

文章编号: 2096-1618(2016)04-0363-04

# X波段双线偏振雷达反射率不同衰减订正法对比分析

王 晗<sup>1,2</sup>, 史 朝<sup>1</sup>, 滕玉鹏<sup>1,3</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 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. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘要:** X波段雷达的强衰减一直是影响其探测精度及推广应用的主要问题, 目的在寻找最优的衰减订正的方法, 实现对X波段雷达数据的实时衰减订正。利用中国气象科学研究院的X波段双线偏振雷达, 2016年5月在佛山南海外场试验取得的一批观测资料, 对国内外已有的一些订正方法的效果进行分析检验。为检验订正效果, 将同一时间的广州的S波段双偏振雷达数据作为标准, 为更好地比较, 将广州的S波段双偏振雷达数据进行坐标转换和插值处理, 从而得到与佛山雷达数据相对应的仰角, 方位角, 距离库的反射率值, 分析订正效果。选取一个径向的反射率值进行订正前后的数据定量分析, 并且与坐标转换后的广州S波段雷达同一个径向的反射率值进行横向比较。主要选取 $Z_H$ 订正法、 $K_{DP}$ 订正法、“ZPHI”降水廓线订正算法进行分析对比。分析表明, $K_{DP}$ 订正法、“ZPHI”订正法在订正效果上比较好, 优于 $Z_H$ 订正法。

**关键词:** X波段双线偏振雷达; 衰减订正; 反射率; 差分传播相移; 坐标转换

**中图分类号:** TN955+.2

**文献标志码:** A

## 0 引言

与S、C波段雷达相比,X波段双线偏振雷达具有成本低, 体积较小, 容易移动, 分辨率高等优点, 而且差分相移 $K_{DP}$ 是C波段,S波段的1.5倍和3.0倍<sup>[1]</sup>。但是, 由于X波段雷达波长短, 存在很强的雨区衰减<sup>[2]</sup>, 根据模拟结果,X波段的雷达衰减率( $A_H$ )是S波段,C波段雷达的7~8倍和10倍以上<sup>[3-4]</sup>, 在弱降水中的衰减也不能忽视。

Hitschfeld and Bordan<sup>[5]</sup>提出利用衰减系数 $K$ 和反射率因子 $Z$ 的关系, 进行衰减订正的方法。Meneghini<sup>[6]</sup>后来发展改进成迭代法, 但是效果不理想。吕达仁和林海<sup>[7]</sup>发展出新的迭代反演算法, 能够用常规雷达和微波辐射计探测雨水含量空间分布从而进行联合迭代反演订正, 效果良好, 但是有一定的局限性。Brangi<sup>[8]</sup>发现双偏振雷达可能通过 $K_{DP}$ 实现 $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 的衰减订正。Testud等<sup>[9]</sup>提出“ZPHI”降水廓线订正法, 该方法用分段区间的 $\varphi_{DP}$ 差值进行订正的计算。Brangi<sup>[10]</sup>提出“自适应约束”算法, 这种方法通过调整 $\varphi_{DP}$ 的观测值与计算值之间的差别<sup>[11]</sup>, 得到 $A_H$ - $K_{DP}$ 关系中的最佳系数, 具有较好的订正效果。

主要选取 $K_{DP}$ 订正法、 $Z_H$ 订正法、“ZPHI”降水廓线订正算法进行订正效果分析, 并且用一部相近的S波段双线偏振雷达数据进行对比。

## 1 X波段衰减订正方法

衰减率 $A_H$ 是衰减订正中一个很重要的量, 通过求 $A_H$ , 可以直接对反射率 $Z_H$ 进行订正:

$$Z_{He}(r) = Z_{Ha}(r) + 2 \int_0^r A_H(s) ds \quad (1)$$

### 1.1 $K_{DP}$ 订正法

此方法<sup>[12]</sup>主要用的雷达观测资料中的差传播相移 $K_{DP}$ :

$$K_{DP} = \text{Re}(k_H - k_V) \quad (\text{单位: deg/km}) \quad (2)$$

其中 $k_H$ 、 $k_V$ 分别为水平与垂直偏振波的传播常数。这种方法的原理是 $K_{DP}$ 与衰减率 $A_H$ 有着良好的线性关系:

$$A_H = a_1 K_{DP} \quad (3)$$

对于X波段双线偏振了点, Brangi通过数值模拟求得为0.247<sup>[8]</sup>, 从而订正后的 $Z_H$ 可以表示为

$$Z_{He}(r) = Z_{Ha}(r) + 2a_1 B_w \sum_{k=1}^{n_r} K_{DP}(k) \quad (4)$$

其中 $B_w$ 为库长(单位: km),  $n_r$ 为雷达探测距离库数。(4)式要对 $K_{DP}$ 进行处理: 将 $K_{DP} < q_1$ 及 $K_{DP} > q_2$ 的值认为是数据异常, 取零, 其中 $q_1 = 0.1 \text{ deg/km}$ ,  $q_2 = 3.0 \text{ deg/km}$ 。

### 1.2 $Z_H$ 订正法

$Z_H$ 订正法主要根据式(5):

$$A_H = \alpha Z_h^\beta \quad (5)$$

$Z_h$  取  $10^{ZH/10}$  ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ),  $\alpha, \beta$  分别为  $1.370 \times 10^{-4}$   $\text{dB}/\text{km}^0$  ( $\text{mm}^6/\text{mm}^3$ ),  $0.779$ <sup>[12]</sup>。

### 1.3 ZPHI 降水廓线订正法

Testud et al.<sup>[13]</sup> 提出“ZPHI 降水廓线订正算法”。ZPHI 订正法存在一个约束条件: 路径总雨区衰减 (PIA) 与整个分段区间 ( $r_1, r_2$ ) 里的  $\varphi_{DP}$  的变化是一致的。ZPHI 算法要进行雨区分段<sup>[14]</sup>, 在每分段区间里进行  $A_H$  的计算:

$$A(r) = \frac{Z_a^b(r_0)}{I(r_1, r_0) + (10^{0.1b\gamma\Delta\phi} - 1)I(r, r_0)} (10^{0.1b\gamma\Delta\phi} - 1) \quad (6)$$

其中:

$$I(r, r_i) = 0.46b \int_r^{r_i} Z_a^b(s) ds \quad (7)$$

## 2 衰减订正效果分析与对比

### 2.1 资料来源

雷达数据为佛山南海的 X 波段双线偏振雷达, 地点位于  $23.145^\circ\text{N}, 113.011^\circ\text{E}$ , 天线海拔高度为  $100\text{ m}$ , 雷达频率为  $9.464\text{ GHz}$ , 水平波束宽度为  $0.9$ , 雷达波束库长  $75\text{ m}$ , 用的第二层仰角, 仰角为  $1.494^\circ$ , 因为仰角较低, 在  $90\text{ km}$  处波束高度小于  $3\text{ km}$ , 小雨当地零度层亮带的高度。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, 地点位于  $23.00^\circ\text{N}, 113.36^\circ\text{E}$ , 天线海拔高度为  $179\text{ m}$ , 雷达频率为  $2.885\text{ GHz}$ , 水平波束宽度为  $1.494^\circ$ , 雷达波束库长  $250\text{ m}$ , 佛山雷达位于广州雷达的西偏北  $23.5^\circ$  左右, 距离  $39.7\text{ km}$ 。

Chandrasekar et al.<sup>[16]</sup> 认为 S 波段雷达基本上不存在雨区衰减, 除非在一些湿雹区。指出在瑞丽散射下, 反射率不会因频率的变化而变化。从而得出 S 波段和 X 波段对比的可行性。但是随着滴谱直径的增加, 因电磁波频率的不同, 米散射的影响开始变大, 从而造成反射率的值也会发生变化, 当反射率为  $30\text{ dBz}$  以上时, X 波段雷达反射率的测量值会比 S 波段雷达的测量值要高一些。

### 2.2 订正前后的 $Z_H$ 的 PPI 图像

首先, 要找出两部雷达的系统偏差, 根据广州 S 波段双偏振雷达的回波大小, 再对比佛山 X 波段双偏振雷达在衰减很小的前几十个距离库的反射率的大小可

以判断出: 佛山 X 波段双偏振雷达大约比广州 S 波段双偏振雷达高  $2.5\text{ dBz}$  左右, 认为是系统偏差, 加入到订正方法中。

2016 年 5 月 6 日上午, 雷达探测到一次大面积的降水云。图 1 为广州 S 波段双偏振雷达的原始反射率数据, 图 2 为未经衰减订正的佛山 X 波段雷达反射率, 图 3 为广州 S 波段双偏振雷达的数据根据佛山 X 波段雷达反射率数据的位置经过坐标转换后的反射率, 具体步骤为先将雷达的极坐标数据转换为经纬度及高度的大地坐标, 再通过大地坐标间的匹配得到需要的极坐标<sup>[15]</sup>, 从而将广州和佛山的两部雷达的数据处理到相同的位置上。图 4 为广州 S 波段双偏振雷达的数据经过坐标转换后的完整反射率。根据图 1 可以看出在广州的西面有较强的回波, 达到  $35 \sim 45\text{ dBz}$ , 从图 2 可以看出在相应的地区确实存在强回波, 达到  $25 \sim 35\text{ dBz}$ , 图 3 相应的地方反射率值在  $35 \sim 45\text{ dBz}$  左右。可以得出初步结论, X 波段双偏振雷达确实存在很强的衰减, 粗略估计大约衰减  $5 \sim 15\text{ dBz}$  左右。

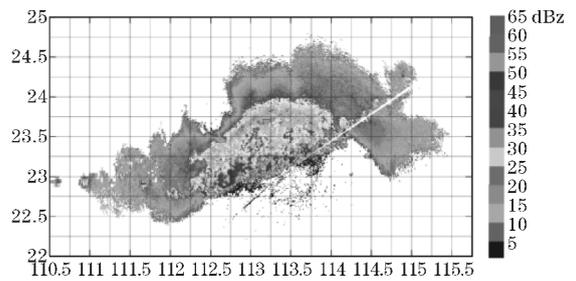


图1 广州雷达反射率

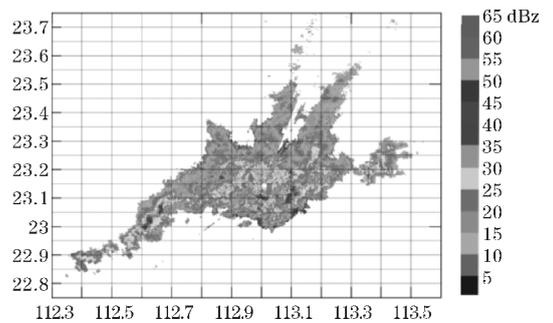


图2 佛山雷达反射率

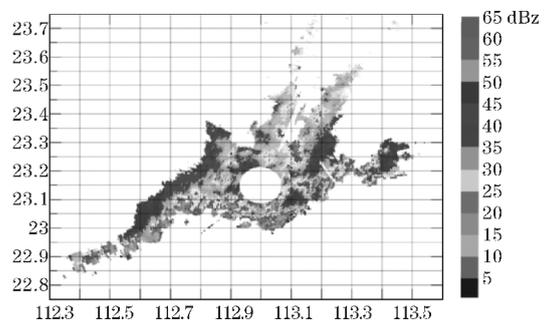


图3 广州雷达反射率值(坐标转换后)

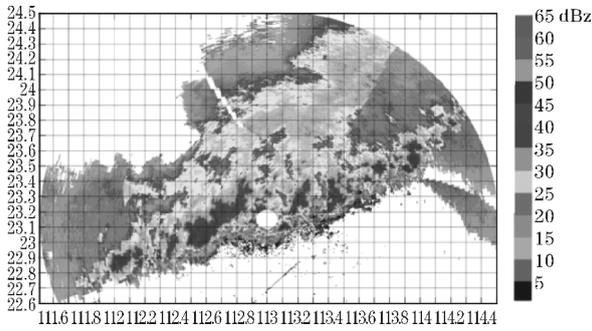


图 4 广州雷达完整反射率值(坐标转换后)

由图 2、3 可以看出,随着距离库增加后,衰减逐渐增大,特别是在远端,衰减已经非常严重,已经有 5 ~ 15 dBz 左右。由图 5 ~ 7 可以看出  $K_{DP}$  订正法要比  $Z_H$  订正法总体订正值大一些,大部分地区已经订正到 30 ~ 40 dBz, ZPHI 法的订正值与  $K_{DP}$  法订正值相比较偏大, 35 ~ 40 dBz 区域明显增大,特别是在方位角 225° ~ 250° 的扇形区域中,订正效果明显,与图 3 对应地区的反射率值分布一致。

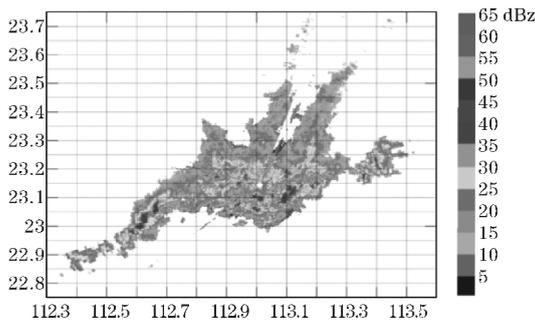


图 5  $Z_H$  订正法和校准系统误差后的反射率

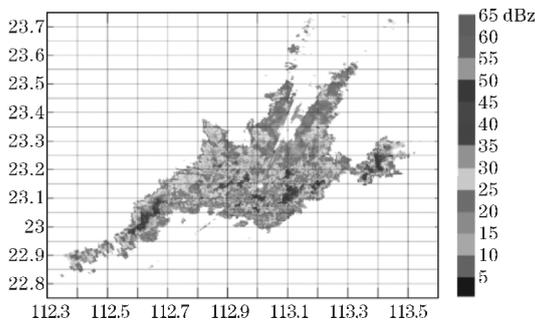


图 6  $K_{DP}$  订正法和校准系统误差后的反射率

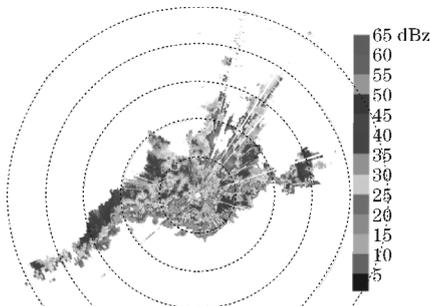


图 7 ZPHI 订正法和校准系统误差后的反射率的 PPI 图

### 2.3 一个径向的反射率值对比分析

图 8 是雷达反射率数据沿着径向的折线图,方位

角为 0°,即为正北方向。经过数据统计,佛山 X 波段雷达的这个径向反射率平均值为 26.37 dBz,  $Z_H$  订正法的反射率平均值为 28.21 dBz,  $K_{DP}$  订正法的反射率平均值为 34.39 dBz, ZPHI 订正法的反射率平均值为 38.07 dBz。由于广州 S 波段雷达转换坐标后,前 100 个距离库没有数据,根据 100 ~ 150 个距离库的两者差值大约在 8.54 dBz,根据前端衰减较少的原则,所以估测前 100 距离库平均衰减值为 4 dBz,经过计算,两部雷达的反射率差值平均为 13.31 dBz。  $Z_H$  订正法平均订正值 1.96 dBz,订正率为 14.74%,  $K_{DP}$  平均订正值 8.02 dBz,订正率为 60.30%, ZPHI 平均订正值 11.70 dBz,订正率达到了 87.97%。

根据上面的一个径向的数据的定量分析, ZPHI 法订正值最靠近两部雷达的差值,  $K_{DP}$  订正法居中,订正值最小的是  $Z_H$  订正法。而且还有一点,按照衰减随着距离叠加的原理,在远端的订正值应该大,在这一点上, ZPHI 方法的效果最好。  $K_{DP}$  订正法和  $Z_H$  订正法在这方面效果一般,在远端的订正值较小。

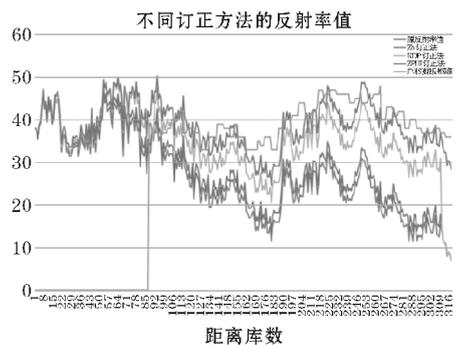


图 8 雷达反射率订正前后沿径向(0°)变化的折线图

## 3 结束语

分析了 X 波段双线偏振雷达的几种主流衰减订正方法,主要有  $Z_H$  法,  $K_{DP}$  法, ZPHI 法。并且将广州 S 波段双线偏振雷达的反射率数据经过坐标转换,转换成以佛山雷达为中心的反射率数据,方便进行衰减订正效果分析,得出以下几点结论:

(1) 相比较于 S 波段偏振雷达, X 波段偏振雷达在中远端存在较大衰减,平均大约在 13 dBz 左右,必须选择合适的订正法进行衰减订正。

(2) 对比广州 S 波段的雷达反射率数据,就订正效果而言, ZPHI 法和  $K_{DP}$  法比较好,误差比较小,在中远端的订正比较好。其次是  $Z_H$  法,订正效果不明显,与对应的 S 波段雷达数据差值较大。

讨论了多种 X 波段双偏振雷达衰减订正方法,但还是存在一些问题,如没有对  $K_{DP}$ ,  $\Phi_{DP}$  进行质量控制,数据质量不能很好地保证。并且与广州 S 波段双偏振雷达的比较也是比较初步,在以后的工作中进行改善。

## 参考文献:

- [1] Park S-G, Bringi V, et al. 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] 王蕊. X波段双线偏振多普勒天气雷达估测降水方法的研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2011.
- [3] 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):1633-1655.
- [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):23-27.
- [5] Hitschfeld, W, Bordan, J., Errors Inherent in the Radar Measurement of Rainfall at attenuating Wavelengths [J]. Journal of Meteorology. 1954, 11(1):55-67.
- [6] Meneghini, R, Rain rate estimate for an attenuating radar [J]. Raio Sci. 1978, (13):459-470.
- [7] 吕达仁, 林海. 雷达和微波辐射计测雨特性比较和联合应用 [J]. 大气科学, 1980, (4):30-39.
- [8] Bringi V N, Chandrasekar V, Balakrishnan N, et al. An examination of propagation effects in rainfall on polarimetric variables at microwave frequencies [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1990(7):829-840.
- [9] Erwan Le Bouar, Jacques Testud. Validation Of The Rain Profiling Algorithm "ZPHI" From The c-Band Polarimetric Weather Radar In Darwin [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001:1819-1837.
- [10] Bringi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications [M]. Cambridge University Press. 2001.
- [11] 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, 2009:607-617.
- [12] 胡志群, 刘黎平, 楚荣忠. X波段双线偏振雷达不同衰减订方法对比及其对降水估测影响研究 [J]. 气象学报, 2008:251-261.
- [13] Jacques Testud, Erwan Le Bouar, Estelle Obligis, Mustapha Ali-Mehenni. The Rain Profiling Algorithm Applied To Polarimetric Weather Radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000:332-356.
- [14] Jacques Testud Ste'. Phane Oury The Concept of "Normalized" Distribution to Describe Raindrop Spectra: A Tool for Cloud Physics and Cloud Remote Sensing [J]. Journal of Applied meteorology, 2001:1118-1140.
- [15] 吴肿, 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, 2013:391-395.
- [16] Chandrasekar V, Lim S. Simulation of path-integrated attenuation for X-band and C-band weather systems operating in Mediterranean heavy rainfall [J]. J. Atmos. Oceanic Technol. 2006, 23(9):1195-1205.

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

WANG Han<sup>1,2</sup>, SHI Zhao<sup>1</sup>, TENG Yu-peng<sup>1,3</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The main problem of X-band dual linear polarimetric radar for operational application is the strong attenuation. The purpose of this paper is to find the optimal attenuation correction method. Using the X-band dual linear polarimetric radar of Chinese Academy of Meteorological Sciences, Was used to obtain a set of observation data in the field experiment in Foshan in May 2016. We select three attenuation correction methods and make a comparison between the correction results. Meanwhile we use the simultaneous data of Guangzhou S-band dual linear polarimetric radar as the criterion. To achieve a better comparison, the data in Guangzhou was processed with coordinate conversion and interpolation processing. Then we obtain the S-band radar data with the same elevation, azimuth and range of X-band radar data in Foshan. Moreover, We choose a set of S & X-band radar data of a radial for quantitative analysis. In this paper, we choose  $Z_H$  method,  $K_{DP}$  method and ZPHI method to correct the attenuation. The analysis results indicate that  $K_{DP}$  method and ZPHI method have a better performance in correct results than  $Z_H$  method.

**Key words:** X-band dual linear polarimetric radar; attenuation correction; reflectivity; differential propagation phase shift; coordinate conversion