Radar Science and Technology

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2017.05.001

基于粒子滤波的差分传播相移估计方法

李 海,崔爱璐,章 涛,吴仁彪

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室,天津 300300)

摘 要:针对差分传播相移与差分传播相移率易受到各种噪声及其他偏振参量衰减影响的问题, 提出了一种粒子滤波方法,实现差分传播相移与差分传播相移率的估计。该方法首先利用偏振参量之间的相 互关系建立状态方程和观测方程,然后将方程应用于粒子滤波同步估计差分传播相移与差分传播相移率。 所提方法与滑动平均、迭代滤波以及卡尔曼滤波方法利用 X 波段双偏振多普勒雷达 X-SAPR 的外场观测数 据进行了比较实验。实验结果表明,粒子滤波方法可以准确估计差分传播相移,使滤波处理后的数据具有 更好的连续性、平滑性和准确性,通过将估计后的数据应用于衰减订正进一步验证了该方法的有效性。

关键词:双偏振雷达;衰减订正;差分传播相移;粒子滤波

中图分类号:TN959.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2017)05-0457-10

Estimation of Differential Propagation Phase Shift for Dual-Polarization Radar Based on Particle Filter

LI Hai, CUI Ailu, ZHANG Tao, WU Renbiao

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the problem that differential phase shift and the specific differential propagation phase shift are susceptible to various noises and other attenuated polarization parameters, a particle filter method is proposed to estimate the differential propagation phase shift. In this method, firstly, the state and observation model is established by use of the relationship of polarization parameters. Then the model is applied to the particle filter in order to estimate the differential propagation phase shift and specific differential propagation phase shift simultaneously. The comparative experiment were made between the proposed method and the moving average, iterative filter and Kalman filter using the data collected by an X-band dual-polarization Doppler radar X-SAPR. The experimental results show that the particle filter can accurately estimate the differential propagation phase shift and accuracy of the filtered data. The effectiveness of the method is further verified by applying the estimated data to the attenuation correction.

Key words: dual-polarization radar; attenuation correction; differential propagation phase shift; particle filter

0 引 言

为了解决气象灾害为我国经济和生活带来的 严重影响,气象雷达已经广泛地应用于预防气象 灾害、恶劣天气预报与人工影响天气等方面^[1]。气 象雷达通过发射电磁波探测气象环境,根据回波 的变化来评估气象目标的特性,当路径上存在降 雨区时,会造成反射率的衰减,为了准确分析气象 目标的真实特性,提高降水估测的精度,需要对反 射率进行衰减订正^[2]。双偏振雷达通过发射水平 和垂直极化电磁波不仅能探测到常规的多普勒参 量,而且还能获取表征粒子相态和微物理特性的 偏振参量,因此在识别粒子相态、定量估测降水等 方面较常规多普勒雷达有很大的优势^[3-4]。对于双 偏振多普勒雷达而言,差分传播相移率与降雨率 之间不仅具有比较高的相关性,而且差分传播相 移还具有不受波束传播阻碍效应、雷达校准、传播

收稿日期: 2017-03-21;修回日期: 2017-04-17

基金项目:国家自然科学基金(No.61471365,U1633106,61231017);中国民航大学蓝天青年学者培养经费;中央高校基本科研业务费 (No.2000300446)

路径衰减影响的特性,因此可以使用差分传播相 移与差分传播相移率进行反射率的衰减订正^[4]。

在实际检测中,气象环境的多样性、雷达系统 的噪声以及由后向散射引起的差分散射相移都会 影响差分传播相移的估计精度[5]。差分传播相移率 是由差分传播相移估算得到的,因此差分传播相移 率的估算精度受差分传播相移测量值以及估算方法 的影响[6]。当差分传播相移估计不准时,会影响后 续雨衰订正结果的准确性,与真实的气象数据不 符。因此,对受到污染的差分传播相移进行准确估 计对反射率的衰减订正尤其重要^[1]。Hubbert 提 出采用有限冲激响应(FIR)和无限冲激响应(IIR) 低通滤波器估计差分传播相移的方法,但在连续 多个距离门存在非零的差分散射相移时,该方法 并不能有效地对差分传播相移进行平滑处理,估 计效果不好。Hubbert 和 Bringi^[7]提出了迭代滤 波方法,通过迭代滤波既可以自动检测到差分散 射相移,还能够达到剔除干扰的目的,但是迭代次 数难以确定,数据处理时间较长。近期国内在差分 传播相移方面也开展了研究,曹俊武等[8]采用了 多点平滑的方法处理雷达数据,只能粗略地滤除 高频分量,滤波的效果不明显。何宇翔等[9]提出卡 尔曼滤波方法求取差分传播相移,该方法可以同 步估计差分传播相移与差分传播相移率,有效地 减小了差分传播相移的波动,但估计得到的差分 传播相移率存在负值,与实际气象环境不符[10]。 胡志群等[11]提出了小波滤波法,通过小波滤波估 计得到的差分传播相移具有良好的平滑度,并且 减少了差分传播相移率的负值。但是该方法通过 变距离法对滤波处理后的差分传播相移进行最小 二乘拟合得到差分传播相移率,再进行后续的衰 减订正,小波滤波中引入的误差会传递到差分传 播相移率的估计以及反射率的衰减订正中。

本文提出的粒子滤波方法的估计模型只依赖 全差分相移,不受其他偏振参量的约束,而且以雷 达偏振参量的不模糊范围为依据进行采样,能够 有效地抑制差分传播相移率的负值,在低信噪比 的情况下也能保留真实的气象信息,使用的条件 更加广泛。该方法首先利用偏振参量之间的关系 建立状态与观测方程,然后利用粒子滤波方法同 步估计差分传播相移与差分传播相移率,并以 X 波段双偏振多普勒雷达 X-SAPR 的外场观测数据 作为试验数据,从差分传播相移和差分传播相移 率的估计效果与反射率的衰减订正结果两方面进 行了验证和分析。

粒子滤波的状态方程和观测方程的 建立

粒子滤波的状态方程和观测方程^[12-13]表示如下:

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{x}_k} \tag{1}$$

$$\mathbf{y}_{k} = \mathbf{F} \mathbf{x}_{k} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{y}_{k}} \tag{2}$$

式中, x_k 为系统的状态向量,T为状态转移矩阵, ε_{x_k} 为激励噪声, y_k 为观测向量,F为观测矩阵, ε_{y_k} 为观测噪声。

下面根据偏振参量之间的关系说明状态方程 的具体形式。为了同步估计差分传播相移与差分 传播相移率,定义状态向量 x_k 为

$$\mathbf{x}_{k} = \begin{bmatrix} \Phi_{dp}(k) \\ K_{dp}(k) \end{bmatrix}$$
(3)

式中, $\Phi_{dp}(k)(k = 1, \dots, K)$ 表示差分传播相移, $K_{dp}(k)(k = 1, \dots, K)$ 表示差分传播相移率, 为差 分传播相移 $\Phi_{dp}(k)(k = 1, \dots, K)$ 随距离的变化 率, k 表示沿着传播路径电磁波到达的距离门, K表示距离门的个数。将式(3)代入式(1)得到状态 方程为

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dp}(k+1) \\ K_{dp}(k+1) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \Phi_{dp}(k) \\ K_{dp}(k) \end{bmatrix} + \varepsilon_{x_{k}}$$
(4)

式中, ε_{x_k} 表示前向传播路径上由于气象环境、雷达系统等引起的不确定性,设定 ε_{x_k} 服从正态分布。下面推导状态转移矩阵的具体形式,由文献 [14]可知差分传播相移与差分传播相移率满足如 下关系:

 $\Phi_{dp}(k+1) = \Phi_{dp}(k) + 2\Delta r K_{dp}(k)$ (5) 式中, Δr 表示距离门长度。将式(5)代入式(4),当 后验状态估计 $K_{dp}(k)$ 与状态先验估计 $K_{dp}(k+1)$ 相等^[14]时,得到状态转移矩阵为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 2\Delta r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

为了避免衰减的偏振参量对估计结果的影响,定义观测向量为

$$\mathbf{y}_{k} = \left[\boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{dp}}(k) - c \right] \tag{7}$$

式中, $\Psi_{dp}(k)(k=1,\dots,K)$ 为全差分相移,满足如下关系:

$$\Psi_{\rm dp}(k) = \Phi_{\rm dp}(k) + \delta_{\rm hv}(k), \ k = 1, \cdots, K \quad (8)$$

式中,差分传播相移 $\Phi_{dp}(k)$ 为有用信号, $\delta_{hv}(k)$ 表示由后向散射引起的差分散射相移,为需要分离的高频噪声。在经典的估计方法中,认为 K_{dp} 具有非负性,因此 Φ_{dp} 的距离廓线不可能出现下降的趋势^[15]。由于不同距离门 δ_{hv} 的变化导致估计 K_{dp} 时会存在不合理的负值^[16]。为了减少由于 δ_{hv} 产生的估计误差,将 δ_{hv} 的变化引入到估计模型中。根据文献[14]中,Hubbert 拟合得到的不同频率的雷达 $\delta_{hv} - K_{dp}$ 的线性关系,可得到c为

 $c = \delta_{hv}(k) - bK_{dp}(k), k = 1, \dots, K$ (9) 式中, b 和 c 的取值依赖于 $K_{dp}(k)(k = 1, \dots, K)$ 的 取值范围和雷达的频率。由式(8)、式(9)相减,可 得观测向量为

$$\mathbf{y}_{k} = \left[\boldsymbol{\Psi}_{dp}(k) - c \right] = \left[\boldsymbol{\Phi}_{dp}(k) + bK_{dp}(k) \right],$$

$$k = 1, \cdots, K$$
(10)

由式(3)、式(10)得到观测方程为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_{dp}(k) - c \end{bmatrix} = \boldsymbol{F} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_{dp}(k) \\ K_{dp}(k) \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{y}_{k}}$$
(11)

式中, ε_ν, 表示观测引起的误差, 设定 ε_ν, 服从正态 分布。则观测矩阵为

 $F = \begin{bmatrix} 1 & b \end{bmatrix}$ (12)

 参数 b 的选择依据式(9) 中给出的线性拟合关系,

 c 为人为引入用于衡量 $\delta_{hv}(k)$ 与 $bK_{dp}(k)(k = 1, \dots, K)$ 之间冗余的测量值。根据文献[14]的方法

 确定参数 b 与 c 的取值。

最后,得到基于粒子滤波估计 Φ_{dp} 与 K_{dp} 的状态方程与观测方程为

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dp}(k+1) \\ K_{dp}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2\Delta r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dp}(k) \\ K_{dp}(k) \end{bmatrix} + \varepsilon_{\mathbf{x}_{k}}$$
(13)
$$\begin{bmatrix} \Psi_{dp}(k) - c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dp}(k) \\ K_{dp}(k) \end{bmatrix} + \varepsilon_{\mathbf{y}_{k}}$$
(14)

2 基于粒子滤波的差分传播相移与 差分传播相移率的估计

粒子滤波的思想基于蒙特卡罗实验方法,旨 在通过寻求一组在状态空间中的随机样本对条件 后验概率密度函数进行近似,用样本均值来替代 积分运算,以求得状态的最小均方误差估计^[13]。

 $x_{1:k} = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 是从初始距离门到第 k 个距离门的状态集,用 $\{x_k^i, i = 1, \dots, N\}$ 表示对第 k 个距离门的数据进行采样得到 N 个粒子,上标 i 表示采样得到的第 i 个粒子。 $\{x_{1:k}^i, i = 1, \dots, N\}$ 为对 $x_{1:k} = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 进行采样得到的粒子 集, $y_{1:k} = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ 是从初始距离门到第 k个距离门的观测集。利用最容易得到的状态转移 概率密度函数 $p(x_k^i | x_{k-1}^i)$ 作为重要性密度函数, 并从中采样产生粒子。可由下式表示^[13]:

$$\boldsymbol{x}_{k}^{i} \sim p(\boldsymbol{x}_{k}^{i} \mid \boldsymbol{x}_{k-1}^{i})$$
(15)

则根据式(5)建立的状态方程进行预测:

$$_{k}^{i} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{x}_{k-1}^{i} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{x}_{k-1}}$$
(16)

通过重要性权值对状态进行更新,似然函数 $p(\mathbf{y}_{k} \mid \mathbf{x}_{k}^{i})$ 表征每个粒子的重要性权值的确定,根据文献[12],以观测量与预测状态之间的冗余作 为似然函数:

$$p(\mathbf{y}_k \mid \mathbf{x}_k^i) = \mathbf{y}_k - \mathbf{F} \mathbf{x}_k^i$$
(17)

可以通过观测方程迭代更新重要性权值,更 新为

$$w_k^i \propto w_{k-1}^i p(\mathbf{y}_k \mid \mathbf{x}_k^i)$$
 (18)
权值进行归一化可得

$$\widetilde{\omega}_{k}^{i} = \omega_{k}^{i} / \sum_{i=1}^{N} \omega_{k}^{i}$$
(19)

状态 x_k 的估计为

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k} = \sum_{i}^{N} \widetilde{\boldsymbol{w}}_{k}^{i} \boldsymbol{x}_{k}^{i}$$
(20)

即

r

$$\begin{bmatrix} \hat{\Phi}_{dp}(k) \\ \hat{K}_{dp}(k) \end{bmatrix} = \sum_{i}^{N} \widetilde{w}_{k}^{i} \begin{bmatrix} \Phi_{dp}^{i}(k) \\ K_{dp}^{i}(k) \end{bmatrix}$$
(21)

采用 Smith 等^[17] 提出的多项式采样方法进行 重采样。根据重要性权值重新采样得到新的粒子 集,并更新粒子的对应权值。最后计算出差分传播 相移与差分传播相移率的估计值。粒子滤波算法 可总结归纳如表1 所示。

表 1 基于粒子滤波的差分传播相移估计的算法流程

首先对直接从雷达读取的偏振参量进行简单的质量控制和预处理; 初始化粒子: 根据雷达观测差分传播相移不模糊的范围对 Φ^{i}_{dp0} 与 K^{i}_{dp0} 进行均 匀采样, $i = 1, \dots, N$; 初始化权值: 设置初始化权值 $\omega_{0}^{i} = \frac{1}{N}, i = 1, \dots, N$; for $k = 1, \dots, K, k$ 表示电磁波达到的距离门; 根据式(15) 采样产生粒子,由式(16) 得到第 k 个距离门的状态预测; for $i = 1, \dots, N$ 根据式(17) 计算似然函数 $p(\mathbf{y}_{k} \mid \mathbf{x}_{k}^{i})$; 根据式(18) 进行权值的更新,得到重要性权值; end end p—化权值; $\widetilde{w}_{k}^{i} = w_{k}^{i} / \sum_{i=1}^{N} w_{k}^{i}$;

重采样:根据式(18)进行多项式采样;

输出估计的均值:根据式(21)得到 Φ_{dp} 与 K_{dp} 的估计值。

3 仿真分析

利用 ARM(Atmospheric Radiation Measurement Climate Research Facility)的 X 波段双偏振多普勒雷 达 X-SAPR 的实测数据验证算法性能,该雷达在水 平和垂直方向同步发射偏振波,差分传播相移不 模糊的范围为 0°~ 180°^[4]。根据文献[14]得到符 合 X-SAPR 雷达的 δ_{hv} - K_{dp} 线性关系为

 $\delta_{\rm hv} = \begin{cases} 2.37 K_{\rm dp} + 0.054, & K_{\rm dp} \leqslant 2.5^{\circ} \rm km^{-1} \\ 0.27 K_{\rm dp} + 6.16, & K_{\rm dp} > 2.5^{\circ} \rm km^{-1} \end{cases}$ (22)

由于 $K_{dp}(k)(k = 1, \dots, K)$ 没有先验信息,所 以 b 和 c 必须依赖于 $K_{dp}(k)(k = 1, \dots, K)$ 的先验 估计值。根据文献[9] 设定激励噪声 ϵ_{x_k} 服从均值 为零、方差为 10 的正态分布,观测噪声 ϵ_{y_k} 服从均 值为零、方差为 2 的正态分布。

雷达观测地点位于纬度 36°36′18.0″北、经度 97°29′6.0″西。X-SAPR 雷达于 2013年11月6日探测 到大平原南部俄克拉荷马州地区出现了范围较 大、持续时间较长的降雨过程。选用 2013年11月6 日1时 30分降水过程雷达 PPI 扫描资料进行分析。

下面通过仿真试验分析不同滤波方法的估计 效果,以下均用"Kalman 滤波"来表示何宇翔在文 献[9]中提出的滤波方法。用"滑动平均"表示滑 动平均的方法,用"迭代滤波"表示迭代滤波的方 法。应用魏庆在文献[10] 定义的 FIX 参数描述滤 波后的性能。

3.1 差分传播相移滤波效果分析

图 1 为 X-SAPR 雷达于 2013 年 11 月 6 日 1 时 30 分 1.5° 俯仰角、 153° 方位角 Φ_{dp} 的雷达观测数据, 以及经过不同滤波方法的径向距离廓线图。由图 1 可知,经过 Kalman 滤波和粒子滤波处理后的距离 廓线的波动和毛刺都得到了很好的抑制,保证了 廓线的连续性和平滑度。

图 2为X-SAPR 雷达于 1.5°仰角观测数据 Ψ_{dp} 的 PPI 图和经过粒子滤波估计 Φ_{dp} 的 PPI 图。从图 2(a)可见,由于雷达远端的信噪比比较低,信号受 噪声影响比较严重,导致 Ψ_{dp} 原始数据的 PPI 图存 在很多波动数据点。图 2(b)为经过粒子滤波处理 后的 PPI 图,呈现出数据良好的平滑度,有效地剔 除了远端低信噪比区域的干扰以及后向散射相位 的影响。





图 1 不同滤波方法处理后的 Φ_{dp} 径向距离廓线



滤波处理前后 Φ_{dp} PPI

为了进一步对不同滤波方法的效果进行对 比,通过平均波动指数(FIX)来比较距离廓线的波 动情况。FIX的定义^[10]如下:

$$FIX = \frac{1}{K-1} \sum_{k=2}^{K} |\Phi_{dp}(k) - \Phi_{dp}(k-1)| \quad (23)$$

FIX 越大说明距离廓线的波动就越大。观测数据 Ψ_{dp} 、滑动平均、迭代滤波、Kalman 滤波、粒子

滤波的计算结果如表 2 所示,可见粒子滤波与 Kalman 滤波都具有一定的滤波效果,使得距离廓 线的波动变小,但粒子滤波的波动更小。由此可 见,粒子滤波的效果更好。

表 2 **Φ**_{dp} 径向距离廓线波动指数统计

方 法	FIX	
原始数据	1.34	
滑动平均	1.05	
迭代滤波	0.56	
Kalman 滤波	0.25	
粒子滤波	0.15	

3.2 差分传播相移率的估计分析

图 3 为滑动平均、迭代滤波、Kalman 滤波和 粒子滤波处理后的 K_{dp} 径向距离廓线。结果表明, 经过滑动平均、迭代滤波、Kalman 滤波和粒子滤 波处理后估计的 K_{dp} 的负值数量分别为 124,92, 85 和 56。说明粒子滤波同步估计 Φ_{dp} 与 K_{dp} 的效 果比较好,能够有效地减少 K_{dp} 的负值,保留数据 的真实信息。







3.3 X-SAPR 雷达反射率的衰减订正分析与结果 验证

采用自适应约束算法对反射率 Z_h 进行衰减 订正^[4]。

由于 Z_h 在 S 波段的衰减很小,可以作为真值 用来进行 Z_h 订正前后的对比^[6]。S 波段雷达 KVNX 位于纬度 36°44′26.9″北、经度 98°7′39.0″西,距离 库长为 250 m,扫描开始的时间为 01:29:41。两部 雷达之间的直线距离为 59 km。由于距离雨区的 相对距离以及扫描时间的不同,导致 X 波段雷达 与 S 波段雷达的 Z_h 观测值会有所偏移,但并不影 响 Z_h 订正效果的验证。

首先对雷达近端降雨区的衰减订正效果进行 仿真分析。图 4(a)为衰减订正前后 Z_h 的径向距 离廓线,图 4(b)为衰减订正前的 Z_h PPI 图,图 4 (c)为同一时段 S 波段 KVNX 雷达的 Z_h PPI 图, 图 4(d)~图 4(g)分别为采用滑动平均、迭代滤波、 Kalman 滤波与粒子滤波处理后进行衰减订正后 的 Z_h PPI 图。从图中可以明显看出,X-SAPR 雷 达经过迭代滤波、Kalman 滤波和粒子滤波处理后 订正的 Z_h 都得到了衰减补偿的效果,但图 4(f)中 黑色方块所示的区域 Kalman 滤波订正的 Z_h 超过 了 Z_h 的真值,出现了过订正的情况,这也与图 4 (a)中 Kalman 滤波比粒子滤波的 Z_h 的取值高出 2~8 dB 相对应,因此经过粒子滤波处理订正后的 Z_h 与 Z_h 的真值更加接近。

其次对雷达远端降雨区的衰减订正效果进 行仿真分析。图 5 为不同滤波方法处理后进行衰 减订正后的 Z_h PPI 图。从图中可以明显看出, X-SAPR 雷达经过 Kalman 滤波和粒子滤波处理 后订正的 Z_h 都得到了明显的衰减补偿效果,但在 远端低信噪比的区域,经过粒子滤波处理订正后 的 Z_h 与 Z_h 的真值更加接近。证明了粒子滤波方 法对雷达远端降雨区以及近端降雨区均有衰减订 正的效果。

通过 Park 由散射模拟建立的偏振参量的经验 关系验证衰减订正的效果^[4],比较了 X 波段订正 前后的 $A_h \sim Z_h$ 和 $Z_h \sim K_{dp}$ 之间的散点图特性, A_h表示水平方向的衰减率。图 6(a)和图 6(b)分 别为订正前后的 $Z_h \sim K_{dp}$ 的散点图,实线为 Park 通过散射模拟建立的 Zh~Kdp 的经验关系。由图 6(a)可以发现,订正前的散点图比较分散, Z_h大 约分布在 10~30 dBz, K dp 分布在 0~6°/km,与 Park 的模拟曲线有很大偏移。经过订正, $Z_{\rm h} \sim K_{\rm do}$ 的散点分布与 Park 曲线比较接近。图 6(c)和图 6 (d)分别为订正前后 $A_h \sim Z_h$ 的散点图,实线是 Park 依据公式 $A_h = aZ_h^{\beta}$ 经过散射模拟得到的曲 线。通过对比发现,订正后的散点图分布与 Park 的模拟曲线比较相似,而订正前的偏移较大。由此 可见,订正后的偏振参量与 Park 的散射模拟结果 基本一致,进一步验证了本文估计方法的有效性。



反射率 Z_h/dBz

反射率 Z_h/dBz

反射率Zh/dBz





(f) 经过 Kalman 滤波处理后订正的 ZhPPI 扫描图

(g) 经过粒子滤波处理后订正的 Z_hPPI 扫描图

97.6° W 97.55° 97.5° W 97.45° W

36.75° N

36.7° N

36.65° N

36.6° N

雷达近端降雨区订正前后 Zh 的比较 图 4



(e) 经过 Kalman 滤波处理后订正的 Z_h PPI 扫描图 (f) 经过粒子滤波处理后订正的 Z_h PPI 扫描图

图 5 雷达远端降雨区订正前后 Z_h 的比较



图 6 订正前后的偏振参量散点图分析

4 结束语

本文提出了基于粒子滤波的 X 波段双偏振气 象雷达差分传播相移与差分传播相移率估计的新 方法,利用 ARM 的 X 波段双偏振雷达 X-SAPR 的实测数据验证了算法的性能。该方法在低信噪 比的情况下能够有效剔除 $Φ_{dp}$ 存在的波动数据点 和毛刺,使数据具有良好的滤波效果, $Φ_{dp}$ 距离廓 线体现出较好的收敛性,更加符合实际降水过程 距离廓线的变化。其次该方法能够有效地保持 K_{dp} 的非负性,保留数据的真实信息。最后 X-SA-PR 雷达经过粒子滤波处理后订正的 Z_h 有了明显 的增强,强回波位置 Z_h 值与 S 波段 KVNX 雷达 更加接近。通过分析订正前后 X 波段双偏振雷达 参量之间的散点图发现,经过订正后的散点图与 偏振参量之间的经验公式具有更强的一致性,证 明了本文方法的有效性。

参考文献:

- [1] LIM S, CHANDRASEKAR V. A Robust Attenuation Correction System for Reflectivity and Differential Reflectivity in Weather Radars [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(3):1727-1737.
- [2] 曹俊武,胡志群. X 波段测雨雷达强度资料评估及改进方法[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(3):237-243.
 CAO Junwu, HU Zhiqun. Evaluation and Its Improved Method for Reflectivity Data Quality of Rain Radar[J]. Radar Science and Technology, 2016, 14 (3):237-243. (in Chinese)
- [3] 宋新景. 基于极化特征的雷达目标识别技术[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(1):39-44, 53.
 SONG Xinjing. Radar Target Recognition Based on Polarization Feature[J]. Radar Science and Technology, 2016,14(1):39-44, 53. (in Chinese)
- [4] BRINGI V N, KEENAN T D, CHANDRASEKAR

V. Correcting C-Band Radar Reflectivity and Differential Reflectivity Data for Rain Attenuation: A Self-Consistent Method with Constraints[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(9): 1906-1915.

[5] 汪旭东,胡志群,刘浩,等.双线偏振天气雷达性能测 试方法研究[J].雷达科学与技术,2015,13(4):395-401,409.

WANG Xudong, HU Zhiqun, LIU Hao, et al. Research on Measurement Method for Dual-Polarization Weather Radar[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(4):395-401, 409. (in Chinese)

- [6] 魏庆,胡志群,刘黎平,等. C 波段偏振雷达数据预处 理及在降水估计中的应用[J]. 高原气象,2016,35 (1):231-243.
- [7] HUBBERT J, BRINGI V N. An Iterative Filtering Technique for the Analysis of Copolar Differential Phase and Dual-Frequency Radar Measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1995, 12(3):643-648.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 魏庆,胡志群,刘黎平.双偏振雷达差分传播相移的 五种滤波方法对比分析[J].成都信息工程学院学 报,2014,29(6):596-602.
- [11] 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.
- [12] ALA-LUHTALA J, WHITELEY N, HEINE K, et al. An Introduction to Twisted Particle Filters and Parameter Estimation in Non-Linear State-Space Models[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2016, 64(18):4875-4890.
- [13] 李天成,范红旗,孙树栋. 粒子滤波理论、方法及其在 多目标跟踪中的应用[J]. 自动化学报,2015,41 (12):1981-2002.
- [14] SCHNEEBELI M, GRAZIOLI J, BERNE A. Improved Estimation of the Specific Differential Phase Shift Using a Compilation of Kalman Filter Ensem-

bles[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8):5137-5149.

- [15] HUANG H, ZHANG G, ZHAO K, et al. A Hybrid Method to Estimate Specific Differential Phase and Rainfall with Linear Programming and Physics Constraints[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(1):96-111.
- [16] 曹杨,苏德斌,周筠珺,等. C 波段双线偏振多普勒雷 达差分相位质量分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 548-559.
- [17] SMITH A F M, GELFAND A E. Bayesian Statistics
 Without Tears: a Sampling-Resampling Perspective
 [J]. The American Statistician, 1992, 46(2):84-88.

作者简介:



李海 男,1976年生,天津人,中国 民航大学电子信息与自动化学院教 授,硕士生导师,主要研究方向为机载 气象雷达信号处理、分布式目标检测 与参数估计、自适应信号处理、阵列信 号处理、动目标检测与参数估计。 E-mail:elisha1976@163.com



崔爱璐 女,1991 年生,辽宁抚顺人, 硕士研究生,主要研究方向为双偏振 气象雷达信号处理。



章 涛 男,1980年生,天津人,博 士,中国民航大学天津市智能信号与 图像处理重点实验室讲师,主要研究 方向为雷达信号处理、多目标跟踪。



吴仁彪 男, 1966 年生, 湖北武汉人, 博士, 教授、博士生导师, IEEE 高级会员, 民航特聘专家, 主要研究方向为自 适应信号处理、空管和民航安全智能 信息处理、航空运输大数据、卫星导航 抗干扰技术、民航无线电干扰检测与 自适应抑制、高分辨率雷达成像与动 目标识别。