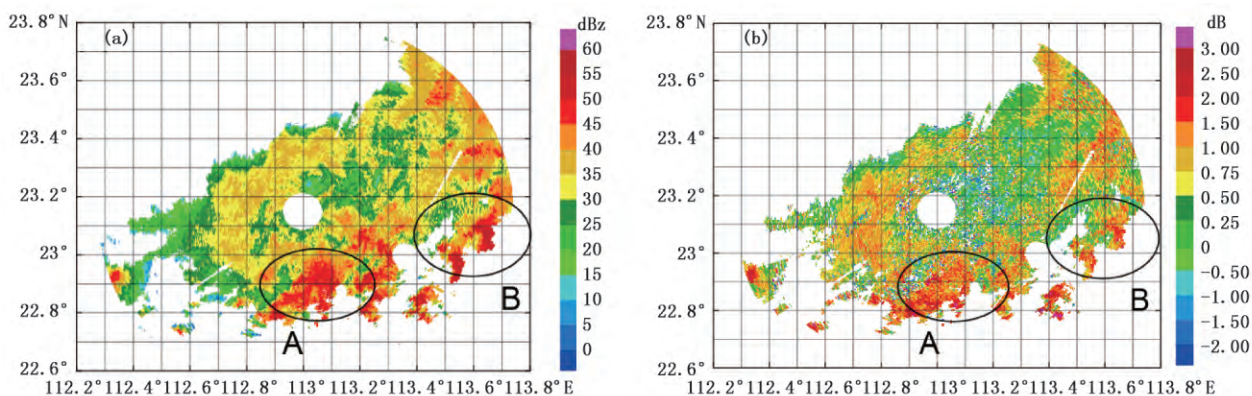


图 4 广州 S 波段雷达坐标转换后 Z_H (a), Z_{DR} (b) PPI 图

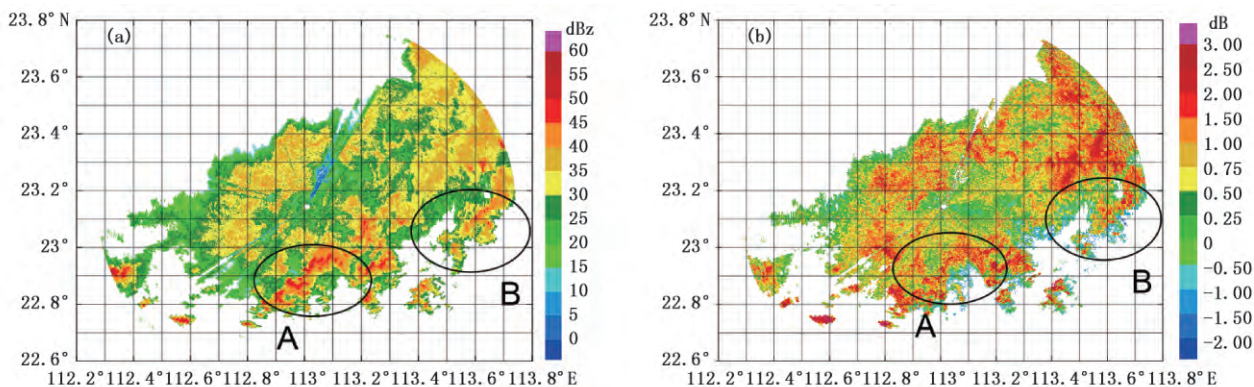


图 5 $Z_H - K_{DP}$ 法订正后 Z_H (a)和 Z_{DR} (b) PPI 图

图6(彩页)给出了降水廓线法(ZPHI)订正后的 Z_H 和 Z_{DR} ,分别采用的分段方法为整段法,20库法(1.5 km),80库法(6 km)。将图4a、5a与图6a、6c、6e相比较,可以看出 Z_H-K_{DP} 法与3种不同分段的ZPHI法的订正反射率效果的不同。区域A订正后的 Z_H 为50~55 dBz区域面积明显小于ZPHI法, Z_H-K_{DP} 法在区域A远离雷达的远端的订正效果不好,从图5a的A区域可以看出 K_{DP} 所对应的大值区域的 Z_H 值并没有订正完全,但是ZPHI在这一点上要明显优于 Z_H-K_{DP} 法,在区域B也是同样的结果,与作为标准的S波段雷达的图4a、4b

吻合度较高。可以看出, Z_H-K_{DP} 法虽然能够对 Z_H 进行明显的订正,但是在经过了强回波衰减的区域远端存在订正值不够的缺陷,并且整体的订正值比ZPHI值要小。将图4b、5b与图6b、6d、6f相比较, Z_{DR} 订正效果也是整段ZPHI订正法、20库ZPHI订正法和80库ZPHI法的效果较好。虽然 Z_H-K_{DP} 法也能够对 Z_{DR} 进行订正,但是在存在同样的问题:区域A远离雷达的区域不能够进行有效订正,存在订正值不够的问题。在区域B,几种订正法的效果都不错,其中整段ZPHI订正法、20库ZPHI订正法效果较好,与图4b比较吻合。

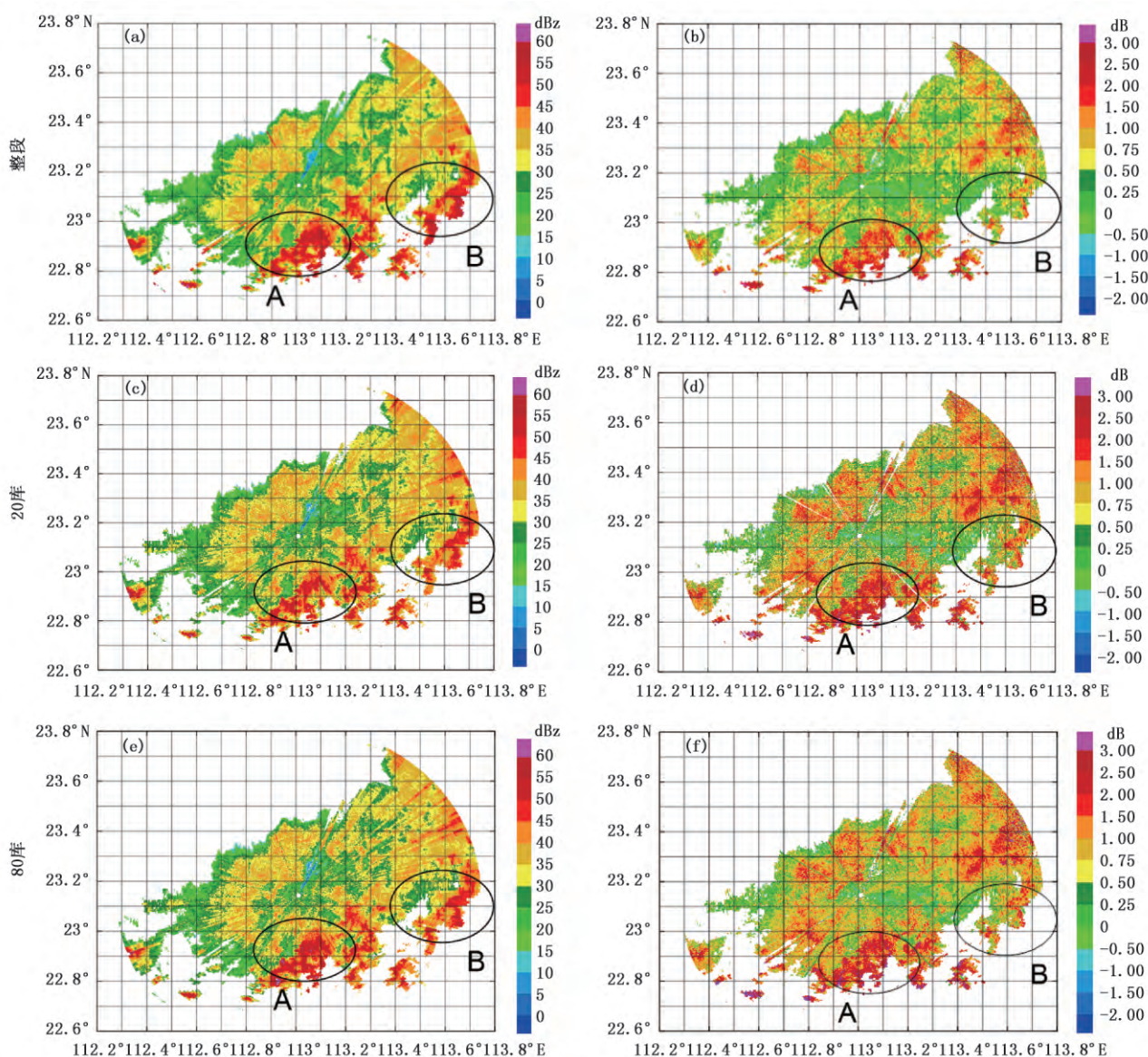


图6 3种分段ZPHI订正法订正后的 Z_H (a,c,e)、 Z_{DR} (b,d,f)PPI图

综上所述,对 Z_H 、 Z_{DR} 的订正效果,整段 ZPHI 订正法、20 库 ZPHI 订正法的效果较好,80 库 ZPHI 法的效果较好次之,而 Z_H-K_{DP} 法效果不如前 3 种方法,存在订正值不够的问题,特别是经过雨区的强衰减的远端区域不能够进行准确订正。ZPHI 假定雨区段的 N_0^* 是个常量,实际上,它是个变化很大的参数,所以如果分段太大,则 N_0^* 变化太大;另外,由于雷达数据质量的问题,80 库法会剔除掉较大一部分的不符合雨区分段条件的库,会对订正效果产生影响,所以,从上面的分析结果来看,整段 ZPHI 订正法这几种订正法中最优的。下面还要从定量角度来分析,通过比较不同订正方法的订正后的数据与作为标准的 S 波段点对点对应的雷达数据的相对偏差,相关系数等统计量来进行订正效果分析。

图 7(彩页)给出了 2016 年 5 月 6 日 11:32:13 X 波段双偏振雷达在 160° 方位观测以及不同订正法订正后的 Z_H 。从图 7a 可以看出 Z_H-K_{DP} 法的在前 300 个距离库的订正效果良好,与 S 波段雷达的反射率折线接近。从两部雷达的反射率折线图可以看出,在超过 300 个距离库以后,衰减是非常严重的,但是 Z_H-K_{DP} 法的订正值偏小,与 S 波段雷达的反射率的误差最大达到了 25 dBz。从图 7b 可以看出整段 ZPHI 订正法的订正效果在整个径向上都非常好,订正后的 Z_H 与 S 波段的反射率折线走势相吻合,特别是在 300 个距离库以后的区域,在 Z_H-K_{DP} 法不能够有效进行订正的距离进行了有效且准确的订正,订正值最大达到了 30 dBz。图 7c 为 20 库 ZPHI 订正法的反射率径向分析图,在前 380 个距离库的订正效果与整段 ZPHI 法类似,在最后的 250~400 个距离库,订定量要比整段法高,与 S 波段雷达的数据比较吻合。图 7d 是 80 库 ZPHI 订正法,效果与 20 库 ZPHI 法类似,订正效果较好。

从图 8a(彩页)可以看出, Z_H-K_{DP} 法对 Z_{DR} 的订正效果在 300 个距离库以后的距离上不好, X 波段雷达的 Z_{DR} 与 S 波段雷达的 Z_{DR} 差大约 2 dB 左右,但是 Z_H-K_{DP} 法只能订正大约 0.5 dB 左右,所以造成了在径向的远端对 Z_{DR} 的订正不够的问题。从图 8b、c 和 d(彩页)可以看出,整段 ZPHI 法、20 库 ZPHI 法和 80 库 ZPHI 法对 Z_{DR} 的订正效果良好,特别是在 Z_H-K_{DP} 法订正效果不好的 300 个距离库后的区域,也能够进行有效订正,但是在径向的末端,订正值过高,比 S 波段雷达 Z_{DR} 高大约 1~1.5 dB。

不同订正方法的订正后的径向数据与作为标准的 S 波段的雷达数据的绝对偏差、相对偏差,标准差、相关系数见表 1 和 2。

表 1 订正前后的 Z_H 与 S 波段的误差及相关系数

	平均值	绝对偏差	相对偏差	标准偏差	相关系数
	dBz	dBz	%	dBz	
订正前	31.22	10.15	24.5	9.88	0.205
Z_H-K_{DP} 法	31.27	10.10	24.4	8.00	0.495
整段 ZPHI 法	35.57	5.80	14.0	4.33	0.922
20 库 ZPHI 法	38.78	2.59	6.3	4.84	0.930
80 库 ZPHI 法	40.29	1.08	2.6	4.83	0.924
S 波段	41.37				

从表中平均值来看,20 库 ZPHI 法和 80 库 ZPHI 法与 S 波段雷达的 Z_H 最接近,相对偏差也是最小的,分别是 6.3%和 2.6%。但是平均值没法反应数据与标准值的差值的波动性,还要参考 Z_H 订正值与 S 波段雷达的 Z_H 的差值的标准差,由表格可以看出整段 ZPHI 法、20 库 ZPHI 法和 80 库 ZPHI 法与 S 波段数据差值的标准差较小,说明订正后的数据与 S 波段数据吻合度较高。通过比较不同订正方法的订正值与 S 波段数据的相关系数,可以得出整段 ZPHI 法、20 库 ZPHI 法和 80 库 ZPHI 法的相关系数都能达到 0.92 以上,说明订正后的数据与作为标准的数据之间相关性较强。

表 2 订正前后 Z_{DR} 与 S 波段的误差及相关系数

	平均值	绝对偏差	相对偏差	标准偏差	相关系数
	dB	dB	%	dB	
订正前	0.77	0.35	31.25	1.80	-0.325
Z_H-K_{DP} 法	0.67	0.45	40.18	1.46	-0.009
整段 ZPHI 法	1.31	0.19	16.96	0.90	0.564
20 库 ZPHI 法	1.85	0.73	65.18	0.96	0.604
80 库 ZPHI 法	1.71	0.59	52.68	1.03	0.584
S 波段	1.12				

由表 2 可以看出:整段 ZPHI 法对 Z_{DR} 的订正最接近 S 波段雷达,相对偏差最小,而且与 S 波段数据偏差的标准差也最小,虽然相关系数不是最高的,但是总体来说还是整段 ZPHI 法对 Z_{DR} 的订正效果最好。其他几种方法存在相对偏差过大,与 S 波段数据相关性太弱等问题。

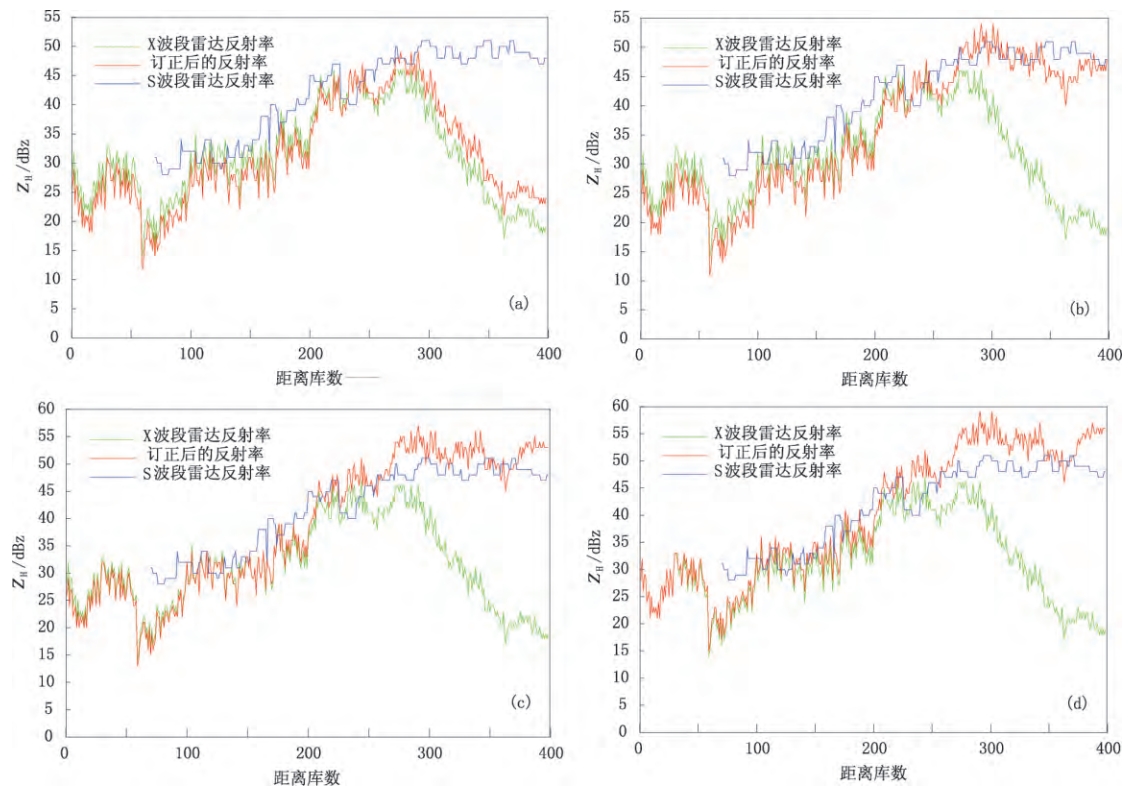


图7 2016年5月6日11:32:13 X波段双偏振雷达 160° 方位角衰减订正前后的 Z_H :

(a) $Z_H - K_{DP}$ 法, (b)整段 ZPHI 法, (c)20 库 ZPHI 法, (d)80 库 ZPHI 法

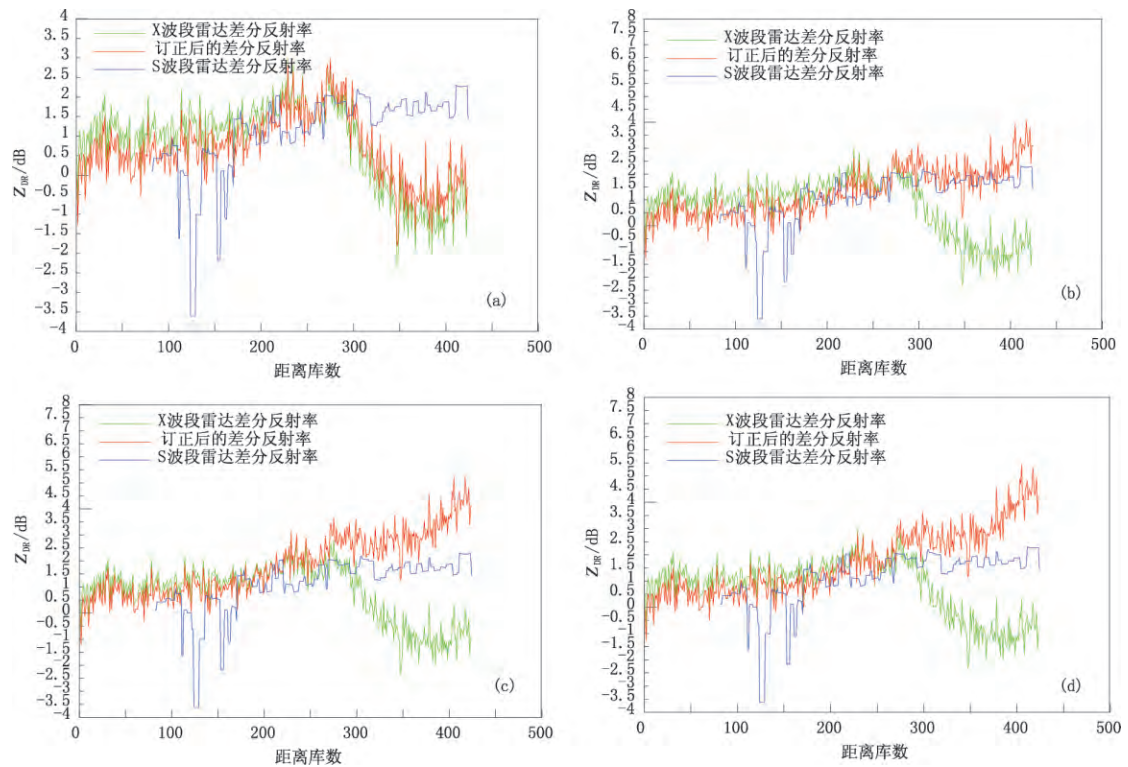


图8 2016年5月6日佛山 X波段双偏振雷达 160° 方位角衰减订正前后的 Z_{DR} :

(a) $Z_H - K_{DP}$ 法, (b)整段 ZPHI 法, (c)20 库 ZPHI 法, (d)80 库 ZPHI 法

4 结论与讨论

本文采用 $Z_H - K_{DP}$ 法, 整段 ZPHI 法, 20 库 ZPHI 法, 80 库 ZPHI 法 4 种衰减订正方法, 利用佛山 X 波段双线偏振雷达数据进行对比分析, 将广州 S 波段双线偏振雷达数据处理到佛山 X 波段雷达的数据格点上, 从而形成一一对应的数据对, 并且消除了两部雷达的系统误差, 作为标准分析不同订正法的效果, 得出以下几点结论:

(1) $Z_H - K_{DP}$ 法, 整段 ZPHI 法, 20 库 ZPHI 法, 80 库 ZPHI 法都能够对 Z_H 、 Z_{DR} 进行有效订正, 效果明显。

(2) 通过分析径向数据的折线图, $Z_H - K_{DP}$ 法存在订正值不够的问题, 特别是在强回波区域的远端的区域, 不能够进行有效的订正。

(3) 整段 ZPHI 法、20 库 ZPHI 法和 80 库 ZPHI 法的 Z_H 订正效果最好, 特别是 $Z_H - K_{DP}$ 法不能够有效订正的区域也能够订正到准确值, 与 S 波段雷达的数据吻合度较好, 经过对大量数据进行数理统计, 反射率 Z_H 的相对偏差在 5.5% 以下, 相关系数大于 0.82, 明显优于 $Z_H - K_{DP}$ 法。 Z_{DR} 订正效果还存在一定问题, 比如相对误差较大, 相关系数较小, 需要对订正算法进行优化。

(4) 不同分段方法对订正效果有比较大的影响, 特别是在 Φ_{DP} 数据质量不高的情况, 不同的分段方法导致了 $\Delta\Phi_{DP}$ 的不同, 从而订正效果差异较大, 此时倾向于采用整段 ZPHI 法, 减少 Φ_{DP} 数据质量问题引起的订正误差。如果 Φ_{DP} 数据质量较好, 倾向于采用 20 库 ZPHI 法和 80 库 ZPHI 法, 因为毕竟雨区分段过长, 截断常数 N_w 则不是常数了, 导致订正误差的出现。

总体来说, 3 种分段方法的 ZPHI 订正法通过运用 $\Delta\Phi_{DP}$ 能克服 $Z_H - K_{DP}$ 法的一些缺陷, 可以使 X 波段双线偏振雷达的强衰减问题得到明显改善, 从而提高降水估测的精度。

参考文献

[1] Park S G, Bringi V. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I: Theoretical and empirical basis [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(11): 1622.

- [2] Park S G, Maki M, Iwanami K, et al. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part II: Evaluation and application [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22 (11): 1633-1655.
- [3] Hitschfeld W, Bordan J. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths [J]. Journal of Meteorology, 1954, 11(1): 55-67.
- [4] Bringi V N, Chandrasekar V, Balakrishnan N, et al. An examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2009, 7(7): 829-840.
- [5] Ryzhkov A, Zrnic D S. Precipitation and attenuation measurement at a 10-cm wavelength [J]. Journal of Applied Meteorology, 1995, 34(10): 2121-2134.
- [6] Testud J, Bouar E L, Oblis E, et al. The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2000, 17(3): 332-356.
- [7] Bouar E L, Testud J. Validation of the rain profiling algorithm "ZPHI" from the c-band polarimetric weather radar in darwin [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18 (18): 1819-1837.
- [8] Testud J. The concept of "normalized" distribution to describe raindrop spectra: a tool for cloud physics and cloud remote sensing [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(40): 1118-1140.
- [9] Bringi V N, Chandrasekar V. Polarimetric doppler weather radar [M]. London: Cambridge University Press, 2001: 159-160.
- [10] 胡志群, 刘黎平, 楚荣忠. X 波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究 [J]. 气象学报, 2008, 66 (2): 251-261.
- [11] 毕永恒, 刘锦丽, 段树, 等. X 波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正 [J]. 大气科学, 2012, 36(3): 495-506.
- [12] 赵世颖, 李柏, 陈晓辉, 等. 基于交叉-平行法的双线偏振雷达差分反射率硬件定标 [J]. 气象科技, 2015, 43(5): 775-782.
- [13] 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): 854-861.
- [14] 郑佳峰, 张杰, 朱克云, 等. 双偏振雷达测雨误差及水凝物识别分析 [J]. 气象科技, 2014, 42(3): 364-372.
- [15] Chandrasekar V, Lim S. Simulation of path-integrated attenuation for X-band rainfall observation for S-band radar data [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2006, 23(9): 1195-1205.
- [16] 吴翀, 刘黎平, 张志强. 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, 2014, 42 (2), 391-395.

(下转第 15 页)

Correction Method of Short-Term Wind Speed in Wind Farm Research Based on PCA and RBF Neural Network

Deng Hua^{1,2,3} Zhang Yingchao^{1,2} Gu Rong^{1,2} Huang Fei^{1,2} Zhi Xingliang^{1,2}

(1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 2 Jiangsu Key Laboratory of Big Data Analysis Technology, Nanjing 210044; 3 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Ministry of Education, Nanjing 210044)

Abstract : Wind speed is the most important input factor of wind power forecasting, and the accurate wind speed forecasting is the premise and foundation of wind power prediction. In order to improve the accuracy of short-term wind speed forecasting, the WRF model is used to predict the wind speed of a wind farm along the east coasts of China. Besides, the WRF model forecasted wind direction, air temperature, barometric pressure and other meteorological factors are combined by the PCA-RBF algorithm to further correct the forecasting wind speed. The results show that, after the correction of the PCA-RBF algorithm for the wind speed forecasting of the WRF model, the error of wind speed forecasting becomes smaller, and the relative root mean square error is reduced by 20% to 30%, and the relative mean absolute error is decreased by 15% to 20%. The PCA-RBF algorithm is qualified with better correction for the wind speed of WRF model forecasting compared with other intelligent algorithms (BP algorithm, LSSVM algorithm), and improves the accuracy of wind speed forecasting effectively.

Keywords : WRF model; PCA algorithm; RBF neural network algorithm; wind speed correction

.....
(上接第 9 页)

Comparison of Different Attenuation Correction Methods Using X-band Dual Polarimetric Radar

Wang Han^{1,2,3} Liu Liping² Zhang Yang^{2,4}

(1 Meteorological Observation and Technical Support Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310017; 2 State Key of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 3 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225; 4 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract : The attenuation of X-band dual polarimetric radar is the main problem in application of echo strength and differential reflectivity factor (Z_H and Z_{DR}). It has a strong impact on the radar detecting precision and rainfall estimation. In consideration of the quality problem of K_{DP} in the low SNR situation, we used four kinds of attenuation correction methods: $Z_H - K_{DP}$ and three kinds of segmented ZPHI methods. To have a better judgment of the Foshan X-band radar correction results of different methods, we used the data of the Guangzhou S-band radar as standards. But due to the different position information of two radars, the S-band radar data must be processed by coordinate conversion and interpolation processing. Then we got data pairs with same elevation, azimuth and range. After qualitative and quantitative analysis, we find that ZPHI is superior to $Z_H - K_{DP}$ in relative deviation and correlation coefficient.

Keywords : X-band dual-linear polarimetric radar; attenuation correction; $Z_H - K_{DP}$ correction method; ZPHI correction method