

# 双偏振雷达差分传播相移的五种滤波方法对比分析

魏庆<sup>1,2</sup>, 胡志群<sup>2</sup>, 刘黎平<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程学院电子工程学院, 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)

**摘要:** 为了对双线偏振雷达的差分传播相移  $\Phi_{DP}$  进行滤波降噪处理, 提高双线偏振雷达识别粒子、估测降水的能力。通过对 C 波段双线偏振雷达差分传播相移分别采用滑动平均、中值滤波、FIR 滤波、卡尔曼滤波和小波分析 5 种不同方法地介绍, 利用中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室移动式 C 波段双线偏振雷达 (POLC) 2013 年外场试验观测资料, 对比分析了经 5 种方法处理后的差分传播相移  $\Phi_{DP}$  径向数据, 及其分别在降水估测中应用的效果。结果表明: 采用 FIR 滤波方法、卡尔曼滤波方法和小波分析方法对  $\Phi_{DP}$  径向数据进行处理的效果比传统的滑动平均和中值滤波方法好; 其中小波分析处理的  $\Phi_{DP}$  径向数据波动最小, 再经过变距离法拟合的  $K_{DP}$  数据的负值能够得到最有效地抑制, 最后应用到  $R(K_{DP})$  降水估测中的精度最高。

**关键词:** 雷达气象; C 波段双偏振雷达; 差分传播相移; 滤波; 降水估测

中图分类号: TN959

文献标志码: A

## 0 引言

近年来, 偏振技术在天气雷达方面取得了巨大发展。双线偏振多普勒天气雷达能发射和接收水平与垂直的线偏振波, 相对于普通的多普勒天气雷达, 除了能探测反射率因子  $Z$  外, 还能测得差分反射率因子  $Z_{DR}$ 、差分传播相移  $\Phi_{DP}$ 、差分传播相移率  $K_{DP}$  及相关系数  $\rho_{hv}$  等偏振参量。这对提高雷达定量估测降水的精度以及识别降水粒子的相态和空间取向具有非常重要的作用<sup>[1]</sup>。

差分传播相移率  $K_{DP}$  在降水估测以及粒子相态识别等方面有着巨大潜力<sup>[2]</sup>, 而  $K_{DP}$  又是由  $\Phi_{DP}$  估算得到, 因此研究  $\Phi_{DP}$  的预处理方法对降水估测的影响有重要意义。 $\Phi_{DP}$  定义为电磁波在非球形降水粒子区中传播时, 水平偏振和垂直偏振的传播常数不同造成的相位差。Mueller 算法定义:  $\Psi_{DP} = \Phi_{DP} + \delta$ ,  $\Psi_{DP}$  为雷达的总差分相移,  $\delta$  为差分散射相移<sup>[3]</sup>。对于  $\delta$  只与降水粒子的特性相关, 满足 Rayleigh 散射条件的降水粒子  $\delta$  约为 0。但是, 当有 Mie 散射影响时,  $\delta$  就不能忽略, 而且  $\delta$  可能存在较大值, 这就是  $\delta$  效应。对于较强的雨区, 降水粒子可能严重不满足 Rayleigh 散射条件,  $\Psi_{DP}$  包含  $\Phi_{DP}$  和  $\delta$  2 个分量。如果  $\Phi_{DP}$  为信号, 那么  $\delta$  则为噪声,  $\delta$  的值会随着降水粒子增大而增大。因此在使用双线偏振雷达资料之前, 减少  $\delta$  噪声对  $\Phi_{DP}$  信号测量结果的影响是十分必要的<sup>[4]</sup>。除此之外, 在实际探测过程中, 气象目标环境和气象目标自身的扰动以及雷达系统本身的各种噪声, 都会使  $\Phi_{DP}$  受到干扰<sup>[5]</sup>。因此, 对噪声污染的  $\Phi_{DP}$  资料进行前期的数据预处理对于后期数据应用于雷达定量降水估测尤为重要。

Hubbert 等<sup>[6]</sup>提出采用有限冲激响应 (Finite Impulse Response, FIR) 和无限冲激响应 (Infinite Impulse Response, IIR) 低通滤波的方法处理  $\Phi_{DP}$  径向数据。Hubbert 和 Bringi<sup>[3]</sup>在该方法的基础上, 又提出一种迭代滤波方法, 此方法比低通滤波方法的应用范围更广。在中国, 对  $\Phi_{DP}$  数据, 一般做滑动平均和中值滤波等数据预处理工作。曹俊武<sup>[7]</sup>采用平滑的方法处理  $\Phi_{DP}$  数据资料。何宇翔等<sup>[4]</sup>根据差分传播相移  $\Phi_{DP}$  的特点引入卡尔曼滤波方法。胡志群等<sup>[8]</sup>提出小波分析法处理差分传播相移  $\Phi_{DP}$  数据, 即利用 db5 小波对  $\Phi_{DP}$  进行滤波处理。这些  $\Phi_{DP}$  滤波方法应用于降水估测方面的效果究竟如何? 文中对比分析 13 点滑动平均、13 点中值滤波、FIR 滤波、卡尔曼滤波以及小波分析 5 种不同  $\Phi_{DP}$  数据处理方法的效果, 及其在降水估测中的应用效果进行对比分析讨论。

收稿日期: 2014-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41375038); 公益性行业 (气象) 科研专项资助项目 (GYHY201306040, GYHY201306075); 973 计划资助项目 (2012CB417202)

## 1 滤波方法介绍

对滑动平均、中值滤波、FIR 滤波、卡尔曼滤波和小波分析 5 种不同  $\Phi_{DP}$  径向数据处理方法进行简单介绍。

### 1.1 滑动平均法

假设动态测试数据  $y(t)$  由确定性成分  $f(t)$  和随机性成分  $e(t)$  组成,且  $f(t)$  为有效信号  $e(t)$  为随机测试误差(即噪声)。经离散采样后,可以将动态测试数据表示为<sup>[9]</sup>

$$y_i = f_i + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

为了抑制随机测试误差  $\{e_i\}$  的影响,对非平稳的数据  $\{y_i\}$  作局部平均处理,以减小  $\{e_i\}$  所造成的随机起伏。这样沿全长  $N$  个数据逐一小区间上进行不断的平均处理,即可得出较平滑的有效信号  $\{f_i\}$ ,而去除随机起伏的噪声。

POLC 雷达一个径向上共有 1000 个距离库,库长为 150m。根据曹俊武<sup>[10]</sup>分析双线偏振雷达径向数据平滑方法表明,随着平滑库数  $N$  的增大,平滑后曲线的变化更加平稳,资料随机起伏的点减少,使雷达径向数据资料更加连续、可靠;但是,随着滑动平均库数  $N$  的增加,平滑的效果也逐渐减弱,且会平滑掉部分有效的回波信号,从而再次造成误差。因此,选用  $N = 13$ ,即采用 13 点滑动平均的方法对 POLC 雷达径向数据  $\Phi_{DP}$  进行处理。

### 1.2 中值滤波法

中值滤波是一种非线性数字滤波技术,能够有效地处理脉冲噪声。中值滤波器的原理就是利用一个奇数点的移动窗口,将窗口的中心点值用窗口内的中值代替。假设一个序列  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ,取窗口长度为  $M$  ( $M$  为奇数),对其进行中值滤波,即从序列中相继抽出  $M$  个数  $a_{i-v}, \dots, a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_{i+v}$  ( $a_i$  为窗口中心值,  $M = 2v + 1$ ),再将这  $M$  个数按照从小到大的顺序排列,排在数列中心点的那个数为中值滤波器的输出值<sup>[11]</sup>。

基于与选择平滑库数  $N$  的同样考虑,取中值滤波窗口  $M = 13$ ,即 13 点中值滤波方法处理 POLC 雷达径向数据。

### 1.3 FIR 滤波法

设有限冲激响应 FIR 滤波器的单位冲激响应为  $h(n)$ ,那么一个长度为  $M$  的 FIR 滤波器的系统函数为

$$H(z) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k) z^{-k} \quad (2)$$

它是次数为  $M-1$  的  $z^{-1}$  的一个多项式。一个输入信号  $x(n)$  通过 FIR 滤波器输出信号  $y(n)$ ,可以表示为

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k) x(n-k) \quad (3)$$

在处理 POLC 雷达  $\Phi_{DP}$  径向数据时  $k$  为雷达径向距离库序数,  $M$  为 FIR 滤波窗口的大小。

### 1.4 卡尔曼滤波法

卡尔曼滤波器是一种最优化自回归数据处理算法。以最小均方误差为最佳估计准则,采用信号与噪声的状态空间模型,利用前一时刻的估计值和现在时刻的观测值更新对状态变量的估计,求出现在时刻的估计值。根据  $\Phi_{DP}$  信号的特性, $r$  表示距离,假定  $a(r)$  为动态白噪声向量,均值为零、方差为  $Q_1$  的高斯白噪声序列,  $p(a) \sim N(0, Q_1)$ ,且  $a(i)$  和  $a(j)$  ( $i \neq j$ ) 互不相关,  $E\{a(i)\} = 0$ ,  $E\{a(i)a(j)\} = Q_1 \varepsilon(i-j)$ ,其中  $\varepsilon(i)$  满足:

$$\varepsilon(i) = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ 0, & i \neq 0 \end{cases}$$

$V(r)$  为观测白噪声向量,均值为零、方差为  $Q_2$  的高斯白噪声序列,  $p(V) \sim N(0, Q_2)$ ,  $a(r)$  与  $V(r)$  不相关。抽象为离散时间过程的状态变量估计,定义观测变量为  $Z(r)$ ,用离散随机差分方程表示<sup>[4]</sup> 则有

$$X(r) = AX(r-1) + Ba(r-1) \quad (4)$$

$$Z(r) = CX(r) + V(r) \quad (5)$$

其中,  $X(r) = \begin{bmatrix} \Phi_{DP}(r) \\ K_{DP}(r) \end{bmatrix}$ , 为天气系统的状态变量;  $A = \begin{bmatrix} 1 & r \\ 0 & r \end{bmatrix}$ , 为状态转移矩阵;  $B = \begin{bmatrix} r^2/2 \\ r \end{bmatrix}$ , 为过程噪声,  $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$ , 为系统的测量矩阵。

1.5 小波滤波法

胡志群等<sup>[8]</sup>根据双线偏振雷达  $\Phi_{DP}$  的特性, 提出利用小波分析的方法处理双偏振雷达  $\Phi_{DP}$  数据。方法可以使  $\Phi_{DP}$  数据更加平滑和连续, 使有效的气象信息得到保留。小波分析处理过程大致分为以下 3 个步骤:

(1) 信号分解。利用 db5 小波函数对原始  $\Phi_{DP}$  数据进行 5 层分解, 每层均可分解成两个信号分量, 即  $\Phi_{DP}$  的近似信号(低频分量)和  $\Phi_{DP}$  的细节信号(高频分量)。

(2) 信号去噪。根据固定阈值原则计算出阈值  $thr$ , 并利用该阈值对细节信号进行量化处理, 阈值函数如式 6 所示

$$\hat{c}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(c_{j,k}) (|c_{j,k}| - thr), & |c_{j,k}| \geq thr \\ 0, & |c_{j,k}| < thr \end{cases} \tag{6}$$

式中  $c_{j,k}$  为处理后的小波系数,  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数。

(3) 信号重构。重构经小波分析后的  $\Phi_{DP}$  数据, 采用小波分解的第 5 层近似信号和经过量化处理的第 1 ~ 5 层的细节信号。

2 个例分析

2.1 雷达资料介绍

中国气象科学研究院与安徽四创电子股份有限公司联合研发的车载移动式 C 波段双线偏振雷达(POLC)参加了 2013 年的“华南季风强降水”外场观测试验, 观测地点位于广东鹤山气象观测新站(112.981°E 22.737°N)。表 1 为 POLC 雷达的主要技术指标。

3.2  $\Phi_{DP}$  径向距离廓线分析

理论上,  $\Phi_{DP}$  是一个积分效应量, 其径向距离廓线具有随着距离的增加而缓慢上升的特点<sup>[12]</sup>。当雷达电磁波穿过相对较弱且分布均匀的降水区时,  $\Phi_{DP}$  通常随着距离而缓慢的递增; 但是, 相对于较强的降水回波而言,  $\Phi_{DP}$  在强回波区域呈现明显的递增现象。雷达在实际探测中,  $\Phi_{DP}$  资料受到非气象目标、雷达系统噪声和误差的影响, 使其径向廓线存在波动起伏现象。因此, 有必要对  $\Phi_{DP}$  资料做前期预处理工作。下面对 13 点滑动平均、13 点中值滤波、FIR 滤波、卡尔曼滤波以及小波分析 5 种不同方法对  $\Phi_{DP}$  径向资料数据处理的效果进行对比分析。

图 1 为 POLC 雷达于 2013 年 5 月 8 日 17 时 12 分(北京时) 0.5°仰角、133°方位角差传播相移  $\Phi_{DP}$  的原始资料和经 5 种不同滤波方法处理后的径向距离廓线图。从  $\Phi_{DP}$  原始数据(图 1a) 不难发现, 径向  $\Phi_{DP}$  数据的连续性较好, 且整体上具有随距离增加而上升的变化趋势, 这与理论上  $\Phi_{DP}$

表 1 POLC 雷达主要技术指标

| 雷达构件 | 主要参量      | 参 数                            |
|------|-----------|--------------------------------|
| 天线   | 直径        | 3.2m                           |
|      | 增益        | ≥40dB                          |
|      | 波束宽度      | 1.2°                           |
|      | 第一旁瓣      | ≤ -25dB                        |
| 发射机  | 雷达波的偏振状态  | 同发同收/单发双收                      |
|      | 线性极化隔离度   | ≤ -40 dB                       |
|      | 水平垂直极化增益差 | ≤ 0.5dB(垂直/水平)                 |
|      | 波长        | 5.5 cm                         |
|      | 脉冲宽度      | 1.0 μs, 0.5 μs                 |
|      | 峰值功率      | 250 kw                         |
|      | 脉冲重复频率    | 300 ~ 1200 Hz                  |
|      | 工作模式      | 双发双收                           |
|      | 最小可测功率    | -109dBm(1μs)<br>-106dBm(0.5μs) |
|      | 噪声系数      | 3.0 dB                         |
| 接收机  | 线性动态范围    | ≥85 dB                         |
|      | 移动方式      | 车载 4 m 标准方仓                    |

的变化特征相一致。但也明显存在大的波动和毛刺现象。经滤波处理后(图 1b ~ 图 1f)  $\Phi_{DP}$  径向距离廓线的整体变化趋势与原始数据基本一致,对原始数据的毛刺现象都能起到不同程度的抑制作用。其中小波分析处理后的  $\Phi_{DP}$  径向距离廓线(图 1f)平滑程度最好,卡尔曼滤波(图 1e)和 FIR 滤波(图 1d)次之,中值滤波(图 1c)和滑动平均(图 1b)处理的  $\Phi_{DP}$  径向距离廓线波动较大。

下面定义波动指数  $FIX$  反应  $\Phi_{DP}$  径向数据的波动情况,表达式如下

$$FIX = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \left| \Phi_{DP}^i - \Phi_{DP}^{i-1} \right| , \tag{7}$$

其中  $i$  为距离库序号;  $\Phi_{DP}^i$  为对应库的  $\Phi_{DP}$  值。 $FIX$  的值越大,说明径向距离廓线的波动性越大。对图 1 的  $\Phi_{DP}$  连续径向距离库(共 719 个)求出  $FIX$  值,如表 2 所示。由表 2 统计的结果可知:小波分析处理后的  $\Phi_{DP}$  数据资料效果最好,其他不同方法处理的效果由好到差的排列顺序是:卡尔曼滤波、FIR 滤波、滑动滤波、中值滤波。

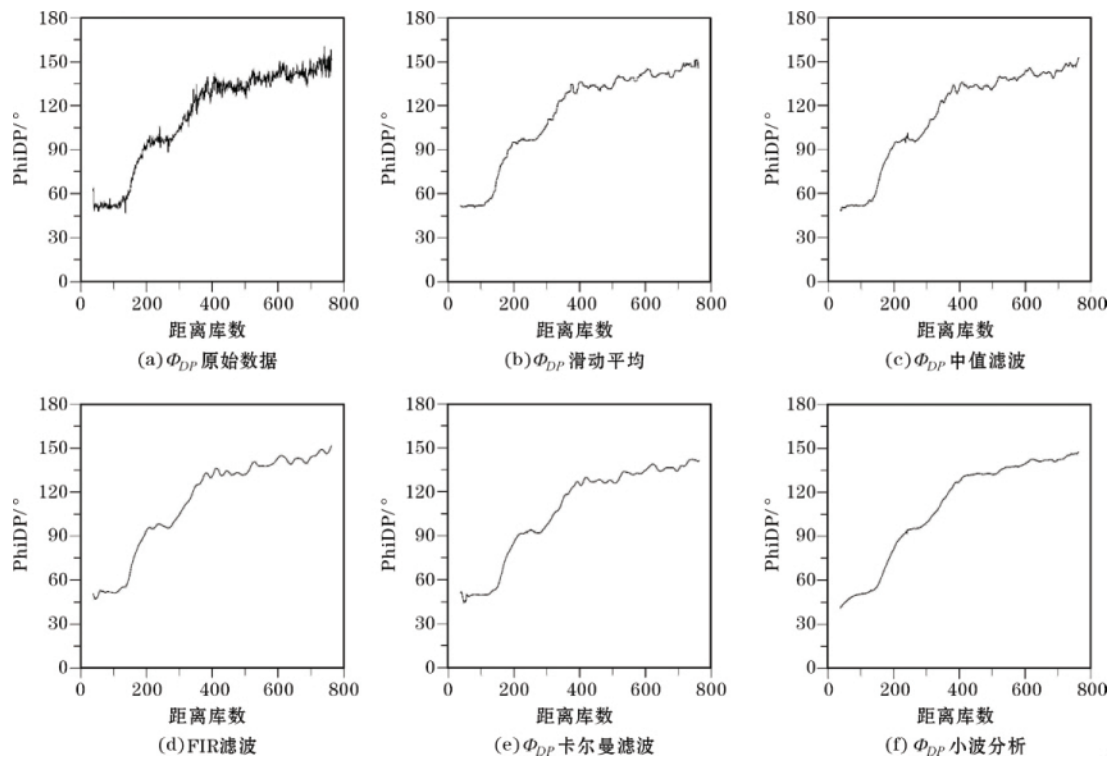


图 1  $\Phi_{DP}$  径向距离廓线图

表 2  $\Phi_{DP}$  径向距离廓线波动指数统计

| 方法    | 原始数据 | 滑动平均 | 中值滤波 | FIR 滤波 | 卡尔曼滤波 | 小波分析 |
|-------|------|------|------|--------|-------|------|
| $FIX$ | 4.03 | 0.42 | 0.48 | 0.35   | 0.29  | 0.16 |

2.3  $K_{DP}$  距离廓线分析

差传播相移率  $K_{DP}$  可以反映椭圆形雨滴的形态,且几乎不受衰减的影响。POLC 雷达直接观测到的参量是  $\Phi_{DP}$ 。根据  $K_{DP}$  的定义,若降水区中相邻距离  $r_n$  与  $r_{n+1}$  处测得的差分传播相移分别为  $\Phi_{DP}(r_n)$  和  $\Phi_{DP}(r_{n+1})$ , 则<sup>[13]</sup>

$$K_{DP}(r_n) = \frac{\Phi_{DP}(r_{n+1}) - \Phi_{DP}(r_n)}{2(r_{n+1} - r_n)} \tag{8}$$

在实际应用中,采用变距离法对  $K_{DP}$  进行最小二乘法拟合,拟合的距离  $r(r = 150 * N)$ ,  $N$  为距离库数,雷达探测距离库长度为 150m) 根据对应距离库的  $Z_H$  平均值选择  $N$  取值如下<sup>[14]</sup>

$$N = \begin{cases} 30 & Z_H \leq 35 \text{ dBZ} \\ 20 & 35 \text{ dBZ} < Z_H \leq 45 \text{ dBZ} \\ 10 & Z_H > 45 \text{ dBZ} \end{cases} \tag{9}$$

这样处理可以有效减小观测资料扰动产生的误差;对于较强的回波区域,短距离的拟合(即  $10 \times 150 \text{ m} = 1.5 \text{ km}$ ),能够有效降低周围的弱回波区对其影响,使强回波区的特点得以保留;对于弱降水,较长的距离平均能够减少因信噪比(SNR)减弱引起的  $\Phi_{DP}$  噪声增加的影响,从而提高  $K_{DP}$  估测弱降水的稳定性与精度。

图2为差传播相移  $\Phi_{DP}$  的原始资料以及分别经上述5种方法数据处理后经变距离法拟合得到的  $K_{DP}$  径向距离廓线图。理论上  $K_{DP}$  的值为正,由于  $\Phi_{DP}$  径向数据的波动使估算的  $K_{DP}$  存在负值。由图2(a)可以看出,  $\Phi_{DP}$  原始数据经变距离法拟合得到的  $K_{DP}$  存在大量的负值,且  $K_{DP}$  径向数据的波动性较大,存在较多的峰值(或谷值)。由图2(b)~图2(e)可以看出,  $K_{DP}$  径向数据的波动性得到一定的改善,但是仍然有大量的负值存在。再看图2(f),  $K_{DP}$  径向数据整体波动趋势基本一致,  $K_{DP}$  负值基本不存在。这说明小波分析处理方法对存在较大波动的  $\Phi_{DP}$  数据处理效果较好,能够有效抑制  $K_{DP}$  的负值,且能保留数据的真实性。

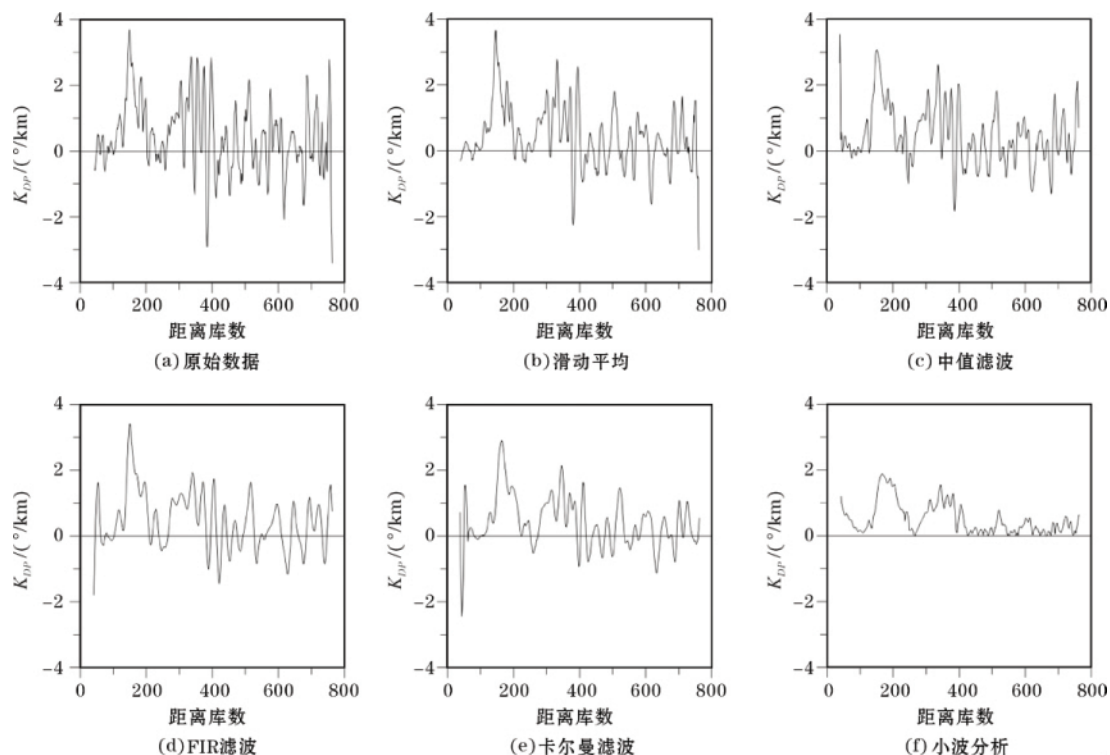


图2  $K_{DP}$  径向距离廓线图

### 3 不同滤波方法对 QPE 的影响

采用刘黎平等<sup>[15]</sup>根据数值模拟方法得到 C 波段双线偏振雷达基于偏振参量  $K_{DP}$  测量降水强度  $R$  的关系式

$$R(K_{DP}) = 28.76K_{DP}^{0.779} \quad (9)$$

由于  $\Phi_{DP}$  数据存在波动起伏现象,尤其是在较低信噪比时,  $K_{DP}$  往往存在负值,因此在采用式(7)反演降水时,  $K_{DP}$  为负值的时次不参加计算与对比分析。

2013年5月8日 POLC 雷达探测范围内发生持续性层状云降水,且持续时间较长。选取09:00~20:00共12小时雷达降水资料定量估测降水。地面雨量计资料为雷达探测半径70km内的小时降水量站点资料。以地面雨量计小时降水量作为实况降水量,以评估雷达降水估测的效果。由于每个雷达体扫时间在5~7分钟,为了得到小时降水量,采用每个体扫的数据分别反演降水强度,再根据体扫时间权重后相加得到每小时降水量(即降水强度)。

统计雷达-雨量计对的相对误差  $RE$  和相关系数  $\rho$  对雷达降水估测的效果进行评估,表达式为

$$RE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i - G_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i} \times 100\%$$

( 10 )

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \overline{R_i}) (G_i - \overline{G_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \overline{R_i})^2 \sum_{i=1}^n (G_i - \overline{G_i})^2}}$$

( 11 )

其中  $R_i$  和  $G_i$  分别为雷达反演降水量和雨量计实测降水量  $n$  为有效雷达-雨量计对的数量。相对误差表示数据的可信度  $RE$  值越小数据的可信度越高; 相关系数表示数据变化趋势的一致程度  $\rho$  值越大表明线性一致程度越高。

表 3 统计了  $\Phi_{DP}$  分别经不同滤波方法处理后拟合的  $K_{DP}$  应用于降水估测中雷达-雨量计对的相对误差  $RE$  和相关系数  $\rho$ 。由于  $K_{DP}$  在降水较小时的测量误差比较大, 为避免其影响降水估测的结果, 只对自动雨量计小时降水量大于 1mm 的雷达-雨量计对有效数据进行误差统计。表中时次表示雷达-雨量计对有效数量。根据统计结果看, 在每个雨强阶段,  $\Phi_{DP}$  小波分析方法处理后拟合的  $K_{DP}$  应用于降水估测的相对误差都最小, 相关系数均在 0.7 以上; 随着平均雨强的增大, 相对误差值减小, 相关系数增大, 说明小波分析方法对  $\Phi_{DP}$  数据的处理效果最好, 应用于降水估测的精度最高; 从表 3 可以看出, 其他  $\Phi_{DP}$  数据处理方法应用于降水估测中的效果, 由好到差依次为: 卡尔曼滤波、FIR 滤波、滑动平均、中值滤波。

表 3  $\Phi_{DP}$  的不同滤波处理方法应用于 QPE 的误差统计

| 雨强<br>mm h <sup>-1</sup> | 时次  | 平均雨强<br>mm h <sup>-1</sup> | 评估<br>方法 | 方法      |         |         |         |        |        |
|--------------------------|-----|----------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
|                          |     |                            |          | 原始数据    | 滑动 13 点 | 中值 13 点 | FIR     | 卡尔曼    | 小波     |
| > 1                      | 805 | 7. 8                       | $RE$     | 130. 53 | 129. 78 | 120. 42 | 108. 75 | 75. 11 | 67. 3  |
|                          |     |                            | $\rho$   | 0. 36   | 0. 57   | 0. 55   | 0. 58   | 0. 61  | 0. 71  |
| > 5                      | 364 | 13. 5                      | $RE$     | 53. 78  | 45. 02  | 47. 78  | 42. 92  | 41. 53 | 35. 84 |
|                          |     |                            | $\rho$   | 0. 51   | 0. 63   | 0. 61   | 0. 64   | 0. 63  | 0. 71  |
| > 10                     | 108 | 30. 17                     | $RE$     | 44. 96  | 36. 72  | 35. 61  | 32. 33  | 30. 69 | 28. 5  |
|                          |     |                            | $\rho$   | 0. 55   | 0. 67   | 0. 68   | 0. 70   | 0. 72  | 0. 78  |

4 结束语

利用中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室的 C 波段双线偏振雷达外场试验观测资料, 对差分传播相移  $\Phi_{DP}$  径向数据采用 5 种不同滤波方法进行了径向距离廓线、拟合的  $K_{DP}$  径向距离廓线以及应用于降水估测的效果进行了对比分析, 并得到以下结论

(1) 对比分析了 5 种不同  $\Phi_{DP}$  径向数据滤波方法, 发现 FIR 滤波、卡尔曼滤波和小波分析较传统的滑动平均和中值滤波方法对波动的  $\Phi_{DP}$  径向数据更能起到抑制作用, 且能有效地保留气象回波信息; 进一步对比 FIR 滤波、卡尔曼滤波和小波分析 3 种较好效果的滤波方法, 小波分析方法处理  $\Phi_{DP}$  径向数据的效果最好。

(2) 采用变距离法对 5 种不同滤波方法处理后的  $\Phi_{DP}$  数据进行最小二乘法拟合得到差传播相移率  $K_{DP}$ , 其中小波分析处理后的  $\Phi_{DP}$  数据拟合的  $K_{DP}$  负值最少。

(3) 采用  $R(K_{DP})$  对 5 种方法得到的  $K_{DP}$  进行降水估测评估, 发现小波分析方法应用在降水估测中的精度最高; 其他方法应用在降水估测中的效果, 由好到差的顺序依次为卡尔曼滤波、FIR 滤波、滑动平均、中值滤波。

根据国内外的许多科研结论, 双线偏振雷达使用  $K_{DP}$  进行降水估测能够有效提高雷达定量估测降水的精度。而  $\Phi_{DP}$  数据的测量误差直接影响  $K_{DP}$  的估算值, 因此, 研究  $\Phi_{DP}$  数据的滤波方法对后期  $K_{DP}$  数据的应用, 如相态粒子识别和降水估测, 起重要作用。

参考文献:

[1] Seliga T A , Bringi V N. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for



- measuring precipitation [J]. J Appl Meteor, 1976, 15 (1): 69 – 76.
- [2] Zrníc D S, Ryzhkov A V. Advantages of rain measurements using specific differential phase [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1996, 13(2): 454 – 464.
- [3] Hubbert J, Bringi V N. An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1995, 12(3): 643 – 648.
- [4] 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): 1027 – 1037.
- [5] 杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等. 双线偏振雷达差分传播相移的小波滤波初探 [J]. 暴雨灾害, 2012, 31(3): 248 – 254.
- [6] Hubbert J, Chandrasekar V, Bringi V N, et al. Processing and interpretation of coherent dual-polarized radar measurements [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1993, 10(2): 155 – 164.
- [7] 曹俊武, 胡志群, 陈晓辉, 等. 影响双线偏振雷达相位探测精度的分析 [J]. 高原气象, 2011, 30(3): 817 – 822.
- [8] Hu Z Q, Liu L P. Applications of wavelet analysis in differential propagation phase shift data denoising [J]. Adv Atmos Sci, 2014, 31(4): 824 – 834.
- [9] 胡广书. 数字信号处理理论算法与实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 1 – 649.
- [10] 曹俊武. 双线偏振多普勒雷达的资料质量控制及降水粒子相态识别方法的研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2006: 1 – 120.
- [11] 张明谦, 李雷. 改进的中值滤波算法 [J]. 兵工测量与控制, 2007, 26(5): 77 – 80.
- [12] Bringi V N, Chandrasekar V, Balakrishnan N, et al. An examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1990, 7: 829 – 840.
- [13] 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.
- [14] Wang Y, Chandrasekar V. Algorithm for estimation of the specific differential phase [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2009, 26(12): 2565 – 2578.
- [15] 刘黎平, 葛润生, 张沛源. 双线偏振多普勒天气雷达遥测降水强度和液态含水量的方法和精度研究 [J]. 大气科学, 2002, 26(5): 709 – 719.

## Comparative Analysis of Five Filtering Methods of Differential Propagation Phase Shift for Polarization Radar Subtitle as Needed

WEI Qing<sup>1,2</sup>, HU Zhi-qun<sup>2</sup>, LIU Li-ping<sup>2</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)

**Abstract:** In this paper, five different filtering methods of differential propagation phase shift for C-band Polarization Radar are introduced. Based on the observation in field experiments by a C-band Polarization Doppler Radar on wheel which was built in the State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences (CAMS), running average method, median average method, finite-impulse response filter (FIR), Kalman filter, and wavelet analysis are respectively used to filter radial data of differential propagation phase shift  $\Phi_{DP}$ . In addition, the biases are compared between the specific differential propagation phase shift  $K_{DP}$ -based rainfall estimation which fitted from the  $\Phi_{DP}$  radial profile after filtered with these methods. The results show that the complicate FIR, Kalman, wavelet methods have better filtering effect than traditional running filter and median filter. In terms of wavelet analysis method, the data fluctuation of  $\Phi_{DP}$  radial profile is the minimum; the negative value of  $K_{DP}$  fitted by  $\Phi_{DP}$  is the least; the accuracy of  $K_{DP}$ -based rainfall estimation is the highest.

**Key words:** radar meteorology; C-band polarization radar; differential propagation phase shift; filtering methods; rainfall estimation