

何宇翔, 吕达仁, 肖辉, 等. 2009. X波段双线极化雷达反射率的衰减订正[J]. 大气科学, 33(5): 1027–1037. He Yuxiang, Lü Daren, Xiaohui, et al. 2009. Attenuation correction of reflectivity for X-band dual polarization radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(5): 1027–1037.

X波段双线极化雷达反射率的衰减订正

何宇翔^{1, 2} 吕达仁¹ 肖辉¹ 雷恒池¹ 刘得民¹ 段树³

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

摘要 X波段雷达虽然其衰减较S和C波段雷达严重,但是由于其易于移动等特点,还在各国推广应用,为了反演获得可靠的降水分布,X波段雷达数据需要进行衰减订正。本文提出一种基于气象目标和单位差分传播相移 K_{DP} 特性的衰减订正方法。 K_{DP} 由前向和后向两个分量组成,为了计算 K_{DP} ,必须分离这两个分量以及消除其他随机噪声的影响。本文引进了一种最优化自回归数据滤波算法——卡尔曼滤波来分离这两个分量和消除其他随机噪声。这种方法效率高、实用性强,同时可以用于其他雷达信号的处理。比较衰减订正结果,发现使用卡尔曼滤波方法处理后的差分传播相移所进行的反射率衰减订正具有较高的稳定性。

关键词 双极化雷达 衰减订正 卡尔曼滤波

文章编号 1006-9895(2009)05-1027-11

中图分类号 P412

文献标识码 A

Attenuation Correction of Reflectivity for X-Band Dual Polarization Radar

HE Yuxiang^{1, 2}, LÜ Daren¹, XIAO Hui¹, LEI Hengchi¹, LIU Demin¹, and DUAN Shu³

1 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract X-band radar has been now more and more widely used in rainfall estimation, while its attenuation is more serious than S- and C-band radar. This constitutes a major source of error for X-band radar rainfall estimation, in particular for intense precipitation. Thus, the X-band radar data need to be corrected before used. On the basis of previous studies, this paper proposes a correction method which uses the characteristics of meteorology object and specific differential propagation phase shift K_{DP} . The copolar differential propagation phase shift is composed of two components, namely, differential propagation phase and differential backscatter phase shifts. To estimate specific differential phase K_{DP} , these two components must first be separated when significant differential backscatter phase is present. The paper introduces the Kalman filter method that is an Optimal Recursive Data Processing Algorithm, which can separate these two components and filter out other random noises. The method is highly effective and practical and can also be used to process other radar signals. The results show that the reflectivity attenuation cor-

收稿日期 2008-05-12, 2009-02-10 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875080, 国家科技支撑计划项目 2006BAC12B00-1, 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目 IAP07408, 中国气象局与吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室开放课题 (0603), 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-206-1

作者简介 何宇翔, 男, 1976年出生, 博士生, 主要从事大气遥感的理论和应用研究。E-mail: heyuxiang@mail.iap.ac.cn

rection using K_{DP} processed with the Kalman filter method is very stable.

Key words dual polarization radar, attenuation correction of radar reflectivity, Kalman filter

1 引言

提高区域降水量分布的定量估计精度,是降水雷达的重要研究前沿之一。自从 Seliga and Bringi (1976) 提出引入极化雷达的概念后,使用线性极化基进行观测变得越来越普遍。目前,双线极化雷达极化技术在云降水物理遥感探测中已相当重要,使用线性极化基的极化雷达参数已广泛应用于提高降水量的评估中(秦琰琰等, 2006; 梁海河等, 2006), 这些参数主要包括差分传播相移和差分反射率。反射率的衰减是影响雷达评估降水精度的一个重要因素,因此必须对反射率的衰减进行订正。

过去许多应用研究都是基于 S 波段(波长 10 cm)和 C 波段(波长 5 cm)的雷达,世界上许多国家也都采用这两个波长作为业务雷达,如中国 WSR-98D (S-band Weather Surveillance Radar-1998 Doppler) 和美国的 WSR-88D (WSR-1988 Doppler)。较长波长(比如 S 波段、C 波段)雷达由于衰减小,在探测中遇到暴雨时,具有明显的优势。对于 C 波段雷达,很多研究都使用极化方法和非极化方法对其进行部分衰减订正(Hildebrand, 1978)。现在 X 波段雷达在研究和业务中应用越来越多,在使用 $Z_e - I$ (Z_e : 等效反射率, I : 降水强度)来估测降水量时,衰减引起的误差非常严重。为了克服这一问题, X 波段雷达引入极化分集,通过测量单位差分传播相移 K_{DP} 进行降水量的估计比使用 $Z_e - R$ 关系要准确,但是由于它是一种“噪声”估计,在小雨时更是如此(Ryzhkov et al., 1996), $Z_e - R$ 关系仍具有其优势,但衰减严重影响了它的应用,所以研究 X 波段雷达的反射率衰减订正,进而使用 $Z_e - R$ 估测降水,仍具有很大的理论意义和应用价值。

反射率(Z_H)的衰减订正,主要是确定衰减率(A_H)与距离的关系,这一关系一旦确定,就很容易订正某一距离上的 Z_H 。对于常规单极化雷达,可通过 $Z_H - R$ 和 $A_H - R$ (或 $Z_H - A_H$) 之间的经验关系,间接计算 A_H (Hildebrand, 1978)。但是这种经验关系本身很不稳定,它对系统增益等参数非常敏感(Johnson et al., 1987)。这是由于 A_H 是 Z_H

衍生出来的,而 Z_H 本身已经被衰减, Gorgucci et al. (1998) 通过理论分析表明,即使没有系统订正误差,这种间接的使用已经衰减的反射率 Z_H 来订正的方法也会产生较大误差。

而对于双极化雷达,可以使用差分传播相移 Φ_{DP} 进行反射率订正,且很稳定。已有一些使用 Φ_{DP} 进行衰减订正(Bringi et al., 2002)的算法,这些算法大多适用于 S 波段和 C 波段的雷达,在 X 波段双极化雷达中的研究还非常少(Anagnostou et al., 2004)。

在使用 Φ_{DP} 时,关键是要剔除各种噪声,得到真实的 Φ_{DP} 值。如果后向散射具有下面的对角特征散射(Bringi et al., 2002):

$$S_{BSA} = \begin{pmatrix} S_{hh} & 0 \\ 0 & S_{vv} \end{pmatrix}_{BSA} = e^{j\delta_{hh}} \cdot \begin{pmatrix} |S_{hh}| & 0 \\ 0 & |S_{vv}| e^{j(\delta_{vv} - \delta_{hh})} \end{pmatrix}_{BSA},$$

其中, S_{BSA} 表示后向散射, S_{hh} 、 S_{vv} 表示水平方向和垂直方向的散射, δ_{hh} 、 δ_{vv} 表示相位角。那么,差分传播相移 Φ_{DP} 由 Mueller 算法(Hubbert et al., 1995)给出:

$$\Phi_{DP} = \arg(\langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle) + 2(k_h^i - k_v^i)r = \delta + 2K_{DP}r = \delta + \phi_{DP},$$

其中, δ 表示后向差分传播相移, ϕ_{DP} 表示前向差分传播相移。对于瑞利散射,后向差分传播相移 δ 不存在,但是对于非瑞利散射,就有可能出现较大的 δ (Bringi et al., 2002), 这种效应称为 δ 效应。

初步计算表明,在 X 波段,小雨到中雨偏离瑞利散射很小, δ 也就可以忽略。但对于较强的雨区,就可能严重偏离瑞利散射。由于前、后向差分传播相移都包含在极化分集雷达所测到的差分相移 Φ_{DP} 之中,所以非常重要的一点,也是较困难的一点,就是区分这两个分量。若称 ϕ_{DP} 为信号,则 δ 就是噪声,且它随着雨滴增大而增大。所以在使用 X 波段双极化雷达时,分离后向传播相移,减少这种效应,将对测量结果产生相当重要的影响。此外,由于探测中气象目标环境的扰动、气象目标本身的扰动,以及雷达机内噪声的存在,都使差分传播相移 Φ_{DP} 受到干扰,存在起伏,而在使用 Φ_{DP} 进行衰减订

正时,只有较好的估计出前向差分传播相移 ϕ_{DP} 的真实值,才能使用它进行衰减订正。

本文根据差分传播相移的特点,引入卡尔曼滤波方法,推导了使用差分传播相移进行衰减订正的数学表达形式,并使用此方法剔除雷达信号的高频噪声以及后向传播相移 δ ,然后根据层状云的特征,通过拟合得到表达式的系数,进而对层状云回波进行衰减订正实验。

2 雷达资料滤波

本文使用中国科学院大气物理研究所 X 波段双线性极化雷达 (IAP-714XDP-A) (性能详见表 1)。该雷达采用同时发射同时接收体制 (STAR-Simultaneous Dual Transmit and Receive),对于每一个脉冲,每一个通道都有振幅的接收,即

$$[s_{hh}^1:s_{vv}^1][s_{hh}^2:s_{vv}^2][s_{hh}^3:s_{vv}^3]\cdots[s_{hh}^M:s_{vv}^M],$$

其中, s_{hh} 、 s_{vv} 表示水平和垂直通道的接收信号。每个通道同时还有交叉极化分量,但是与共极化分量相比是小量,可以忽略。在处理中为了不影响极化探测量 (比如 Z_{DR}) 的精度,没有选择地物杂波的滤除方案。处理器采用下式计算零延迟相关系数:

$$\rho_{hv}(0) = \frac{\langle s_{vv}s_{hh}^* \rangle}{\sqrt{s_{hh}s_{vv}}},$$

包含幅度和相位,分别为

$$\begin{aligned}\rho_{HV} &= |\rho_{hv}(0)|, \\ \Phi_{DP} &= \arg[\rho_{hv}(0)],\end{aligned}$$

幅度代表相关系数,相位代表差分传播相移。

2.1 卡尔曼滤波器

只要回波信号强度足够强,没有完全淹没在噪声中,就能够测量其相位。在信噪比 $SNR>1$ 的情况下,相位测量总是优于对功率的测量。传播相移是通过测量相位得到的,与振幅测量 (比如强度等) 相比,具有很多优点 (Zrnic et al., 2006): (1)

它独立于发射机和接收机的定标; (2) 不受衰减的影响; (3) 不受波束充填程度的影响; (4) 不受地物回波的影响; (5) 即使存在冰雹,偏离正常情况也非常少; (6) 对滴谱的变化不敏感; (7) 可以很容易区分异常传播。

由于差分传播相移 Φ_{DP} 存在较大起伏,从频率域看,属于高频噪声,因此很多人 (Hubbert et al., 1995) 设计了低通滤波器来剔除这些高频噪声,以保留曲线的平均趋势,但是,一个具体的滤波器依赖于距离取样间隔和要求平滑的程度 (Hubbert et al., 1995)。本文采用卡尔曼滤波器 (Kalman, 1960),对雷达探测变量 Φ_{DP} 进行处理,以得到衰减订正需要的差分传播相移 Φ_{DP} 。卡尔曼滤波以最小均方误差为最佳估计准则,寻求一套递推算法,它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来更新对状态变量的估计,求出现在时刻的估计值。在卡尔曼滤波中采用了物理意义较为直观的时间域语言,仅需要有限时间内的观测数据,因此可使用比较简单的递推算法,可以推广到非平稳随机过程的情况,并且所需数据存储量较小,因此,卡尔曼滤波器适合于计算机实时处理和运算,它是一种“最优化自回归数据处理算法” (Optimal Recursive Data Processing Algorithm)。

在雷达遥感大气时,在每一有效照射体积中,待观测的状态变量,除了受大气本身湍流及其他可能的噪声影响外,还受到观测仪器本身噪声的影响,这可以抽象为离散时间过程的状态变量估计,用以下离散随机差分方程来描述:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}(\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1}), \tag{1}$$

模型中的各项意义如表 2 所示。定义观测变量为 z ,得到测量方程

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \tag{2}$$

表 1 IAP-714XDP-A 雷达系统的技术参数和性能
Table 1 Specifications of the IAP-714XDP-A dual-channel radar

雷达特征量	详细说明
发射系统	雷达波长 3.2 cm, 总发射功率≥75 kW, 单路发射功率≥35 kW, 脉冲宽度可选 (0.5 μs、1.0 μs、2.0 μs)
极化分集	同时发射水平和垂直极化波
天线系统	天线直径 2.4 m, 3-dB 波束宽度 1.0°, 天线转速 20°/s
天线控制系统	PPI、RHI、VOL (体积扫描) 及扇形扫描模式, 可以订制方位角、仰角等参数; 太阳法标定
雷达探测量	水平极化反射率、多普勒速度, 谱宽, 差分传播相移, 比相差, 差分反射率, 相关系数
雷达定标	使用信号发生器对天线增益定标, 使用太阳法和 GPS 对雷达位置方位定标

其中, w_{k-1} 表示大气状态的随机扰动信号 (过程噪声), v_k 表示仪器误差 (观测噪声), 在这里假设它们相互独立、分布已知。

假定在理想情况下, 在雷达射线上存在一个降水单体, 其与 Φ_{DP} 之间的相对关系如图 1a 所示, 射线从 r_0 处开始进入降水单体, 此时 Φ_{DP} 开始增加, 到达降水单体核心时, Φ_{DP} 变化率达到最大。随后射线穿过降水单体中心, Φ_{DP} 增加变缓, 当射线穿过单体、进入无降水区时, Φ_{DP} 不再增加。如果降水单体为水平均匀, 其差分传播相移如图 1b 所示, 从 r_0 到 r_m 整个均匀降水单体中, Φ_{DP} 均匀增加, 它的斜率代表了降水单体的强度, 降水单体越强, Φ_{DP} 的斜率越大。

在这一过程中, 如果把雷达射线的传播视为移动目标的运动, 则其运动方程的数学模型可用下面的差分方程来描述差分传播相移 Φ_{DP} 的运动规律:

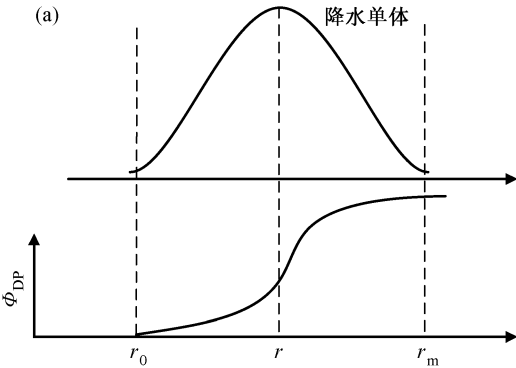
$$\begin{cases} \Phi_{DP}(r+1) = \Phi_{DP} + r\Phi'_{DP}(r) + \frac{1}{2}a(r)r^2 \\ \Phi'_{DP}(r+1) = \Phi'_{DP}(r) + ra(r) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\Phi_{DP}(r)$ 和 $\Phi'_{DP}(r)$ 分别表示在距离 r 处的“位置”和“速度”, 这里分别表示累计差分传播相移和

表 2 离散差分方程中各项的意义

Table 2 Meaning of each term of discrete difference equation

符号	意义
x_k	系统状态
A	系统矩阵
B, u_k	状态的控制量
z_k	观测值
C	观测矩阵
w_k	过程噪声 $p(w) \sim N(0, Q)$
v_k	测量噪声 $p(v) \sim N(0, R)$



单位差分传播相移即 K_{DP} , 由于是雷达相邻距离库之间的处理, 平均距离太短, 所以如果要使用式中 $\Phi'_{DP}(r)$, 必须进一步处理; $a(r)$ 表示在 r 到 $r+1$ 这段距离上, 由于气象目标、环境、雷达探测系统本身等不确定因素引起的加速度, 它反映天气系统本身和雷达探测系统所造成的不可探测性, 可设 $a(r)$ 是服从零均值、方差为 Q 的正态分布的平稳随机序列, 且 $a(k)$ 和 $a(l) (l \neq k)$ 互不相关, 即 $a(r)$ 的期望值 $E\{a(r)\} = 0$, $E\{a(k)a(l)\} = Q\delta_K(k-l)$, 其中 δ_K 是克罗内克函数, 其特性是

$$\delta_K(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}$$

所以根据上面的讨论, (1) 和 (2) 式变形为

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

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

其中,

$$X(r) = \begin{bmatrix} \Phi_{DP}(r) \\ \Phi'_{DP}(r) \end{bmatrix}$$

为被观测天气系统的状态变量;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & r \\ 0 & r \end{bmatrix}$$

为被观测天气系统的状态转移矩阵;

$$B = \begin{bmatrix} \frac{r^2}{2} \\ r \end{bmatrix}$$

为过程噪声, 指雷达在探测时, 波束从一个照射体积转移到另一个照射体积的过程中, 相应天气系统状态的变化噪声, $C = [1 \ 0]$ 为系统的测量矩阵, 由于是直接对差分传播相移进行观测, 所以 C 矩阵中第一个元素为 1, $a(r)$ 为零均值、方差为 Q_1 的高斯白噪声序列, 称为动态白噪声向量; $V(r)$ 为零

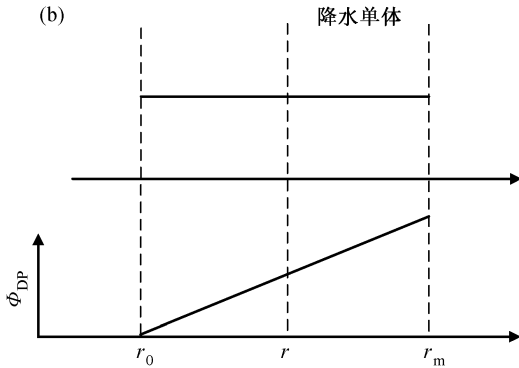


图 1 理想情况下降水单体与 Φ_{DP} 之间的关系: (a) 非均匀降水单体; (b) 均匀降水单体

Fig. 1 Relationship between ideal precipitation cell and Φ_{DP} : (a) Inhomogeneous precipitation cell; (b) homogeneous precipitation cell

均值、方差为 Q_2 的高斯白噪声序列, 称为观测白噪声向量, 且与 $a(r)$ 不相关。已知系统的状态方程和观测方程, 可以通过计算先验状态估计值、先验误差协方差、修正矩阵、更新观测值、更新误差协方差等步骤完成计算 (张培昌等, 2001)。

2.2 滤波的初始化

在使用卡尔曼滤波算法时, 需要指定滤波的初始估计值和误差协方差矩阵, 在实际雷达探测过程中, 由图 3 可知, 在雷达站周围出现差分反射率起伏很大的区域, 这可能与雷达信号处理系统的处理方式以及机内噪声、地物噪声有关, 这种起伏在一个固定的数值周围起伏变化, 根据 Bringi 等 (2002) 的论述可知, 雷达记录的差分相位是雷达系统本身的差分相位和气象目标差分相移的和, 即

$$\arg(\rho_{co}^{meas}) = \arg(\rho_{co}) + \arg\left[\int e^{-j2(\Phi_h - \Phi_r)} f_h f_v d\Omega - [(\Phi_{sw(h)}^i - \Phi_{sw(v)}^i) + (\Phi_{sw(h)}^r - \Phi_{sw(v)}^r)] = \Phi_{DP} - (\Phi_{DP})_0 \quad (6)$$

其中, Φ_{DP} 是雷达探测得到的气象目标差分相位, $(\Phi_{DP})_0$ 是系统差分相移, 它是由系统接收机和发射机的稳定性决定, 这是一个系统偏差, 通过对比不同时间的资料发现, 雷达零距离处的差分相移总会有一定的漂移, 并不是一个定值, 这与雷达的稳定性有关, 系统的稳定性和固定相位差随着时间会有所变化, 它受温度、湿度等 (Bringi et al., 2002) 控制。所以在计算中第一步要解决的问题就是确定每一根扫描线的初始相位即系统相位偏差量, 根据上面的讨论知道, Φ_{DP} 在一般情况下由于信噪比的降低, 起伏变大, 但是都是无偏估计, 所以可以使用每根径向数据前面几个库的平均值来代替这些起伏很大的点。本文采用前面 10 个点, 如果雷达以 150 m 的库长观测, 对应的距离为 1.5 km 的平均值。在使用卡尔曼滤波算法时, 需要指定滤波算法的初始条件, 在对每根扫描线进行处理时, 为了快速指定初始条件, 本文采用滑动平均后初始两个库的探测值来建立初始估计, 即

$$\hat{\mathbf{X}}(2|2) = [Z(2) \quad (Z(2) - Z(1))/r]^T. \quad (7)$$

初始的估计误差为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}(2|2) &= \mathbf{X}(2) - \hat{\mathbf{X}}(2|2) \\ &= \begin{bmatrix} \Phi_{DP}(2) \\ \Phi'_{DP}(2) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z(2) \\ (Z(2) - Z(1))/r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} -V(2) \\ \Phi'_{DP}(2) - \frac{\Phi_{DP}(2) - \Phi_{DP}(1)}{r} - \frac{V(2) - V(1)}{r} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由状态方程 (3), 可得

$$\frac{\Phi_{DP}(2) - \Phi_{DP}(1)}{r} = \Phi'_{DP}(1) + ra(1)/2, \quad (9)$$

和

$$\begin{aligned} \Phi'_{DP}(2) - \frac{\Phi_{DP}(2) - \Phi_{DP}(1)}{r} &= \Phi'_{DP}(1) + ra(1) - \Phi'_{DP}(1) - ra(1)/2 = ra(1)/2. \end{aligned} \quad (10)$$

因此, (8) 式可写成

$$\hat{\mathbf{X}}(2|2) = \begin{bmatrix} -V(2) \\ ra(1)/2 + \frac{V(1) - V(2)}{r} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

估计误差协方差矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(2|2) &= E\{\hat{\mathbf{X}}(2|2)\hat{\mathbf{X}}^T(2|2)\} = \\ &= \begin{bmatrix} Q^2 & Q^2/r \\ Q^2/r & R^2r^2/4 + 2Q^2/r \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 Kalman 滤波和其他滤波器的比较

为了验证 Kalman 滤波器的优点, 假定雷达的探测距离为 150 km, 库长为 150 m, 在探测距离内存在如图 2a 所示的天气信号, 由于各种噪声造成雷达回波信号出现起伏, 假定这些噪声为高斯白噪声, 给原始信号增加高斯白噪声, 信噪比为 10, 增加噪声后结果如图 2b 所示, 然后使用中值滤波器和 Kalman 滤波器分别对被噪声污染后的信号进行滤波, 结果如图 2c 和 2d 所示。可见, 中值滤波器和 Kalman 滤波器能达到近似的滤波效果, 都保留了原始型号的主要特点。在使用中值滤波时, 关键问题是滤波窗的宽度, 在实验中取不同的宽度得到了不同的结果, 如图 2c 所示, 其中的两条曲线分别是使用两个滤波宽度得到的结果, 可见对于不同频率的天气信号具有不同的最佳滤波宽度, 这在实际使用中很难实时地确定最佳滤波宽度, 而 Kalman 滤波对此不敏感。在实验中假定对一个 PPI 的 360 根雷达射线进行处理, 计算机的 CPU 主频为 3.0 GHz, 中值滤波器所用时间为 1.484 s, Kalman 滤波器花费的 CPU 时间为 0.031 s, 这种时间差异主要是因为在中值滤波中必须在每个给定的滤波宽度内进行排序处理, 花费了大量的计算机时间, 对于其他的低通滤波器由于在频率域和时间域之间相互转化也会花费太多的计算机时间, 而不适宜于实时

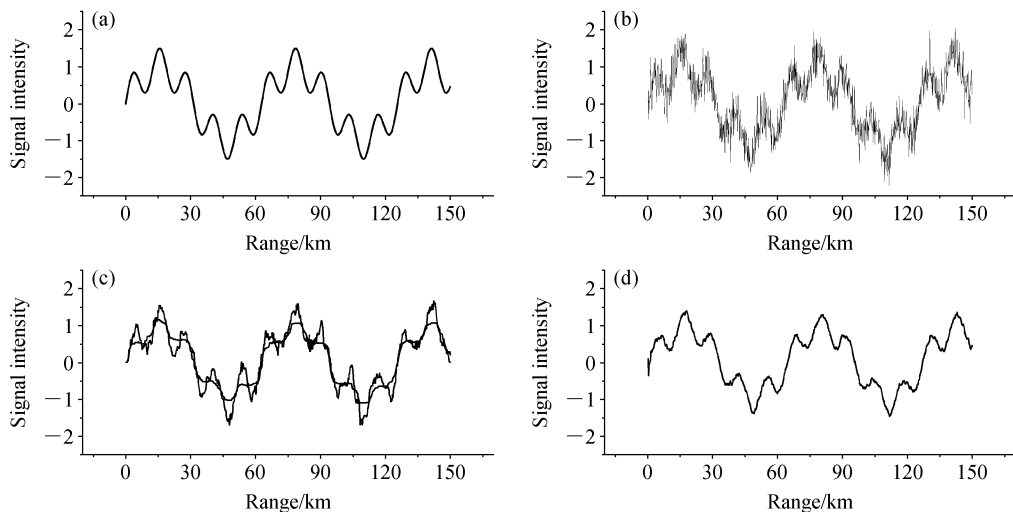


图2 中值滤波和 Kalman 滤波器的比较: (a) 原始信号; (b) 信号加高斯噪声; (c) 中值滤波后信号; (d) Kalman 滤波后信号

Fig. 2 Comparison of median filter and Kalman filter: (a) Original signal; (b) signal with added gauss noise; (c) signal with noise removed by median filter; (d) signal with noise removed by Kalman filter

处理, 而 Kalman 滤波器具有近实时地特性, 所以花费计算机时间很少。

3 衰减订正

自从雷达开始使用, 就有很多关于电磁波经历降水区域时, 吸收和散射所引起的衰减的研究, 雷达入射波的衰减是由衰减截面确定的, Brangi (2001) 研究表明, 假定粒子是球形的, 其直径为 D , 入射波长为 λ , 那么在米散射区, 衰减系数 σ_{ext} 可以使用指数关系:

$$\sigma_{\text{ext}} = C_{\lambda} D^n, \quad (13)$$

作为一级近似, 其精度已达到 $(D/\lambda)^5$ 量级。

使用差分传播相移进行衰减订正, 必须首先求出单位差分传播相移和衰减率之间的关系, 根据式 (13), 对于 3 cm 波长的雷达, 粒子直径在 $0.1 \leq D \leq 8$ mm, 如果使用一级近似, $n=3.9$, 对于粒子直径在 $5 \leq D \leq 10$ mm, 相应的 $n=4.6$, 为了简化讨论, 归纳出衰减和差分传播相移之间的关系, 这里取 $n \approx 4$ 时, 因此, 衰减率 (单位 dB/km) 可以表示为:

$$\alpha_h = 4.343 \times 10^3 \int \sigma_{\text{ext}}(D) N(D) dD \approx 4.343 \times 10^3 C_{\lambda} \int D^4 N(D) dD \quad (14)$$

式中, $N(D)$ 是雨滴谱 (Drop Size Distribution)。如果用滴谱项来表示 K_{DP} [单位: $(^\circ)/\text{km}$], 则可得

$$K_{\text{DP}} = \frac{180\lambda}{\pi} \int \text{Re}[f_h(D) - f_v(D)] N(D) dD, \quad (15)$$

其中, f_h 和 f_v 分别表示水平和垂直极化通道前向散射振幅。因此, 基于单位差分传播 K_{DP} 的衰减订正可以表示为 (Park et al., 2005):

$$\alpha_h = c_h K_{\text{DP}}, \quad (16)$$

这里, α_h 代表衰减率, 它表达了各种因素影响 K_{DP} 所造成的效应 (Gorgucci et al., 2005)。而累积差分传播相移 Φ_{DP} 是双程 K_{DP} 的累积量, 因此, 累积衰减可以表示为:

$$A_H(r_2) - A_H(r_1) = 2 \int_{r_1}^{r_2} c_h K_{\text{DP}}(r) dr = c_h [\Phi_{\text{DP}}(r_2) - \Phi_{\text{DP}}(r_1)]. \quad (17)$$

这里, r_1 、 r_2 代表雷达射线上两个距离, 如果把 r_1 设为零, 即雷达的第一个库, 那么上式变为:

$$A_H(r) = C_h [\Phi_{\text{DP}}(r) - \Phi_{\text{DP}}(0)], \quad (18)$$

其中, $A_H(r_1)=0$, $\Phi_{\text{DP}}(0)$ 是雷达射线第一个库的差分传播相移, 也就是公式 (6) 中 $(\phi_{\text{DP}})_{\text{system}}$, 它表示系统初始差分相移, 因此对雷达反射率的衰减订正可以表示为 (Park et al., 2005):

$$Z(r) = Z_m(r) + A_H(r) = Z_m(r) + c_h [\Phi_{\text{DP}}(r) - \Phi_{\text{DP}}(0)], \quad (19)$$

这里, $Z_m(r)$ 表示在距离 r 处的雷达探测值, $A_H(r)$ 表示在距离 r 处使用差分传播相移所做的订正, $Z(r)$ 表示订正后的结果。可见在使用差分传播相移

对反射率进行订正时,它们之间存在线性关系。

4 个例分析

2007 年 5 月 15 日,我国东部地区受低槽控制,东北地区位于 500 hPa 低槽槽前。850 hPa 上,15 日 08 时(北京时,下同),低槽从东北地区一直南伸到江南,15 日 14 时,吉林地区有一个低涡生成,15 日 20 时低涡仍维持在吉林省。从卫星云图上,15 日也可以看到一个低涡云系发展东移。从长春的探空曲线看,15 日 08 时长春低层的温度露点差较大,低层不饱和,而 20 时长春低层已经饱和。15 日 21 时前后,在吉林省伊通地区出现了降水过程。

4.1 个例滤波

图 3 是方位角 195° 仰角 1° 时的雷达射线,处理前 Φ_{DP} 随距离变化关系如图中虚线所示。下面的处理是基于雷达极坐标系进行,从图 3 可见,差分传播相移和理论预期的随距离增加,但是起伏很大,这主要是受大气本身的起伏和雷达机内探测等噪声的影响,即卡尔曼滤波器中,过程噪声和测量噪声的影响。特别是在雷达站附近和雷达射线远端,起伏很大,根据上面的讨论,这种起伏都是无偏的起伏,同时存在较大的初始相位偏移,本例中初始相位为 103° ,并且在雷达射线上出现了长钉状起伏的信号,这种信号就是明显的后向传播相移 δ 效应,与图 5 中的反射率比较,发现在出现 δ 效应的 5 km 和 11 km 地方,其反射率都比周围的反射率稍大,除了比较明显的 δ 效应外,还存在不明显的后向传播效应,在图 3 中较小的起伏就代表了这种结构,以及来自于其他噪声源的高频噪声。本文使用卡尔曼滤波器的目的就是要解决这几个问题,得到衰减订正使用的差分传播相移曲线。

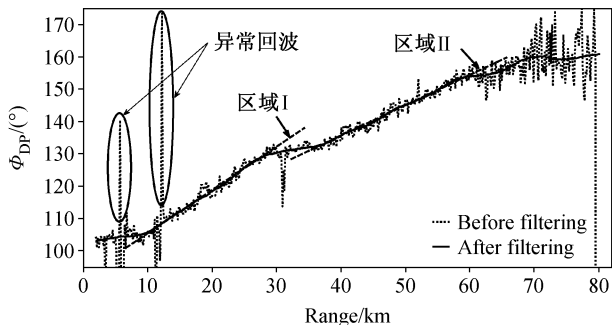


图 3 滤波前后差分传播相移随距离的变化

Fig. 3 Variation of differential propagation phase shift with distance before and after filtering

在探测中,雷达信号受到来自大气的不稳定性噪声,同时还存在雷达系统的机内噪声,通过上面的滤波处理后雷达射线(如图 3 中的实线),可见不仅减少了噪音的影响,同时也剔除了极化雷达观测量 Φ_{DP} 的后向散射分量 δ 效应,即图 3 中所示的异常回波。

使用卡尔曼滤波的方法,处理了同一时次的差分传播相移的 RHI 资料(结果如图 4 所示)。从图 4 可见,在滤波前后差分传播相移 Φ_{DP} 有明显的改善,滤波前图像起伏较大,这些起伏直接影响了后面的衰减订正的稳定性和准确性,而滤波后图像较平滑,基本滤出了 δ 效应和随机噪声。

4.2 个例衰减订正

下面以 2007 年 5 月 15 日的过程为例,通过气象目标的实际探测,来获取其中的订正参数 c_n 。如图 3 所示,根据图 1 的概念模型,在 10~30 km 范围和 30~60 km 范围,差分传播相移成线性变化,因此把差分传播相移划分成两个区域,而区域 I 的差分传播相移比区域 II 的变化大,所以区域 I 存在较区域 II 强的回波,并且这两个区域中降水单体几乎是均匀变化,可见这两个区域应该都是比较均匀的层状云区,下面使用这一约束关系,通过统计回归的方法确定衰减订正系数,从而确定衰减率和距离的关系。

使用公式(19)对这两个区域进行回归,使订正后的反射率在这两个区域保持一致,即保证这两个区域回波强度均匀,数学上的约束关系为:这两个区域中统计方差最小,回归订正结果如图 5 所示。

比较差分传播相移和反射率曲线,在订正前反射率曲线随着距离增加有明显的衰减现象(从差分传播相移图上看,并没有这么严重的衰减),订正后在区域 I 和区域 II,反射率基本保持一致,这与差分传播相移 Φ_{DP} 探测的结论一致(在这两个区域近线性变化),可见本雷达系统可以使用 $Z = Z_m + c_h \Phi_{DP}$ 来对反射率进行衰减订正,对于本例, $c_h = 0.2523$ 。在处理反射率时,也使用了前面提到的卡尔曼滤波器对反射率进行处理,图中短虚线为实测值,实线为滤波后的结果,长虚线为衰减订正后的结果。这里,对反射率进行一定程度的滤波,有利于掌握它的主要气象信息。使用实际的回波来确定订正系数的方式,具有较高的实用价值,在实际应用中往往比较有效。

为了验证这一结果在本雷达系统中的应用,把此订正关系用于雷达探测的 RHI 资料订正中,结果如图 6 所示。

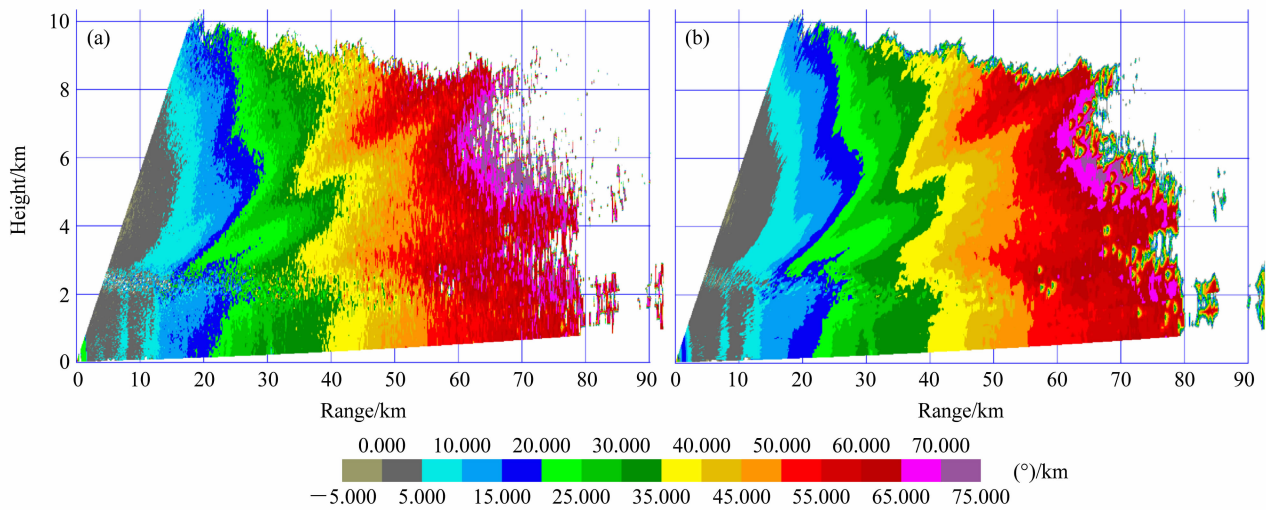


图 4 滤波前后差分传播相移的比较: (a) 滤波前; (b) 滤波后
Fig. 4 Comparison of differential propagation phase shift (a) before and (b) after filtering

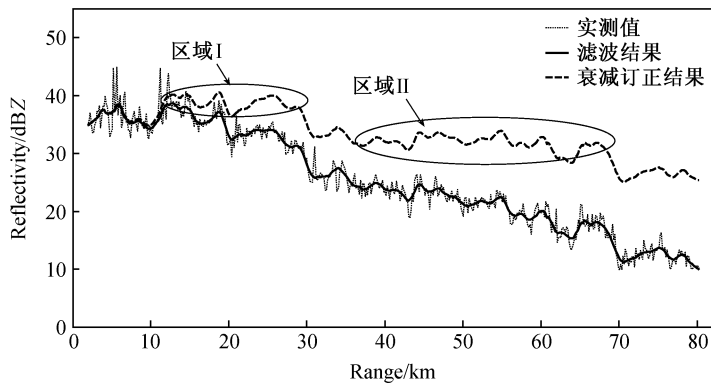


图 5 订正前后雷达射线的比较
Fig. 5 Comparison of radar rays before and after correction

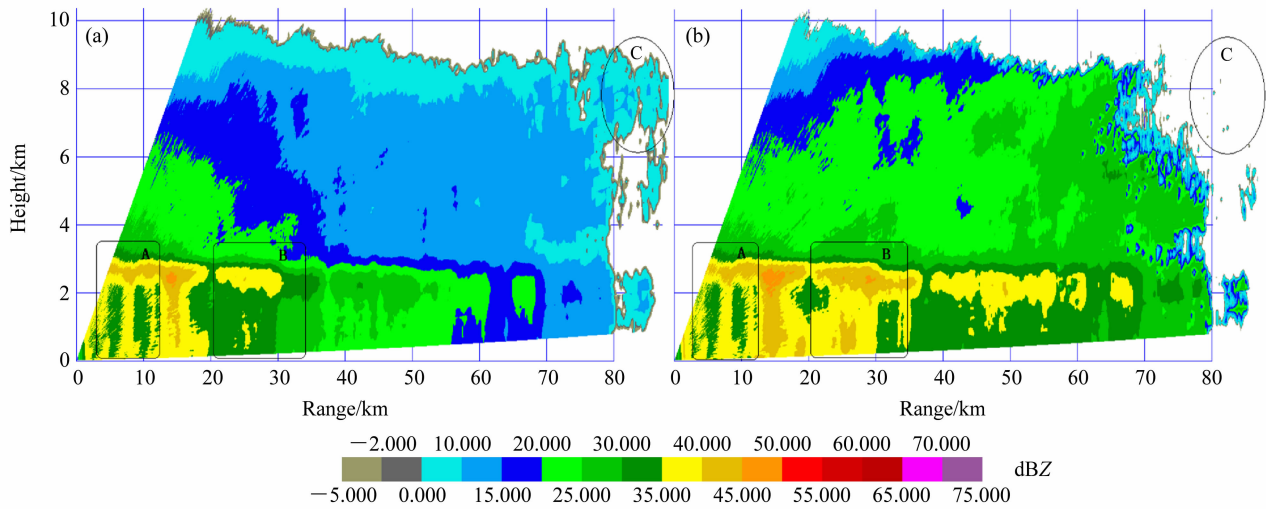


图 6 订正前后雷达反射率的比较: (a) 订正前; (b) 订正后
Fig. 6 Comparison of radar reflectivity (a) before and (b) after correction

从整体上看,本次过程中,零度层亮带在衰减订正前出现了随距离向地面靠近的趋势,而订正后基本保持水平。

比较订正前后两幅图像,发现使用这种订正方法,具有很多优点:在图 6 中的 A 区,由于雷达波束没有经历较强降水区,所以衰减较小,因此在订正前后,两副图像几乎没有差别。订正前后在 A 区中,如果把各点反射率以某一相同的 ΔZ 为间隔作统计,其数密度分布如图 7a、b 所示,从图中可见,衰减订正前后数密度分布形式基本不变,这一区域反射率的平均值分别为 40.4376 dBZ 和 40.6983 dBZ,变化不大,因此经过这种方法进行衰减订正,在弱降水区保持回波的基本性质不变。

在雷达射线经过图 6 中的 A 区和 B 区之间的强降水区域后,在 B 区及更远的区域,出现了较大的衰减,把 B 区及以远的区域按照上面同样方法统计(如图 7c、d 所示)。从图 7 中可见其平均值分别为 27.1840 dBZ 和 37.3207 dBZ,整个 B 区及以后的区域衰减相当严重,同时可以看出,订正后反射率的数密度分布谱的谱宽变窄,但是谱的分布形式,比如峰值个数分布等特征基本不变,谱型的这种变化进一步说明这种订正方式非常稳定。图 7d 中,在 5~25 dBZ 之间,订正后出现了很多小的回波,这些回波在订正前没有出现,这是由于这部分

回波已经被衰减,这种被完全衰减的回波,其信噪比(SNR)已经接近 1,但是在使用差分传播相移 Φ_{DP} 进行衰减订正时,只要 $SNR > 1$,都可以让这类弱回波再现。由于差分反射率本身的特征,这一结果还是可信的,这类回波如果通过强度叠加的订正方式将很难恢复,信号起伏很大,也不可信。在图 6 的 C 区,在订正前后出现了很大的差异,订正前有回波,订正后 C 区回波消失,在这一区域可能是零度层亮带引起的三体回波所至,这种三体回波的速度较小,且脉动较大、比较零乱,极化雷达探测到的相关系数也较小,由于地物(如风吹动树叶等)引起的多普勒频移可正、可负,且噪声较大,使差分传播相移不再可测,它基本上在最小值附近起伏,在图 4 中,这一区域就没有差分传播相移值,但是在强度图上出现了回波,可见这种订正方式具有去除这种虚假回波的能力。

图 8 是订正前后的等值线比较,观察发现:订正前等值线随着距离衰减很快,比如在零度层亮带上面的 25 dBZ、20 dBZ、15 dBZ 等值线,随着距离增加呈弧形分布,在零度层之下,距离雷达较近的等值线明显比距离雷达较远的等值线大,如图 8a 所示;在订正之后,等值线没有明显的随距离变化的趋势,另外,随着距离增加,零度层有一定程度的展宽,这主要是由于波束宽度随着距离增宽所

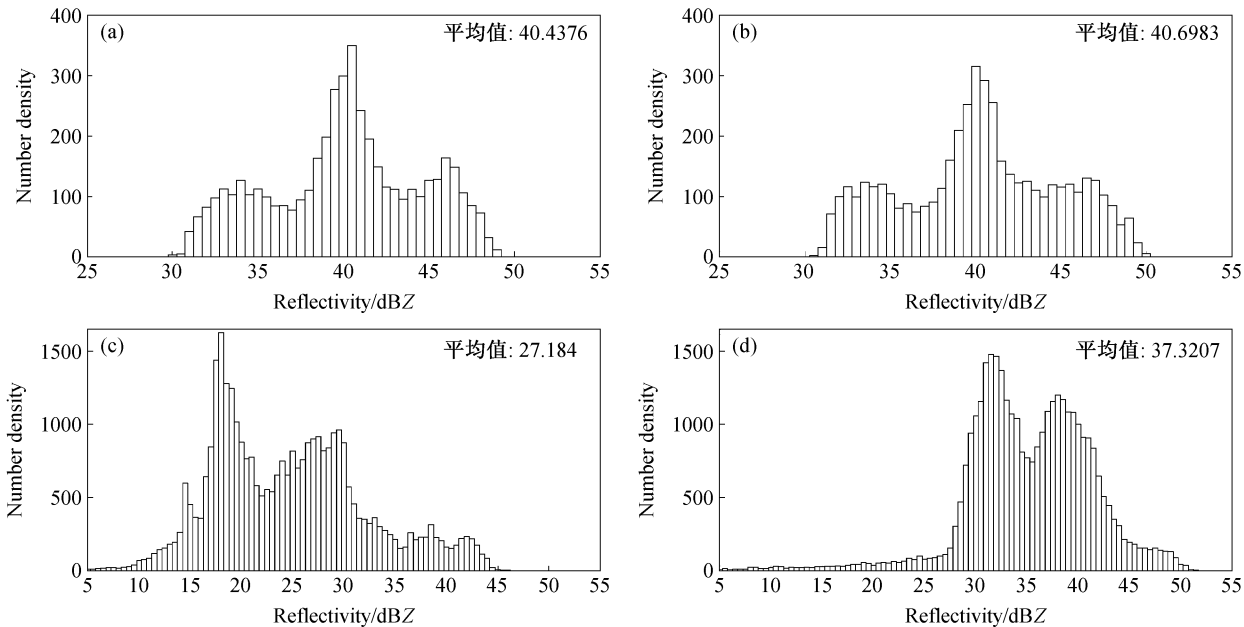


图 7 订正前(a、c)、后(b、d)各区域的反射率数密度分布:雷达波束经历(a、b)强降水区前和(c、d)强降水区后
Fig. 7 Distribution of reflectivity number density for various regions (a, c) before and (b, d) after correction; (a, b) Radar ray in front of strong precipitation region; (c, d) radar ray behind strong precipitation region

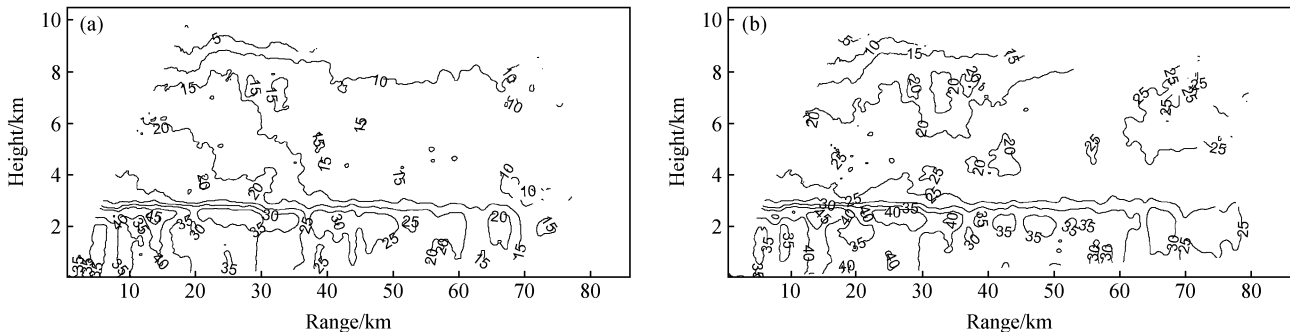


图 8 订正前 (a)、后 (b) 反射率等值线 (单位: dBZ)

Fig. 8 Reflectivity isograms (a) before and (b) after correction (units: dBZ)

致,如图 8b 所示。

5 小结与讨论

使用 X 波段雷达的一个最大困难是其衰减远大于 S 波段或 C 波段的雷达。随着雷达波束在降水介质中的传播,雷达反射率出现明显的降低,本研究提出了一种使用降水介质本身的特性进行衰减订正的方法。在使用差分传播相移进行衰减订正时,其关键问题是差分传播相移曲线的质量控制,在实际的差分传播相移探测中,包含了来自各种噪声源的影响,其中有后向传播相移 δ 效应,气象目标的涨落以及环境温度、雷达机内噪声等的影响,这些噪声都可以通过滤波的方式在一定程度上剔除。本文采用卡尔曼滤波的方法来处理双线性极化雷达的差分传播相移 Φ_{DP} ,这种方法是一种最优化自回归数据处理算法,所以对于问题的解决,它是最优的,且效率是最高的。该方法各项具有明确的物理意义,具有较好的实用价值。如果在订正前,不对雷达接收的差分传播相移中的噪声剔除,根据衰减订正方法,可以看出,后向传播相移 δ 效应及其他噪声可能远大于差分传播相移本身,这样就造成了订正后反射率严重失真,严重影响了订正的稳定性和准确性。本研究利用差分传播相移本身的特征,使用中国科学院大气物理研究所的 X 波段双极化雷达资料进行实验,通过稳定的层状云个例研究,比较衰减订正前后 RHI 图像和数密度谱的变化,说明通过滤波后的差分传播对反射率因子的订正具有较好的稳定性。对于回波较弱的情况,这种订正方法的稳定性就如同文中层状云靠近雷达的近区一样。进一步研究了很多弱回波的个例,发现:不论是弱回波还是强回波,这种订正方法的稳定性

和准确性都只是依赖于差分传播相移的准确性,在弱回波情况下,虽然差分传播相移中后向传播相移 δ 较小,但是其它噪声仍然存在且更加突出,所以对差分传播相移滤波仍然必要。通过收集大量不同时间、同一地点、同一部雷达的均匀层状云降水区的探测资料,在滤波处理的基础上,通过统计手段确定衰减订正系数的方法,具有一定的实际应用价值。为了建立适合于本雷达系统的稳健的强度衰减订正系数,需要收集更多的观测资料做进一步的研究。

参考文献 (References)

- Anagnostou E N, Anagnostou M N, Krajewski W F, et al. 2004. High-resolution rainfall estimation from X-band polarimetric radar measurements [J]. *J. Hydrometeorology*, 5 (1): 110–128.
- Bringi V N. 2001. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39 (9): 1906–1915.
- Bringi V N, Chandrasekar V. 2002. *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications* [M]. Cambridge University Press.
- Gorgucci E, Chandrasekar V. 2005. Evaluation of attenuation correction methodology for dual-polarization radars: Application to X-band systems [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22 (8): 1195–1206.
- Gorgucci E, Scarchilli G, Chandrasekar V, et al. 1998. Intercomparison of techniques to correct for attenuation of C-band weather radar signals [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 37 (8): 845–853.
- Hildebrand P H. 1978. Iterative correction for attenuation of 5 cm radar in rain [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 17 (4): 508–514.
- Hubbert J, Bringi V N. 1995. An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar

- measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12 (3): 643–648.
- Johnson B C, Brandes E A. 1987. Attenuation of a 5-cm wavelength radar signal in the Lahoma-Orienta storms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 4 (3): 512–517.
- Kalman R E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. *Transactions of the ASME -Journal of Basic Engineering (Series D)*, 82: 35–45.
- 梁海河, 徐宝祥, 刘黎平, 等. 2006. 双偏振天气雷达同时收发模式的一种改进方法 [J]. *大气科学*, 30 (4): 635–644. Liang Haihe, Xu Baoxiang, Liu Liping, et al. 2006. An improved method on the simultaneous transmission scheme of dual polarimetric weather radar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (4): 635–644.
- Park S G, Bringi V N, Chandrasekar V, et al. 2005. 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*, 22 (11): 1621–1632.
- 秦琰琰, 李柏, 张沛源. 2006. 降水的雷达反射率因子与大气相对湿度的相关关系研究 [J]. *大气科学*, 30 (2): 351–359. Qin Yanyan, Li Bai, Zhang Peiyuan. 2006. A study of the relationship between radar reflectivity of rain and relative humidity of atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (2): 351–359.
- Ryzhkov A, Zrnić D. 1996. Assessment of rainfall measurement that uses specific differential phase [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 35 (11): 2080–2090.
- Seliga T A, Bringi V N. 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 15 (1): 69–76.
- Wiener N. 1949. *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series* [M]. New York: Wiley.
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 511. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. 2001. *Radar Meteorology (in Chinese)* [M], Beijing: China Meteorological Press, 511pp.
- Zrnić D S, Melnikov V M, Carter J K. 2006. Calibrating Differential Reflectivity on the WSR-88D [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23 (7): 944–951.