

# 利用极化参数订正天气雷达部分遮挡区域的算法研究

张丽洁, 王 旭

(成都信息工程大学, 四川 成都 610225)

**摘要:** 基于提高天气雷达探测准确度的目的, 利用极化参数对部分遮挡区域进行订正。通过使用成都信息工程大学 X 波段双极化雷达实际接收到的降水数据进行验证, 结果表明, 利用该方法得到的反射率因子径向偏差接近正常值, 订正后部分遮挡区域的反射率因子和相邻的未遮挡区域的反射率因子呈现出较好的连续性, 体现算法的有效性。

**关键词:** 信号处理; 天气雷达; 极化参数; 部分遮挡; 订正

## 0 引言

利用天气雷达探测天气并进行分析预报预警必须以雷达的精确性为基础, 但是, 天气雷达在实际探测过程中, 其测量结果不仅受到雷达性能、大气折射以及各种衰减的影响, 还会受到雷达探测周围建筑物以及复杂地形的遮挡影响, 导致天气雷达波束被部分或全部遮挡, 在天气雷达回波图像上出现部分区域数据不连续的特征, 进而严重影响雷达基数据的质量以及由基数据导出的二次产品的数据质量<sup>[1]</sup>。有效地消除部分遮挡的影响, 对提高雷达产品的质量特别是定量降水估计的质量有重要意义。

双极化天气雷达有单通道和双通道方式, 单通道数据率较低, 系统结构相对简单; 双通道数据率相对于单通道来说较高, 但是系统结构相对复杂<sup>[2]</sup>。双极化天气雷达具有测量不同极化反射率的能力, 它发射两种相互正交的线极化波对气象目标进行探测<sup>[3]</sup>, 接收水平和垂直发射的回波偏振反射率因子  $Z_H$  和  $Z_V$ , 从而可以测量水凝物的多种极化参量。对具有多普勒性能的雷达而言, 还可以估测水平和垂直极化波返回的相位差, 即双程差分传播相位  $\Phi_{DP}$ 。此外, 还可以测量以下极化参量: 差分反射率因子  $Z_{DR}$  和比差分相位  $K_{DP}$  等<sup>[4]</sup>。

2000 年, Carey 等<sup>[5]</sup> 基于双程差分传播相位  $\Phi_{DP}$  不受 PBB (partial beam blockage, 部分波束遮挡) 影响的基础, 研究出相应的 QPE (quantitative precipitation estimate, 定量降水估计) 算法。2005 年, Ryzhkov 等<sup>[6]</sup> 提出, 在降水中, 水平通道的反射率因子  $Z_H$  和比差分相位  $K_{DP}$  之间呈自身一致关系, 并指出差分反射率因子

$Z_{DR}$  也受 PBB 的影响。2009 年, Lang 等<sup>[7]</sup> 根据  $Z_H$  和  $K_{DP}$  之间自身一致性的概念订正了错误标校、衰减和部分遮挡引起的反射率因子偏差。业务上, 经常用距离库填充法以及在遮挡范围内进行数据插补的方法对受到遮挡的区域进行订正。使用极化参量订正部分遮挡区域的方法计算简单, 随着 WSR-88D 组网升级为具有双极化性能的雷达, 在存在部分遮挡的区域, 利用该方法能够提高雷达 QPE 和估测 VIL (vertically integrated liquid water, 垂直累积液态含水量) 的精确度<sup>[8]</sup>, 使探测结果更加精确。

## 1 部分遮挡和全部遮挡

文中研究对部分遮挡区域进行订正的算法, 完全遮挡的区域因为在订正前回波图中没有回波信息, 在订正算法实现过程中完全遮挡部分没有可以提取的信息, 进而无法使用该算法进行订正。图 1 给出部分遮挡和全部遮挡的示意图。

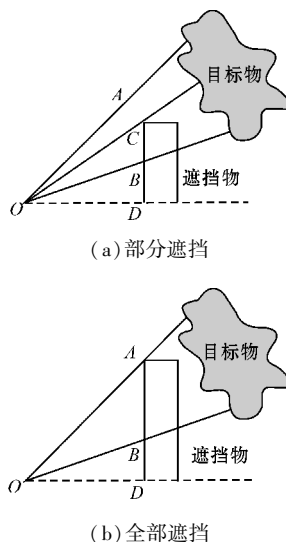


图1 部分遮挡和全部遮挡示意图

图中,AOB为雷达某一个波束宽度对应的扫描范围,O为雷达发射源。由图1(a)可以看出:当该波束扫描范围内的遮挡物高度低于该波束所对应的上边界高度而高于该波束所对应的下边界高度时,就形成部分遮挡,即图中 $DB < DC < DA$ ,DC表示遮挡物的高度,DA和DB分别表示该波束所对应的上边界和下边界高度。由于部分遮挡,雷达产生的电磁波能量,在到达遮挡物距离位置时,只有不受遮挡物阻碍的那部分能量能够向着远离雷达的区域传播,即图中的AOC部分,当雷达能量遇到位于遮挡物后的目标物时,部分后向散射能量返回雷达,由于在传播过程中BOC部分的波束能量受到遮挡物的阻挡无法到达其后的目标物,导致雷达接收到的回波减弱,所测得的回波强度比实际值小,产生测量误差。由图1(b)可知:当该雷达波束范围内的遮挡物高度大于或等于该雷达波束上边界所对应的高度时,形成全部遮挡。显然,由于雷达发射的能量在该范围内全部受到遮挡,则没有能量抵达遮挡物之后的目标,此时雷达无法接收到遮挡物后面的目标物的后向散射能量,在雷达回波图上显示为无回波区域,此时,只能用较高仰角的数据对其进行订正或使用相邻其他雷达站的数据对其进行订正。

## 2 订正算法原理及实现

基于在降水中反射率因子 $Z$ 和比差分相位 $K_{DP}$ 之间一致性的关系,利用双极化方法可以订正由于部分遮挡而减小的反射率因子。在实际应用中,为了避免受到中到大雨地区的约束,使比差分相位 $K_{DP}$ 的估算更加准确,在计算过程中就要在足够大的时间或空间范围内对 $K_{DP}$ 、反射率因子 $Z$ 等进行积分<sup>[9]</sup>,以减小偏差,同时为了计算简便,沿着雷达数据的径向进行积分。基于对 $K_{DP}$ - $Z$ 关系的应用,求出未受遮挡以及遮挡区域的参数 $a$ 和 $a_B$ ,从而求得每个受遮挡径向的遮挡率以及反射率因子的径向偏差,最后进行补偿,达到订正目的,下面介绍具体算法。

### 2.1 订正算法原理

1997年,Ryzhkov等<sup>[10]</sup>得出 $K_{DP}$ 和 $Z$ 之间有以下关系:

$$K_{DP} = aZ^b \quad (1)$$

该式是双极化雷达雨量估计的一种算法,其中雨强参数 $a$ 、 $b$ 与降水性质(层状云、雷阵雨、地形雨等)密切相关。式中,参数 $a$ 由未受遮挡的径向上的数据决定,是一个平均值,即求得每个未受遮挡径向的 $a$ 值后,对这些 $a$ 值求和再除以未受遮挡的径向数得到。Pengfei

Zhang等<sup>[11]</sup>指出 $b$ 值取为0.72。

反射率因子 $Z$ 的值借助回波功率间接计算。首先获取每个距离库的平均功率,该平均功率即为每个距离库的回波功率除以该距离库内的扫描个数,再利用雷达方程<sup>[12]</sup>,求出反射率因子:

$$Z = P_r R^2 / C \quad (2)$$

式中, $R$ 为目标物相对于雷达的距离(单位为km), $P_r$ 为从每一个距离库中返回的平均回波功率,回波功率可直接从回波信号中获得,计算 $I$ 和 $Q$ 的平方和即可得到回波功率,此处 $I$ 和 $Q$ 使用水平通道的数据。 $C$ 为系统增益常数,是由雷达体扫开始前通过标校获得的。根据式(2)求出 $Z$ 后,再利用式(3)将反射率因子的单位转换为dBZ:

$$dBZ = 10 \log Z \quad (3)$$

在计算双程差分传播相位时,要用到复数形式的后向散射信号,该复数中 $I$ 为实部, $Q$ 为虚部,IQ数据有水平和垂直两个通道。所以在实现过程中,计算双程差分传播相位之前,首先要对所读取的水平通道和垂直通道的IQ数据进行解码,以获取所需的水平和垂直通道的 $I$ 、 $Q$ ,方便后续的计算。双程差分传播相位的计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$\Phi_{DP} = \arg \left[ \frac{\langle S_{HH}^* S_{VV} \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH}|^2 \rangle \langle |S_{VV}|^2 \rangle}} \right] \quad (4)$$

式中, $S_{HH} = I_{HH} + iQ_{HH}$ , $S_{VV} = I_{VV} + iQ_{VV}$ ," $\langle \rangle$ "表示对一个径向内的数值取平均值。

得到反射率因子和双程差分传播相位后,计算参数 $a$ ,它是通过对比差分相位 $K_{DP}$ 和 $Z^b$ 沿径向方向的积分进行估算得到的,而不是基于未遮挡区域里 $Z$ 和 $K_{DP}$ 局部取值进行估计,这样无论在何种强度的降水中都能够做出可靠的一致性检验。参数 $a$ 的计算公式为

$$a = \frac{\Phi_{DP}(r_m) - \Phi_{DP}(r_0)}{2 \int_{r_0}^{r_m} Z^b(s) ds} \quad (5)$$

式中, $r_m$ 表示每个未受遮挡径向上最远距离处有效数据所在的距离库; $r_0$ 表示每个未受遮挡径向上最近距离处有效数据所在的距离库。回波功率大于噪声时得到的数据称为有效数据,回波功率小于噪声时认为该距离库位置处的数据无效,计算参量 $a$ 时无效数据不参与运算,也不做补偿订正。另外,在求分母过程中,由于参与运算的是某个径向每个距离库上的反射率因子,是离散值,所以在计算中,积分运算就转换为对某个径向上的有效反射率因子作累加,后续求 $a_B$ 时也同样处理。

BBF表示波束遮挡率,在受到部分遮挡的区域,分母反射率因子写成 $(1-BBF)$ 与未受遮挡的反射率

因子  $Z$  的乘积,因为受遮挡的径向相对于未受遮挡的径向其反射率因子减小。此时,将  $a$  重新定义为  $a_B$ 。做出上述改变后,获取参数  $a_B$  的公式如下:

$$a_B = \frac{\Phi_{DP}(r_m) - \Phi(r_{OB})}{2 \int_{r_{OB}}^{r_m} [(1 - BBF)Z(s)]^b ds} \tag{6}$$

式中, $r_{OB}$ 表示每个受遮挡径向上最近距离处有效数据所在的距离库。得到  $a$  和  $a_B$  的值后,即可计算波束遮挡率  $BBF$  和反射率因子径向偏差  $\Delta Z$ 。公式如下:

$$BBF = 1 - \left(\frac{a}{a_B}\right)^{\frac{1}{b}} \tag{7}$$

$$\Delta Z(dB) = \frac{10}{b} \log\left(\frac{a_B}{a}\right) \tag{8}$$

值得注意的是,这两个参量均为沿每个受遮挡径向的数据。得到反射率因子径向偏差之后,将得到的结果加到之前所求得的受遮挡径向的反射率因子上,即得到最终补偿后的反射率因子,达到部分遮挡订正的目的。

2.2 订正实现步骤

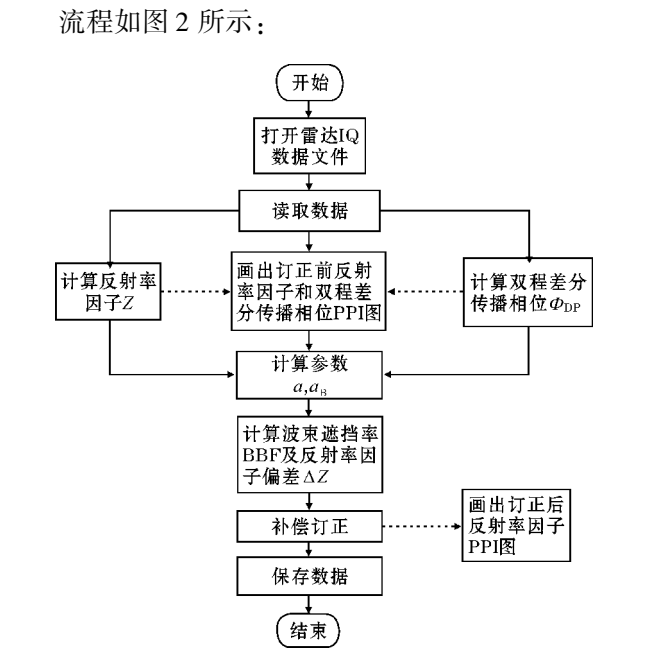


图2 双极化雷达中对部分遮挡区域进行订正的程序流程图

实现步骤如下:首先,打开 IQ 数据文件,对数据解码,获得后面计算所需要的水平和垂直通道的 IQ 数据,同时读出文件中的起始距离库数、起始方位角、起始俯仰角等信息,方便后面使用;然后,利用读取的水平和垂直通道的 IQ 数据计算反射率因子和双程差分传播相位;再绘图显示双程差分传播相位和反射率因子,这样不仅可以直观地看到计算出的反射率因子及双程差分传播相位,而且还可以检验所得结果的准确

程度,同时也方便后面作对比使用;最后,计算  $BBF$  和反射率因子径向偏差  $\Delta Z$ ,将该偏差加到之前受遮挡径向的反射率因子上,再将订正之后的反射率因子绘图显示,与之前反射率因子图比较,检验订正效果。

3 实例分析

文中所用的数据来自成都信息工程大学 X 波段双极化雷达<sup>[14]</sup>,该波段雷达波长较短,对小尺寸的水凝结物反应度较高。数据采集时间为 2012 年 5 月 11 日晚 9 时 42 分,仰角为 1.5°,图 3 为其对应的反射率因子。数据采集参数如下:脉冲重复频率为 500 Hz,最大不模糊距离是 300 km,360 个径向,每个径向上的扫描个数为 84。由扫描图可以直观看出遮挡区域有两个:大概方位为 183°~213°,273°~287°,如图中射线区域所示。其中在 190°~213°计算出的径向反射率因子偏差为负数,考虑有杂波存在,由于有杂波的影响,在此对该部分不进行订正。图 4 为双程差分传播相位 PPI 图。

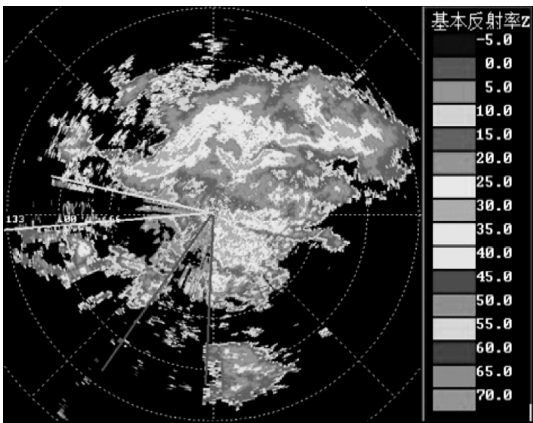


图3 反射率因子 PPI 图

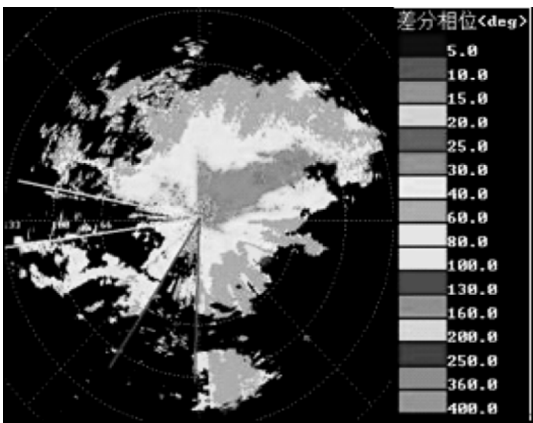


图4 双程差分传播相位 PPI 图

下面给出定量的分析结果,两部分遮挡区域所有径向上反射率因子偏差如表 1 所示。



表 1 部分遮挡区域内每个径向上的反射率因子偏差

径向号	183	184	185	186	187	188	189	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287
$\Delta Z$	20.75	20.57	16.07	26.78	10.92	25.26	10.67	7.02	4.15	4.76	5.61	6.74	0.44	8.35	4.54	1.45	1.26	17.14	5.33	16.16	10.52	14.85
/dBZ																						

为更清晰地观察订正效果,将部分遮挡区域分成两部分给出。图 5 和图 6 分别表示 183°~189°区域订正前后的效果图。

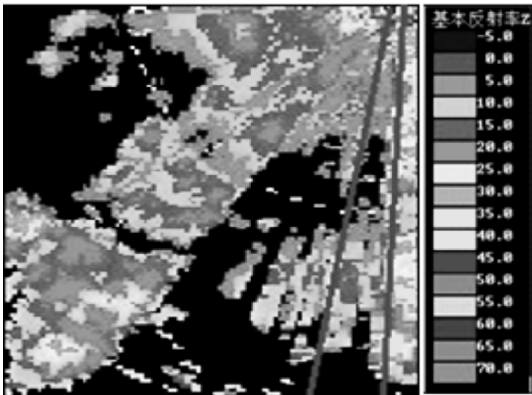


图 5 订正前反射率因子图

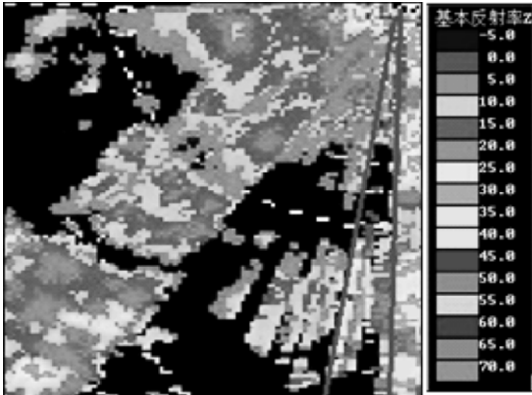


图 6 订正后反射率因子图

由图 5、图 6 可以看出,经订正后,该部分遮挡区域与附近区域反射率因子呈连续趋势,说明利用该算法对该数据的订正是成功的。下面再给出另一部分遮挡区域订正前后的反射率因子图,图 7、图 8 分别表示 273°~287°区域订正前后的效果图。

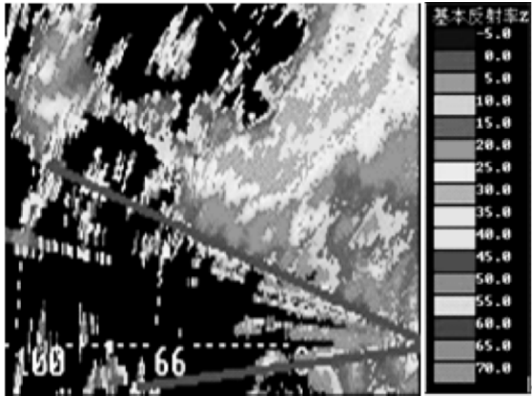


图 7 订正前反射率因子图

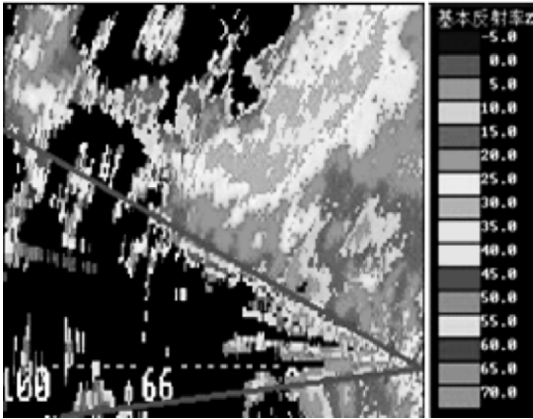


图 8 订正后反射率因子图

通过对比以上两图,从总体来看,利用该算法订正出来的结果比较接近正常值,特别是在该部分遮挡区域内方位值比较大的几个径向上,和与之相邻的未遮挡区域的反射率因子之间呈较好的连续性,体现了该算法的有效性。

通过实例分析,利用该订正算法订正出来的结果符合正常值,如果要得到更好的结果,需要先做地物杂波抑制,去除杂波的干扰<sup>[15]</sup>。

4 结论

目前,在业务上,对雷达回波中的部分遮挡区域进行订正已经成为一种十分必要的手段以更加精确地探测天气状况,减少人们的生产生活损失。文中对雨天采集到的雷达数据资料进行部分遮挡订正研究,研究结果表明:

- (1) 利用双极化方法得到的反射率因子径向偏差接近正常值,订正后部分遮挡区域的反射率因子和相邻的未遮挡区域的反射率因子呈现出较好的连续性,体现算法的有效性。
- (2) 没有考虑在径向范围增长的遮挡群的多重遮挡(比如两座或更多的山脉并列);由于地物杂波会影响反射率因子的订正效果,在低仰角时,不能忽略地物杂波这一因素,要判断清楚是否有地物杂波的存在,如果之前没有消除地物杂波,在对部分遮挡区域进行订正的时候,就不能考虑存在地物杂波的径向,否则会给订正结果带来很大偏差。

## 参考文献:

- [1] 勾亚彬,刘黎平,李瑞义,等. 基于雷达回波概率特征的雷达部分遮挡区域识别算法[J]. 高原气象,2015,34(2):556-567.
- [2] 吴欢,黄兴友. X波段双线偏振雷达回波强度衰减和地物回波识别订正[J]. 气象科学,2014,34(1):32-38.
- [3] 何宇翔,吕达仁,肖辉. X波段双线极化雷达差分反射率的衰减订正[J]. 高原气象,2009,28(3):607-616.
- [4] 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):22-31.
- [5] Carey L D, R Cifelli W A Petersen, S A Rutledge. Preliminary report on TRMM-LBA rainfall estimation using the S-Pol radar[C]. Dept. of Atmospheric Science Paper 697, Colorado State University, Fort Collins, CO, 2000.
- [6] Giangrande S E, A V Ryzhkov, Calibration of dual-polarization radar in the presence of partial beam blockage[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 2005,22:1156-1166.
- [7] Lang T, S Nesbitt, L Carey. On the correction of partial beam blockage in polarimetric radar data[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 2009,26:943-957.
- [8] 王红艳,刘黎平,何丽萍. 浙江山区新一代天气雷达波束遮挡分析[J]. 高原气象,2014,33(6):1737-1747.
- [9] Richard J. Doviak, Dusan S. Zrnica. 多普勒雷达与气象观测[M]. 北京:气象出版社,2013:106.
- [10] Alexander Ryzhkov, Dusan Zrnica, David Atlas. Polarimetrically Tuned R(Z) Relations and Comparison of Radar Rainfall Methods[J]. Journal of Applied meteorology, 1997,36.
- [11] Pengfei Zhang, Dusan Zrnica, Alexander Ryzhkov. Partial Beam Blockage Correction Using Dual-Polarimetric Measurements.
- [12] 李柏. 天气雷达及其应用[M]. 北京:气象出版社,2011:15.
- [13] Jonathan J. Gourley, Pierre Tabary, Jacques Parent Du Chatelet. Data Quality of the Meteo-France C-Band Polarimetric Radar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006,2.
- [14] 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.
- [15] 杨雷斌,吴裴裴,刘园园. 承德新一代天气雷达地物杂波特征及抑制方法研究[J]. 气象水文海洋仪器,2014,(1):15-18.