赵川鸿，周筠珺，肖辉，等. 2019. X 波段双线偏振多普勒雷达共极化差分相移资料的滤波方法研究 [J]. 大气科学, 43 (2): 285−296. Zhao Chuanhong, Zhou Yunjun, Xiao Hui, et al. 2019. A study of method for filtering copolar differential phase of X-band dual-polarimetric Doppler weather radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 285−296, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17289.

X 波段双线偏振多普勒雷达共极化差分相移资料的滤波方法研究

赵川鸿[1] 周筠珺[1,2] 肖辉[3,4] 赵鹏国[1] 张晓玲[5] 胡天洁[5]

1 成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室，成都 610225
2 南京信息工程大学气象灾害预警预报与评估协同创新中心，南京 210044
3 中国科学院大气物理研究所中国科学院云降水物理与强风暴重点实验室，北京 100029
4 中国科学院大学，北京 100049
5 北京市气象信息中心，北京 100089

摘 要 为了提高 X 波段双线偏振多普勒雷达的共极化差分相移 Ψ_C 质量，利用 714XDP-A 型车载 X 波段双线偏振多普勒雷达在北京顺义的探测资料，构造了一个综合滤波方法。将其应用于滤波处理，得到结果：（1）综合小波去噪滤波方法在滤波处理及差分传播相移率 K_{DP} 的估算方面相较于中值滤波、综合滑动平均、综合卡尔曼滤波及综合有限脉冲响应（FIR）滤波都是最优秀的，其能较好地保留原始 Ψ_C 平均趋势及细节特征（偏差基本在±2°可信范围内，部分区域由于对原始 Ψ_C 细节特征的保留会略有超出），避免探测误差零值对滤波产生的影响（误差零值订正值回归平均趋势水平，偏差在±2°可信范围内），对原始 Ψ_C 距离廓线的平滑程度达到了 94%～97%[平滑了超出±1.5° Gate^{-1}（Gate 表示雷达距离库）的波动，对±1.5° Gate^{-1} 内波动保留]；（2）估算的 K_{DP} 整体在±5° km^{-1} 边界阈值内，避免了探测误差零值、环境噪声和 δ 对 K_{DP} 估算产生的误差影响，K_{DP} 对较强降水指示明显（在回波强度 30 dB$Z \leqslant Z_H <$ 37 dBZ 的层积云降水中 K_{DP} 普遍大于 0.25° km^{-1}，峰值可达到 4.3° km^{-1}；在回波强度 30 dB$Z \leqslant Z_H <$ 50 dBZ 的积雨云降水中 K_{DP} 普遍大于 0.1° km^{-1}，峰值可达到 1.95° km^{-1}）。本文工作对于降水估测和水成物粒子识别有着改善效果，这对雷暴天气预警预报具备重要意义。

关键词 共极化差分相移 滤波 X 波段双线偏振多普勒雷达
文章编号 1006-9895(2019)02-0285-12 **中图分类号** P413 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17289

A Study of Method for Filtering Copolar Differential Phase of X-Band Dual-Polarimetric Doppler Weather Radar

ZHAO Chuanhong[1], ZHOU Yunjun[1,2], XIAO Hui[3,4], ZHAO Pengguo[1], ZHANG Xiaoling[5], and HU Tianjie[5]

收稿日期 2017-11-12；**网络预出版日期** 2018-07-02
作者简介 赵川鸿，男，1994 年出生，硕士研究生，主要从事大气物理学与大气环境研究。E-mail:18380465212@163.com
通讯作者 周筠珺，E-mail: zhouyj@cuit.edu.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41875169，北京市自然科学基金项目 8141002，国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目 2014CB441401、2014CB441403，成都市科技惠民项目 2016-HM01-00038-SF，成都市科技治霾新技术新产品应用示范项目 2018-ZM01-00038-SN，四川省教育厅项目 16CZ0021、17ZB0087

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41875169), Natural Science Foundation of Beijing (Grant 8141002), National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (Grants 2014CB441401, 2014CB1403), Science and Technology Project of Chengdu (Grant 2016-HM01-00038-SF), Demonstration Project of Technology Application for Haze Control of Chengdu (Grant 2018-ZM01-00038-SN), Education Department Project of Sichuan Province (Grants 16CZ0021, 17ZB0087)

1 *Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province*, *College of Atmospheric Science*, *Chengdu University of Information & Technology*, *Chengdu* 610225

2 *State Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044

3 *Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms*, *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences* (*IAP/CAS*), *Beijing* 100029

4 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

5 *Meteorological Information Center of Beijing*, *Beijing* 100089

Abstract Measurements of the 714XDP-A X-band dual-polarimetric Doppler radar located at Shunyi of Beijing are used to develop an integrated filter method that can improve the quality of the copolar differential phase Ψ_C measured by X-band dual-polarimetric Doppler radar. Application of the integrated filter method shows that: (1) The integrated wavelet de-noising method is the best and better than the median, integrated mean, integrated Kalman and integrated FIR (Finite Impulse Response) filters. It retains the mean trend of raw Ψ_C range profiles and details [deviations are within ±2°, which indicates the results are reliable, although the values may slightly exceed the range in several gates (the numbers of radar range profile)]. Furthermore, the influence of zero value caused by measurement errors on the filtered results is avoided (the corrected value for zero value in the measurements returns to the level of mean trend with deviations within ±2°, which is regarded as credible). In addition, the fluctuation index of Ψ_C range profiles filtered by integrated wavelet de-noising can be reduced by 94%–97% compared to raw Ψ_C range profiles, and the smoothing effect is remarkable (smoothing the fluctuations exceeding ±1.5° Gate^{-1}, and retaining the fluctuations inside ±1.5°Gate^{-1}). (2) The estimated specific differential propagation phase (K_{DP}) are within the range of ±5° km^{-1}, and influences caused by zero errors in the measurements and δ and environment noises are avoided. In addition, K_{DP} can well indicate strong precipitation (for precipitation in stratocumulus clouds, radar reflectivity is usually within 30 dB$Z \leqslant Z_H <$ 37 dBZ, and K_{DP} generally is greater than 0.25° km^{-1} with the maximum of 4.3° km^{-1}; for precipitation in cumulonimbus clouds, radar reflectivity usually is within 30 dB$Z \leqslant Z_H <$ 50 dBZ, and K_{DP} is generally greater than 0.1° km^{-1} with the maximum of 1.95° km^{-1}). This study is beneficial to rainfall estimation and hydrometeors classification, which is important for thunderstorm weather forecast.

Keywords Copolar differential phase, Filter, X-band dual-polarimetric Doppler radar

1 引言

双线偏振雷达探测降水系统获得的水平反射率因子 Z_H、差分反射率 Z_{DR}、差分传播相移 Φ_{DP}、差分传播相移率 K_{DP} 和共极化相关系数 ρ_{HV} 等参数有利于降水系统的粒子相态、滴谱分布（DSD）等云微物理结构变化规律研究，从而明显提高雷达对于降水估测以及降水粒子相态识别的能力（Seliga and Bringi，1976；Zrnić and Ryzhkov，1999；Doviak et al.，2000；Straka et al.，2000；Bringi and Chandrasekar，2001；Park et al.，2009，2015；Chang et al.，2014）。

为了提高降水估测水平，首要条件是提升差分传播相移率 K_{DP} 的估算质量，因为通过建模研究证明 K_{DP}（或者综合 K_{DP} 和 Z_{DR}）对于降水估算来说是优越的估算量（Sachidananda and Zrnić，1986；Bringi et al.，1990；Jameson and Caylor，1994；Ryzhkov et al.，2003）。K_{DP} 是差分传播相移 Φ_{DP} 的径向距离廓线平均趋势的斜率，而实际探测过程中，雷达探测到的共极化差分相移 Ψ_C 包含了差分传播相移 Φ_{DP} 和差分后向散射相移 δ，Mueller（1984）提出算法计算 Ψ_C：

$$\Psi_C = \arg(\langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle) + 2(k_h^r - k_v^i) r = \delta + \Phi_{DP}, \quad (1)$$

其中，“arg”表示取幅角计算，“*”表示取共轭，S_{vv} 是垂直散射幅度，S_{hh} 是水平散射幅度，k_h 是水平传播常数，k_v 是垂直传播常数，上标 r、i 分别代表实部和虚部，尖角括号代表整体平均，δ 是差分后向散射相移（短波长雷达在探测较大水成物粒子时由于非瑞利散射导致 δ 的产生），Φ_{DP} 是差分传播相移。K_{DP} 通过有限差分估算（Hubbert and Bringi，1995）：

$$K_{DP} = \frac{\Phi_{DP}(r_2) - \Phi_{DP}(r_1)}{2(r_2 - r_1)}, \quad (2)$$

其中，r_1、r_2 是雷达径向距离。实际雷达探测资料中原始 Ψ_C 存在探测误差：（1）探测误差零值；（2）随距离的增加，径向距离廓线波动幅度也增大；（3）在雷达附近区域的 Ψ_C 资料质量较差。原始 Ψ_C 资料存在的探测误差与环境噪声（包括系统噪声、随机波动以及杂波等）和 δ 有关（Ryzhkov and Zrnić，1998；Gosset，2004；Ryzhkov，2007；Gorgucci and Baldini，2015）。Ryzhkov（2007）还指出，中尺度

对流系统中，当非均匀波束填充存在，波束的展宽效应是造成 Φ_{DP} 误差显著的首要原因（比起纯统计误差和 δ 造成的误差），并提出一个简单模型用以定量非均匀波束填充对 Φ_{DP} 造成的误差：

$$\Delta\Phi_{DP} = 0.02\Omega^2\left(\frac{d\Phi'_{DP}}{d\theta}\frac{dZ_{HV}}{d\theta} + \frac{d\Phi'_{DP}}{d\phi}\frac{dZ_{HV}}{d\phi}\right), \quad (3)$$

其中，Ω 表示单程 3 dB 天线模式宽度，θ 表示仰角，ϕ 表示方位角，$\Delta\Phi_{DP}$ 表示 Φ_{DP} 误差。由公式（3）可见，当雷达波束宽度越大，将会导致 Φ_{DP} 误差过大。想要精确地识别以及订正探测误差是不实际的，但是可以通过判断其大致的偏差范围（−2°～2°）确定资料是否可用于降水估测（Ryzhkov，2007）。因此，由于环境噪声和 δ 的存在，使得由 Ψ_C 近似估算的 Φ_{DP} 存在误差，进而对 K_{DP} 的估算造成严重的干扰，从而影响降水估测，所以对 Ψ_C 进行滤波处理是很有必要的。国外对于 C 波段以及 X 波段的双偏振雷达 Ψ_C 资料滤波处理主要应用 Hubbert 和 Bringi（1995）提出的有限冲击响应（FIR）迭代滤波方法（Hubbert and Bringi，1995；Park et al.，2005，2015；Chang et al.，2014）。国内学者对于 Ψ_C 资料的滤波处理研究还相对较少，近年来，何宇翔等（2009）引进了卡尔曼滤波，杜牧云等（2012a，2012b）利用信噪比和 ρ_{HV} 将回波信号分为较好、较差和差，并根据不同需求进行处理，形成了一套分类处理方法，Hu and Liu（2014）利用小波去噪对 C 波段双偏振雷达探测的台风和飑线两种降水系统的 Ψ_C 资料进行滤波处理，并与滑动平均、中值滤波、卡尔曼滤波以及 FIR 迭代滤波等滤波方法对比，指出利用小波滤波在有效平滑原始 Ψ_C 径向距离廓线的同时能较好地保留原始 Ψ_C 径向距离廓线平均趋势和细节特征，这些细节特征对于杂波的识别以及定位降水大值区有着很好的作用。

随着对降水估测质量以及粒子相态识别的要求越来越高，由环境噪声和 δ 导致的 Ψ_C 原始探测误差不容忽视，为了更好的估算 K_{DP}，研究应用于 X 波段双线偏振雷达的 Ψ_C 资料的滤波方法是很有必要的，这对于提高雷达对降水估测以及降水粒子相态识别的能力具备重要的意义。

2　资料和方法

2.1　数据来源

本文数据来自北京顺义（40.18°N，116.68°E）的 714XDP-A 型车载 X 波段双线偏振多普勒天气雷达。该雷达海拔高度为 26.1 m，最大探测范围 150 km，采用双发双收模式，可探测 8 个偏振参量，包含水平反射率因子（Z_H）、垂直反射率因子（Z_V）、多普勒径向速度（V）、速度谱宽（W）、差分反射率（Z_{DR}）、共极化差分相移（Ψ_C）、差分传播相移率（K_{DP}）以及共极化相关系数（ρ_{HV}），主要性能指标如表 1 所示。

表 1　714XDP-A 型 X 波段双线偏振多普勒天气雷达主要性能指标

Table 1 The main parameters of 714XDP-A X-band dual-polarimetric Doppler weather radar

项目	指标
工作频率	9.37 GHz
天线增益	41.6 dB
波束宽度	1°
脉冲重复频率	500、1000、2000 Hz
雷达波极化状态	水平、垂直
噪声系数	2.3 dB
主要探测参量	Z_H、Z_V、V、W、Z_{DR}、Φ_{DP}、K_{DP}、ρ_{HV}

2.2　数据预处理

对 714XDP-A 型车载 X 波段双线偏振多普勒天气雷达探测的 Ψ_C 资料先进行地物杂波抑制及退折叠处理（如有必要的情况下进行，高仰角 3°～5°的探测资料被认为基本不受地物杂波影响）。地物杂波识别采用模糊逻辑识别（Cho et al.，2006），对于 Ψ_C 资料折叠区域的退折叠，沿用径向连续性检查的方法（肖艳姣等，2012）。因为 X 波段雷达存在的衰减现象，还需对 Z_H 以及 Z_{DR} 进行衰减订正，采用自适应约束算法（Park et al.，2005；毕永恒等，2012）。以下资料都是经过预处理之后的资料。

2.3　原始 Ψ_C 探测误差

选取 2015 年 8 月 7 日 19:50（北京时，下同）探测资料对原始 Ψ_C 探测误差进行说明，图 1a、b 中，Ψ_C 红色矩形框内出现的零值区域（距离库数 264～266），但是对应 Z_H 距离廓线（图 1a）在此区域仍有有效回波，这种 Z_H 不为零而 Ψ_C 出现的零星零值是探测误差零值。同时，该资料随着距离库数的增加，Ψ_C 距离廓线的抖动幅度也逐渐增大，并且在距离库数 6 以内 Ψ_C 探测值极不稳定。其中在距离库数 217～218 的 Ψ_C 径向增量达到 9°，考虑为明显的 δ 效应。利用中值滤波、滑动平均、小波去噪、卡尔曼滤波及 FIR 对该资料进行滤波处理，并选取方位角 37°径向距离廓线（图 2）。

由图 2 可见：（1）滑动平均、小波去噪、卡尔

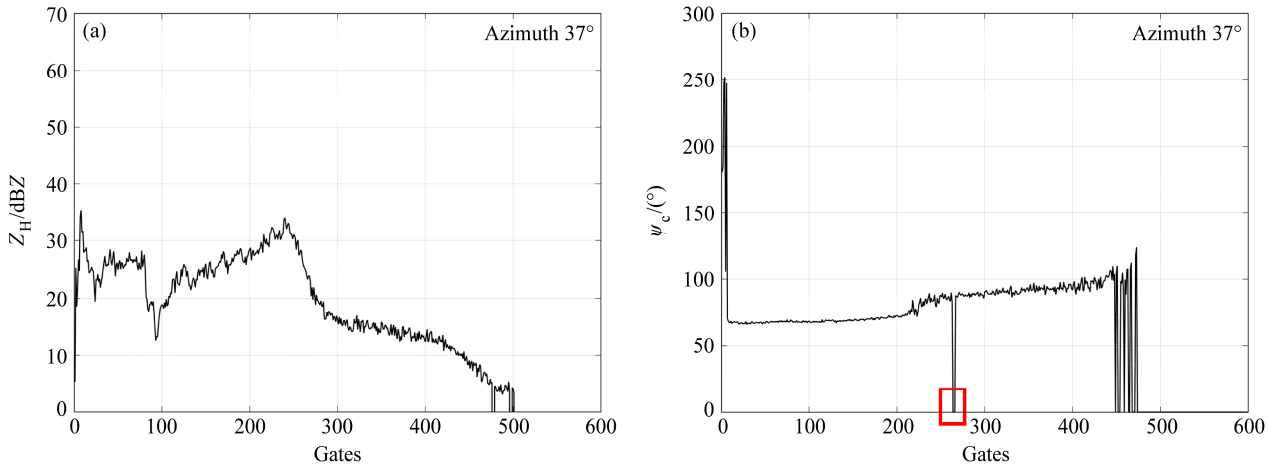

图 1 2015 年 8 月 7 日 19:50（北京时，下同）探测资料：（a）反射率因子 Z_H 在方位角 37°径向距离廓线；（b）共极化差分相移 Ψ_C 在方位角 37°径向距离廓线（红色矩形框内是 Ψ_C 零值）

Fig. 1 Measurements at 1950 BJT (Beijing time) 7 August 2015: (a) The radial range profile at azimuth 37° of reflectivity Z_H; (b) the radial range profile at azimuth 37° of copolar differential phase Ψ_C (the values of Ψ_C inside the red rectangle are 0°)

曼滤波以及 FIR 迭代滤波都对探测误差零值敏感，不能对其进行有效订正，尤其是 FIR 滤波后由于探测误差零值的影响造成距离库数 266～282 上偏离平均趋势严重，数据严重失真；（2）滑动平均、小波去噪以及卡尔曼滤波对 δ（如距离库数 217～218）和环境噪声（如距离库数 220～225）特征进行了保留；（3）FIR 迭代滤波对于原始 Ψ_C 径向距离廓线的平均趋势保留不如中值滤波、滑动平均、小波去噪和卡尔曼滤波，其在距离库数 213～238 段失真较为严重。综上，在利用滑动平均、小波去噪、卡尔曼滤波以及 FIR 迭代滤波时，需要对原始 Ψ_C 探测误差零值进行订正避免对滤波结果进行干扰造成 K_{DP} 估算误差；对于滑动平均、小波去噪和卡尔曼滤波还需要对原始 Ψ_C 的 δ 及环境噪声进行去噪处理。

2.4 方法

对于原始 Ψ_C 的 δ 及环境噪声的去噪处理本文提出资料识别方法，对于原始 Ψ_C 探测误差零值的订正本文提出逐步订正方法。

（1）资料识别

Hubbert and Bringi（1995）指出差分传播相移 Φ_{DP} 是距离累积量，即使在大雨情况下其增量也应小于 8° km^{-1}～10° km^{-1}（根据雷达频率不同而有所不同），Φ_{DP} 是距离的平滑函数并且其径向距离廓线变化缓慢。因此从理论上讲，Φ_{DP} 的径向距离廓线整体上应该呈随距离的增大而增加的趋势（Hubbert and Bringi，1995；Ryzhkov and Zrnić，1998；Wang and Chandrasekar，2009），并且其径向距离增量在一定范围内。Ryzhkov（2007）指出，在 X 和 C 波段双偏振雷达实际应用中，1°～2°的统计波动范围被认为是 Φ_{DP} 估算存在的典型边界。这说明由 δ 和环境噪声引起的不可取的波动超出±1°～2°范围，并且结合 Hubbert and Bringi（1995）指出的 Φ_{DP} 径向增量理论阈值应在 8° km^{-1}～10° km^{-1}（对应本文 1.2° Gate^{-1}～1.5° Gate^{-1}）。

因此本文对 Ψ_C 求取径向增量（$\Delta\Psi_C$），其单个径向距离库单元分辨率为 0.15 km，利用模糊逻辑方法对径向增量（$\Delta\Psi_C$）进行识别，从而识别出 δ 和环境噪声引起的增量。$\Delta\Psi_C$ 计算公式如下：

$$\Delta\Psi_C = \Psi_{C(i+1)} - \Psi_{C(i)}, \qquad (4)$$

其中，i 代表径向距离库数。在计算$\Delta\Psi_C$ 前，由于本部雷达在距离库数 6 以内，雷达附近 Ψ_C 质量很差，其径向增量超过±50°，Ψ_C 变化趋势不可信，就算其中参杂有降水回波信号，也无法参考，所以不考虑这部分不可信资料（杜牧云等，2012a）。

综合前人对于 Ψ_C 径向增量的统计研究建立了基于不对称梯形函数的特征参量$\Delta\Psi_C$ 的隶属函数模糊基。其中，不对称梯形函数：

$$\mathrm{MF}(x, x1, x2, x3, x4) = \begin{cases} 0, & x < x1 \\ \dfrac{x - x1}{x2 - x1}, & x1 \leqslant x \leqslant x2 \\ \dfrac{x4 - x}{x4 - x3}, & x3 \leqslant x \leqslant x4 \\ 0. & x4 < x \end{cases} \qquad (5)$$

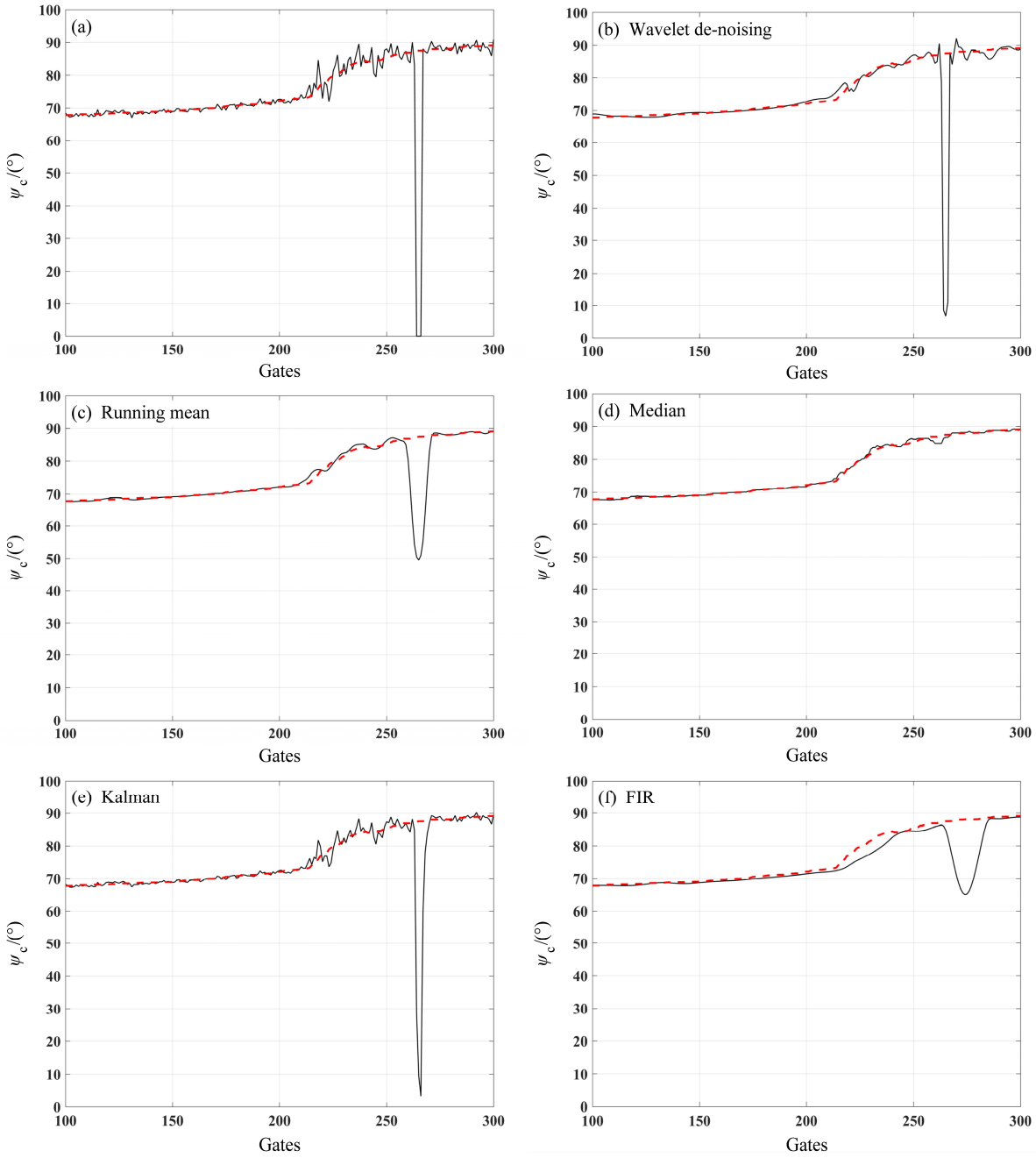

图 2　2015 年 8 月 7 日 19:50 Ψ_C 在方位角 37°径向距离廊线：（a）原始资料；（b–f）对资料分别进行小波去噪、滑动平均、中值滤波、卡尔曼滤波和 FIR 滤波处理。红色虚线是原始 Ψ_C 径向距离廊线平均趋势

Fig. 2　The radial range profiles of Ψ_C at azimuth 37° at 1950 BJT 7 August 2015: (a) Raw data, (b–f) filtered by wavelet de-noising, running mean, median, Kalman, and FIR (Finite Impulse Response) filters. The red dashed line in each panel denotes the mean trend of raw Ψ_C range profile

隶属函数值 MF_{total} 采用等权重求和集成，阈值定义为 0.5，$MF_{total}\geqslant 0.5$ 的 Ψ_C 资料为差资料（表示 Ψ_C 径向距离库增量超出±1.5°，受 δ 和噪声污染），$0<MF_{total}<0.5$ 的 Ψ_C 资料为一般资料（表示 Ψ_C 径向距离库增量在±1.5°内，有可能存在轻微的 δ 和噪声污染），$MF_{total}=0$ 的 Ψ_C 资料为较好资料（表示 Ψ_C 径向距离库增量在±1°内，可认为不存在 δ 和噪声污染）。

（2）逐步订正

将识别后的资料进行处理，重构 Ψ_C 数据。首先因为差资料（$MF_{total}\geqslant 0.5$）存在 δ 以及环境噪声明显，因此滤除，对于一般资料（$0<MF_{total}<0.5$），即使其中存在噪声也是轻微的，对于滤波结果不会有太大影响，为了尽可能保留原始 Ψ_C 数据特征，

因此选取一般资料以及较好资料一起重构 Ψ_C。利用识别后得到的较好资料和一般资料作为可信值，而后利用 Z_H 识别资料序列中的零值是否为误差值(对比 Z_H 与 Ψ_C，如果在 Z_H 不为零时，Ψ_C 出现零值，则判定为误差值；如果两者都为零，则是合理零值)，如果是误差零值则用向前相邻的可信值代替，合理零值则继续保留（将其称为逐步订正法），因为 Φ_{DP} 的径向距离廓线变化是缓慢的，而且整体上应该呈随距离的增大而增加的趋势（Hubbert and Bringi，1995；Ryzhkov and Zrnić，1998；Wang and Chandrasekar，2009），因此逐步订正的结果是较为合理的并且近似满足 Φ_{DP} 的理想变化趋势，同时，从理论上讲，这样的订正可以修正原始 Ψ_C 的误差零值，并且不改变合理零值。经过逐步订正法处理能简单且较为合理地订正原始 Ψ_C 资料探测误差零值，并以原始 Ψ_C 径向距离廓线平均趋势作为基准判定滤波后 Ψ_C 径向距离廓线与原始 Ψ_C 径向距离廓线平均趋势偏差是否在±2°可信范围内。

因此，利用滑动平均、小波去噪和卡尔曼滤波时先对原始 Ψ_C 进行资料识别和逐步订正（称为 A 类处理），而利用 FIR 迭代滤波时只需要对原始 Ψ_C 探测误差零值进行订正（称为 B 类处理），对于中值滤波不做处理，如表 2 所示。

表 2 Ψ_C 的综合处理方法

Table 2 The composite processing of Ψ_C

处理类别	方法
A（资料识别、逐步订正）	滑动平均 小波去噪 卡尔曼滤波
B（逐步订正）	FIR
不处理	中值滤波

3 结果分析

3.1 滤波对比

由于层云降水和对流云降水的不同，本文分别选取了一次层积云降水过程和一次积雨云降水过程进行讨论。2015 年 8 月 7 日 19:50（仰角 5°）雷达平面位置显示器（PPI）显示（图 3a）这是一次层积云降水过程，在方位角 37°径向上主要为层云降水，混杂小范围积云对流降水，降水范围大致在距离库数 93～311，其中在距离库数 264～266 存在探测误差零值，该径向上存在 30 dBZ≤Z_H<37 dBZ 的较强降水区域[张培昌等（2000）指出，如果 Z_H≥30 dBZ，就可能产生较强的降水]，其范围大致在距离库数 198～259（29.7～38.85 km），云高大约在 3 km 左右。

同时为了探究对流降水系统，选取了 2015 年 6 月 26 日 22:26（仰角 3°）探测资料，如图 3b 所示，在雷达站西南方向，方位角 210°径向上存在雷暴单体，为积雨云降水，降水范围大致在距离库数 533～690，其中距离库数 586、648～649 存在探测误差零值，该径向上存在回波强度为 30 dBZ≤Z_H<50 dBZ 的较强降水区域，大致范围在距离库数 623～682（93.45～102.3 km），其中心回波强度 45 dBZ≤Z_H<50 dBZ，所在高度在 5.24 km 左右，所在范围 667～674。

针对降水区域应用中值滤波、综合滑动平均、综合小波去噪、综合卡尔曼滤波和综合 FIR 滤波五种方法对 Ψ_C 分别进行滤波处理（已经过 A、B 类综合处理；图 4），并统计五种方法滤波后 Ψ_C 径向

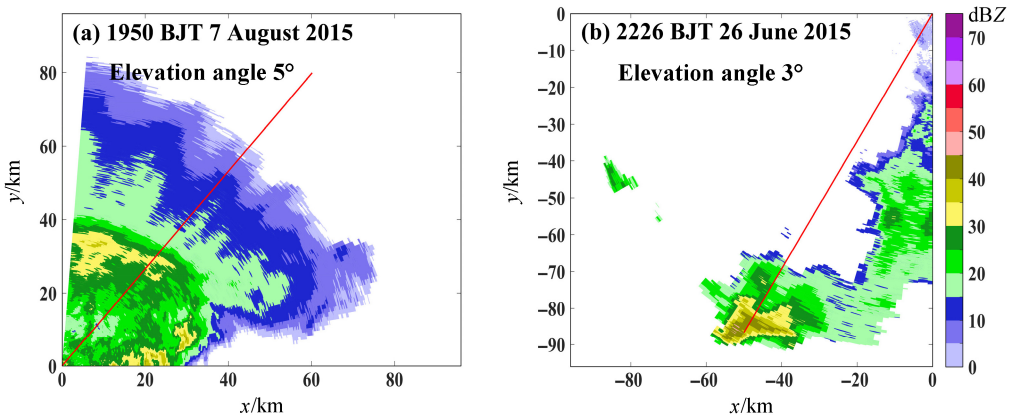

图 3 2015 年（a）8 月 7 日 19:50（仰角 5°）反射率因子 Z_H（红线代表方位角 37°径向）和（b）6 月 26 日 22:26（仰角 3°）反射率因子 Z_H（红线代表方位角 210°径向）

Fig. 3 (a) The reflectivity Z_H at the elevation angle 5° at 1950 BJT 7 August 2015 (the red solid line denotes the radial at azimuth 37°); (b) the reflectivity Z_H at the elevation angle 3° at 2226 BJT 26 June 2015 (the red solid line denotes the radial at azimuth 210°)

距离廓线与原始 Ψ_C 径向距离廓线平均趋势的偏差（图 5）以及滤波后的 Ψ_C 径向波动指数 FIX（Fluctuation Index；表 3），FIX 算法如下：

$$\mathrm{FIX}=\frac{1}{n-1}\sum_{i=2}^{n}\left|\Phi_{\mathrm{DP}}^{i}-\Phi_{\mathrm{DP}}^{i-1}\right|, \qquad (6)$$

其中，i 表示距离库数，n 表示总的距离库数，Φ_{DP} 是 Ψ_C 滤波后得到的近似值。

由图 4、图 5 可见：（1）经过 A、B 类处理后的综合滤波方法较好地抑制了探测误差零值（图 4a1 距离库数 264～266，图 4a2 距离库数 586、648～649）及 δ（如图 4a1 中距离库数 217～218）和环境噪声（如图 4a1 中距离库数 220～225）对滤波结果

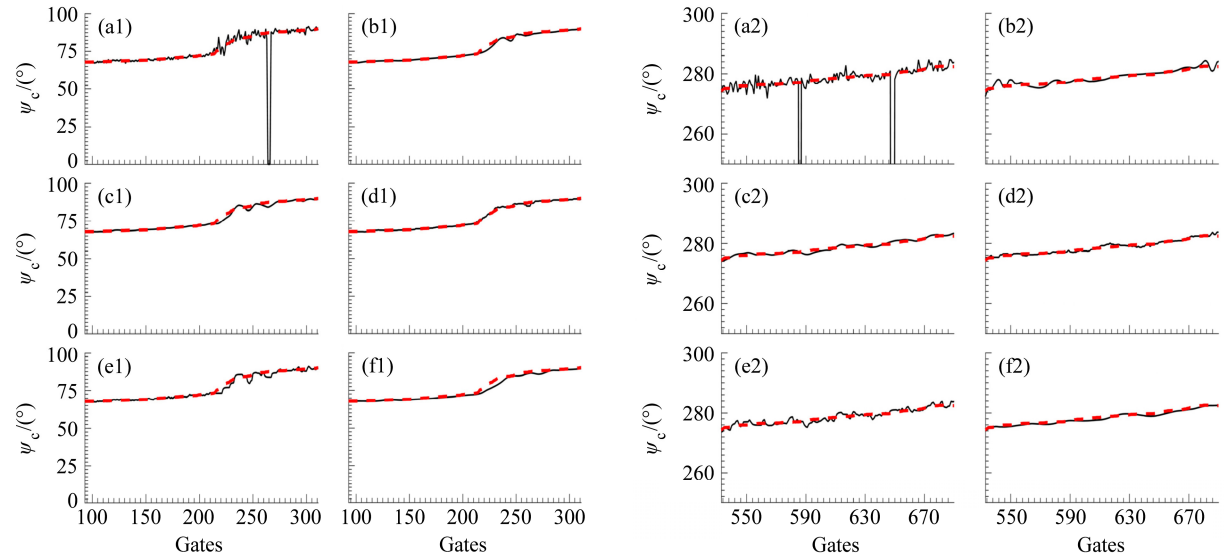

图 4　2015 年 8 月 7 日 19:50 时层积云（Sc）和 2015 年 6 月 26 日 22:26 时积雨云（Cb）中（a1、a2）原始 Ψ_C、（b1、b2）综合小波去噪、（c1、c2）综合滑动平均、（d1、d2）中值滤波、（e1、e2）综合卡尔曼滤波和（f1、f2）综合 FIR 滤波（其中红色虚线是原始 Ψ_C 径向距离廓线平均趋势）

Fig. 4　(a1, a2) The raw Ψ_C range profiles for Stratocumulus (Sc) (1950 BJT on 7 August 2015) and Cumulonimbus (Cb) (2226 BJT on 26 June 2015) respectively, and Ψ_C filtered by (b1, b2) integrated wavelet de-noising, (c1, c2) integrated running mean, (d1, d2) median, (e1, e2) integrated Kalman, and (f1, f2) integrated FIR filters (the red dashed line in each panel denotes the mean trend of raw Ψ_C range profile)

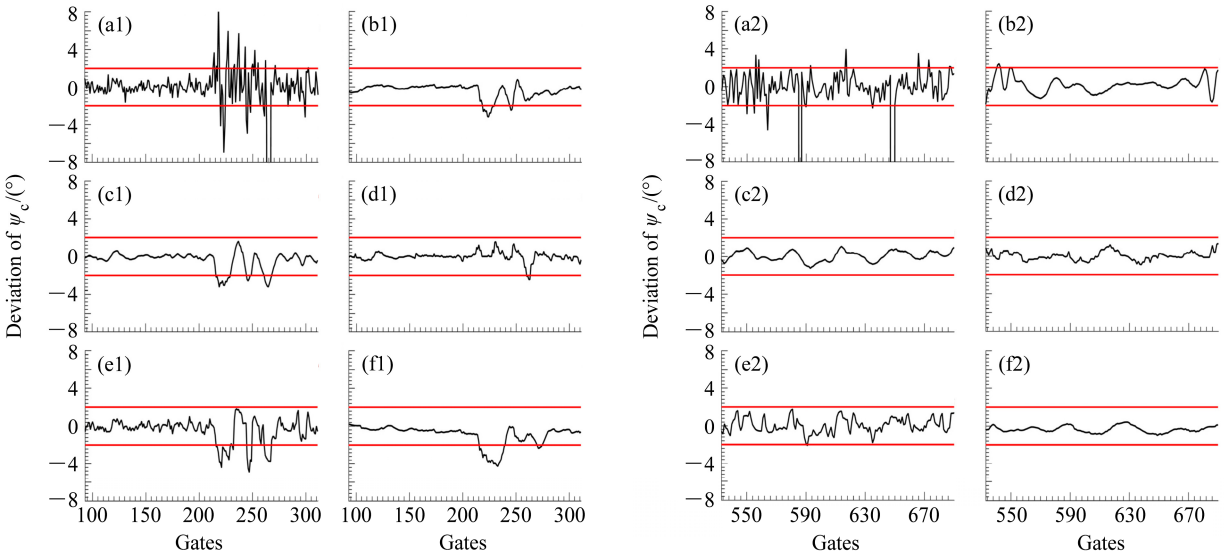

图 5　层积云（Sc）和积雨云（Cb）中（a1、a2）原始 Ψ_C 偏差统计、（b1、b2）综合小波去噪偏差统计、（c1、c2）综合滑动平均偏差统计、（d1、d2）中值滤波偏差统计、（e1、e2）综合卡尔曼滤波偏差统计、（f1、f2）综合 FIR 滤波偏差统计（其中红色实线表示±2°），时间与图 4 一致

Fig. 5　Statistics of deviations for (a1, a2) raw Ψ_C range profiles at Sc and Cb respectively, Ψ_C filtered by (b1, b2) integrated wavelet de-noising, (c1, c2) integrated running mean, (d1, d2) median, (e1, e2) integrated Kalman, and (f1, f2) integrated FIR filters (the red solid lines in each panel denote ±2°), the time is the same as Fig. 4

的影响。（2）综合卡尔曼滤波、综合小波去噪和综合滑动平均都对原始 Ψ_C 细节特征有所保留，其中综合卡尔曼滤波保留效果最好，综合小波去噪其次，综合滑动平均不及前两种方法，如图 5c1 中综合滑动平均后 Ψ_C 在距离库数 216～229、245～248 略有超出±2°可信偏差范围是因为对原始 Ψ_C 细节特征的保留（对应原始 Ψ_C 距离库数 220～224、244～248），值得指出的是距离库数 262～268 上超出±2°可信偏差范围是由于未能彻底避免探测误差零值（264～266）的干扰；图 5b1 中综合小波去噪后 Ψ_C 在距离库数 219～229、244～246 略有超出±2°可信偏差范围也是由于对原始 Ψ_C 细节特征的保留，就其保留特征的范围比滑动平均要更为接近原始 Ψ_C，而且避免了探测误差零值（264～266）产生的干扰，其误差零值的订正值与原始 Ψ_C 平均趋势保持在±2°可信偏差范围内；综合卡尔曼滤波虽然对原始 Ψ_C 细节特征保留最好，但是无法完全避免探测误差零值干扰，而且平滑程度较其他滤波方法来说最低（波动指数 FIX 可表征径向距离廓线波动程度，表 3）。（3）中值滤波虽然对于原始 Ψ_C 平均趋势保留最好，但是其对于原始 Ψ_C 细节特征保留较差（如图 4a1 中距离库数 220～224、244～248，图 4a2 中距离库数 540～560、580～590、660~680）。（4）综合 FIR 对于原始 Ψ_C 径向距离廓线的平滑效果最好（表 3），但是此方法滤波后对于原始 Ψ_C 细节特征保留较差，并且造成 Ψ_C 形变，失真较为严重，如图 4f1 中距离库数 216～239、253～258，图 5f1 中距离库数 270～274 上探测误差零值（264～266）导致其超出±2°可信偏差范围。

因此，从保留原始 Ψ_C 平均趋势和细节特征以及平滑原始 Ψ_C 径向距离廓线三方面综合考虑，综合小波去噪方法相比较其他四种滤波方法是最优秀的，其能较好地保留原始 Ψ_C 平均趋势及细节特征（偏差基本在±2°可信范围内，部分区域由于对原始 Ψ_C 细节特征的保留会略有超出），避免探测误差零值对滤波结果产生的影响（误差零值订正值回归平均趋势水平，偏差在±2°可信范围内），对原始 Ψ_C 距离廓线的平滑程度达到了 94%～97%（平滑了超出±1.5° $Gate^{-1}$ 的波动，对±1.5° $Gate^{-1}$ 内的波动保留）。

利用滤波后的近似 Φ_{DP} 估算 K_{DP}（图 6），由于 1°～2°内的统计波动被认为是 Φ_{DP} 估算典型存在的边界，并且结合 Hubbert and Bringi（1995）指出的 Φ_{DP} 理论阈值应在 8° km^{-1}～10° km^{-1}（对应本文 1.2° $Gate^{-1}$～1.5° $Gate^{-1}$），本文将±1.5°看作 Φ_{DP} 波动边界，因此从理论上讲[公式（2）]，估算出的 K_{DP} 值在±5° km^{-1} 内是可信的，所以将±5° km^{-1} 作为 K_{DP} 的边界阈值。

由图 6 可知：（1）经过 A、B 类处理后的综合滤波方法很好地避免了探测误差零值以及 δ 和环境噪声引起的 K_{DP} 估算误差；（2）中值滤波、综合卡尔曼滤波由于平滑效果的影响（中值滤波后虽然 Ψ_C 波动指数 FIX 较小，但是其距离廓线并不光滑，毛刺较多）导致估算的 K_{DP} 抖动明显，其结果不利于降水估测，并且两种方法滤波后估算的 K_{DP} 存在超出边界阈值 5° km^{-1} 的现象，不可取；（3）综合滑动平均、综合小波去噪以及综合 FIR 滤波后估算的 K_{DP} 都在边界阈值 5° km^{-1} 内，但是综合 FIR 滤波方法由于失真较为严重，导致估算的 K_{DP} 对于原始 Ψ_C 细节波动特征保留较差（尤其是对降水大值区的指示效果较差）。综合滑动平均滤波方法在保留原始 Ψ_C 细节特征和平滑效果上都不如综合小波去噪。并且综合小波去噪方法在层积云降水以及积雨云降水系统中，对于较强降水区域的指示作用很明显[层积云中较强降水区域（29.7～38.85 km）K_{DP} 普遍大于 0.25° km^{-1}，峰值可达到 4.3° km^{-1}；积雨云中较强降水区域（93.45～102.3 km）K_{DP} 普遍大于 0.1° km^{-1}，峰值可达到 1.95° km^{-1}]。

表 3 波动指数 FIX 统计

Table 3 The statistics of FIX (fluctuation index)

方法	方位角 37° FIX	方位角 37° FIX（滤波方法经综合处理）	方位角 37° 滤波后（经综合处理）FIX 较原始数据 FIX 降低率	方位角 210° FIX	方位角 210° FIX（滤波方法经综合处理）	方位角 210° 滤波后（经综合处理）FIX 较原始数据 FIX 降低率
原始数据	2.1374			8.3815		
小波去噪	1.1024	0.1364	94%	7.8739	0.2227	97%
滑动平均	0.4885	0.1804	92%	1.6221	0.1199	99%
中值滤波	0.1508	0.1508	93%	0.1415	0.1415	98%
卡尔曼滤波	1.5671	0.4256	80%	6.2476	0.4308	95%
FIR	0.3001	0.1116	95%	0.9563	0.0743	99%

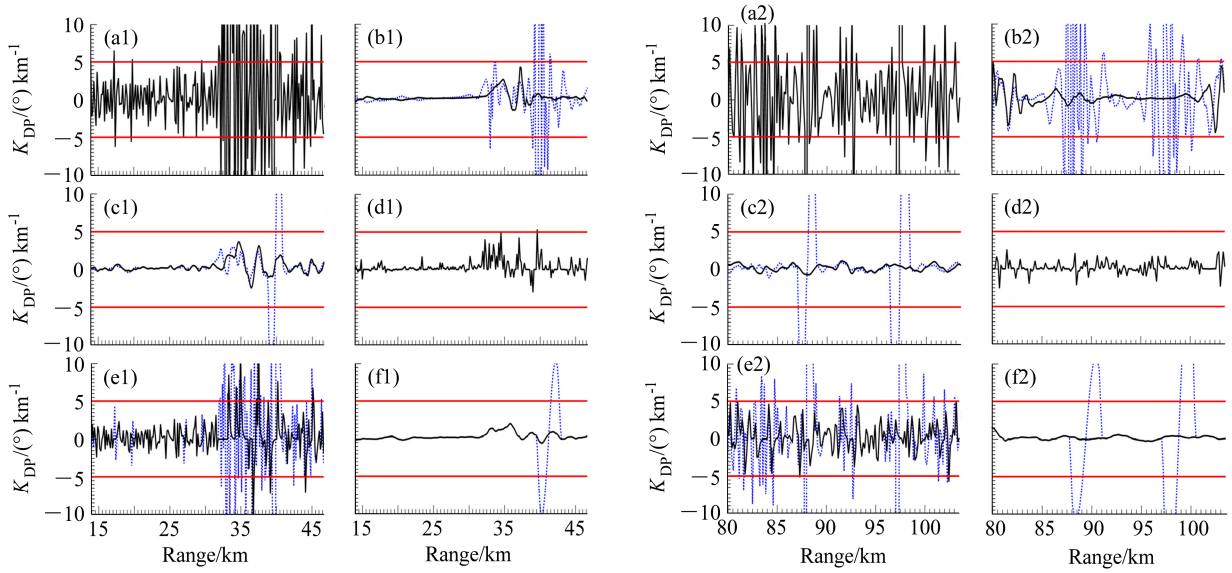

图 6　层积云（Sc）和积雨云（Cb）中 K_{DP}：（a1、a2）原始、（b1、b2）综合小波去噪、（c1、c2）综合滑动平均、（d1、d2）中值滤波、（e1、e2）综合卡尔曼滤波和（f1、f2）综合 FIR 滤波（其中红色虚线表示±5° km^{-1}，蓝色虚线表示未经过综合处理），时间与图 4 一致

Fig. 6　The K_{DP} range profiles for Sc and Cb respectively, (a1, a2) raw, (b1, b2) integrated wavelet de-noising, (c1, c2) integrated running mean, (d1, d2) median, (e1, e2) integrated Kalman, and (f1, f2) integrated FIR filters (the red solid lines denote ±5° km^{-1}, blue dashed lines denote profiles untreated by integrated process), the time is the same as Fig. 4

对于整个层积云降水系统以及积雨云降水系统，根据图 3、图 7 可知：（1）原始 Ψ_C 由于受环境噪声和 δ 影响严重，估算的 K_{DP} 不可取，与降水回波不能很好的对应；（2）中值滤波后由于近似估算的 Φ_{DP} 不够平滑，所以导致估算的 K_{DP} 质量较差，不可用于降水估测；（3）综合 FIR 滤波后估算的 K_{DP} 最均匀，但是由于其大尺度的平滑效果导致对于原始细节特征的保留效果较差，并且在层积云降水系统中东北东方向约 24～36 km 处存在超出 5° km^{-1} 边界阈值的现象较其他滤波方法严重，同时边界效应十分明显（Hu and Liu, 2014），在降水系统边缘原始信息失真严重；（4）综合卡尔曼滤波、综合滑动平均和综合小波去噪方法对于原始细节特征的保留较为完整，其中综合卡尔曼滤波和综合滑动平均估算的 K_{DP} 不如综合小波去噪估算的均匀，并且综合滑动平均估算的 K_{DP} 也存在超出±5° km^{-1} 边界阈值的现象较综合小波去噪严重；（5）整体而言，综合小波去噪方法估算的 K_{DP} 相对均匀并且较好地保留了降水系统原始细节特征，取值也在±5° km^{-1} 边界阈值内，能较好地对应降水系统。

综上，综合小波去噪方法对于 2015 年 8 月 7 日的层积云降水资料以及 2015 年 6 月 22 日的积雨云降水资料来说，不仅在滤波效果上优于中值滤波、综合滑动平均、综合卡尔曼滤波及综合 FIR 滤波，而且滤波后估算的 K_{DP} 也优于以上四种方法。同时，对于积雨云较强降水区域 K_{DP} 取值较层积云降水小，并且负值较多，主要考虑是由于该降水系统为强盛对流单体，对流云发展较高，冷云过程较强，云中存在较多固态粒子导致。

4　总结与讨论

本文为了提高 X 波段双线偏振多普勒雷达的共极化差分相移 Ψ_C 质量，构造了对于 Ψ_C 的综合滤波方法，在滑动平均、小波去噪和卡尔曼滤波方法滤波前先对原始 Ψ_C 进行资料识别和逐步订正的综合处理，在 FIR 滤波前进行了逐步订正的综合处理，对中值滤波不做处理。利用位于北京顺义（40.18°N，116.68°E）的 714XDP-A 型车载 X 波段双线偏振多普勒天气雷达探测资料对综合滤波方法进行了应用与评估，得到以下结论：

（1）综合小波去噪滤波方法不论是滤波处理还是对于 K_{DP} 的估算相较于其他方法都是最优秀的，其能较好地保留原始 Ψ_C 平均趋势及细节特征（偏差基本在±2°可信范围内，部分区域由于对原始 Ψ_C 细节特征的保留会略有超出），避免探测误差零值对滤波结果产生的影响（误差零值订正值回归平均趋势水平，偏差在±2°可信范围内），对原始 Ψ_C 距离廓线的平滑程度达到了 94%～97%（平滑了超

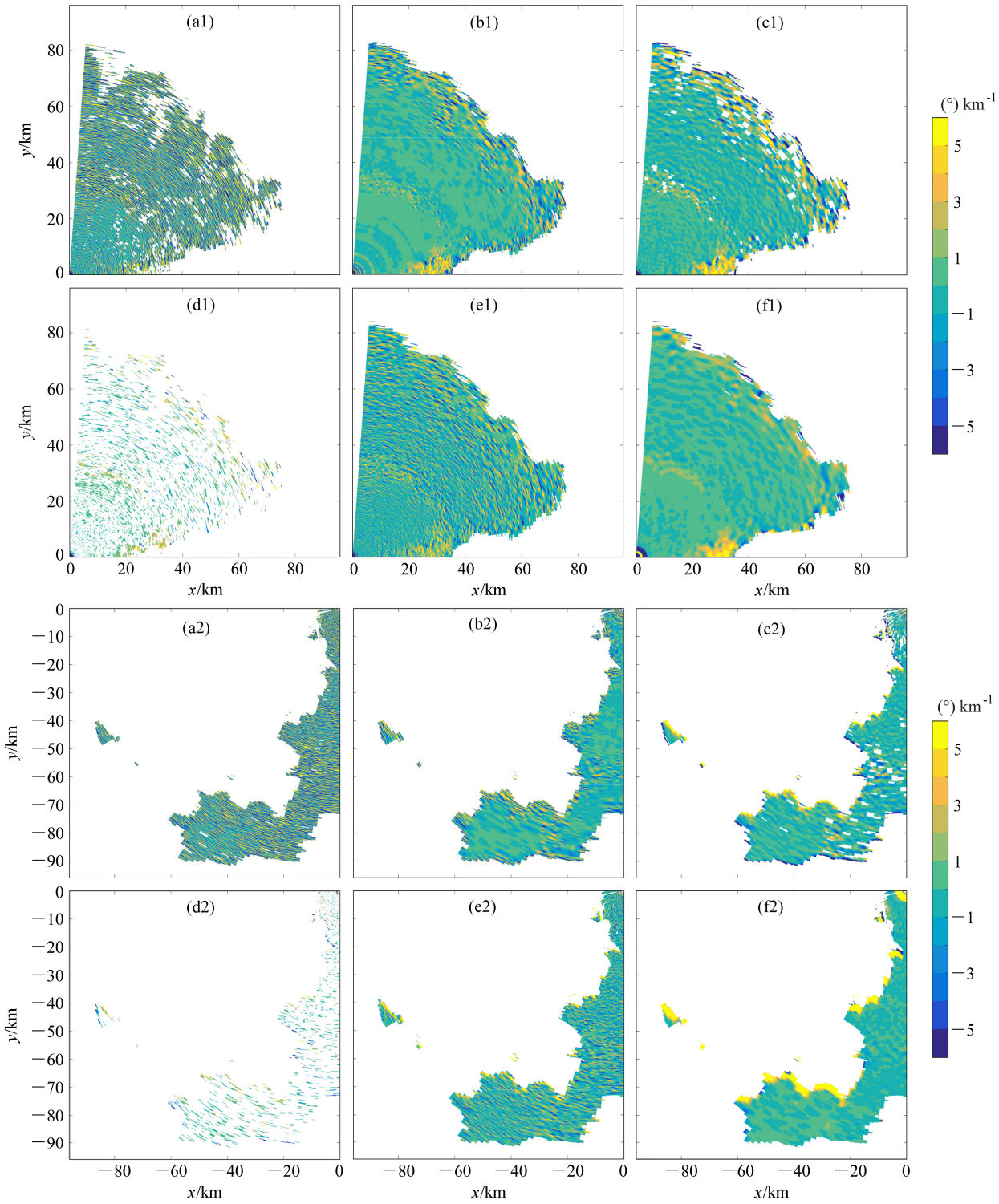

图 7 层积云（Sc）和积雨云（Cb）K_{DP} PPI（雷达平面位置显示器），原始（a1、a2）、综合小波去噪（b1、b2）、综合滑动平均（c1、c2）、中值滤波（d1、d2）、综合卡尔曼滤波（e1、e2）和综合 FIR（f1、f2）

Fig. 7 PPI (Plan Position Indicator) of K_{DP} for Sc and Cb respectively, (a1, a2) raw, (b1, b2) integrated wavelet de-noising, (c1, c2) integrated running mean, (d1, d2) median, (e1, e2) integrated Kalman, and (f1, f2) integrated FIR filters after integrated process

出±1.5° $Gate^{-1}$ 的波动，对±1.5° $Gate^{-1}$ 内的波动保留）。

（2）综合小波去噪方法滤波后估算的 K_{DP} 整体在±5° km^{-1} 边界阈值内，避免了原始 Ψ_C 不合理零值、环境噪声和 δ 对 K_{DP} 估算产生的误差影响，K_{DP} 对较强降水指示明显（在回波强度 30 dBZ≤Z_H＜37 dBZ 的层积云降水中 K_{DP} 普遍大于 0.25° km^{-1}，峰值可达到 4.3° km^{-1}；在回波强度 30 dBZ≤Z_H＜50 dBZ 的积雨云降水中 K_{DP} 普遍大于 0.1° km^{-1}，峰值可达到 1.95° km^{-1}）。

综上所述，综合小波去噪滤波方法对于 X 波段双偏振雷达的 Ψ_C 资料滤波效果优良，滤除了 δ 和环境噪声，有效抑制了原始 Ψ_C 零值误差对滤波结果以及 K_{DP} 估算的影响，其滤波后近似 Φ_{DP} 估算的 K_{DP} 在±5° km^{-1} 边界阈值内，K_{DP} 对于较强降水指示明显，但是在回波强度 30 dBZ≤Z_H＜50 dBZ 的积雨云降水中 K_{DP} 取值相对于回波强度 30 dBZ≤Z_H＜37 dBZ 的层积云降水中较小，本文考虑是因为积雨云系统中固态粒子较多导致。综合小波去噪滤波方法对于 K_{DP} 估算结果的改善将有利于提高降水估测和粒子识别的精准度，对于雷暴天气预警预报具备重要意义。但是由于观测资料有限，综合小波去噪滤波方法对于降水估测及粒子识别的改善作用还需要大量的观测资料以及借助地面观测站数据来验证，这将会是本文后续进行的工作。

参考文献（References）

毕永恒, 刘锦丽, 段树, 等. 2012. X 波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正 [J]. 大气科学, 36 (3): 495–506. Bi Yongheng, Liu Jinli, Duan Shu, et al. 2012. Attenuation correction of reflectivity for X-band dual- polarization radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 495–506, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11075.

杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等. 2012a. 双线偏振雷达差分传播相移的质量控制 [J]. 应用气象学报, 23 (6): 710–720. Du Muyun, Liu Liping, Hu Zhiqun, et al. 2012a. Quality control of differential propagation phase shift for dual linear polarization radar [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23 (6): 710–720, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2012.06.008.

杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等. 2012b. 双线偏振雷达差分传播相移的小波滤波初探 [J]. 暴雨灾害, 31 (3): 248–254. Du Muyun, Liu Liping, Hu Zhiqun, et al. 2012b. Preliminary study on wavelet filtering of differential propagation phase shift for dual linear polarization radar [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 31(3): 248–254.

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, Xiao Hui, 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.13.

肖艳姣, 王斌, 陈晓辉, 等. 2012. 移动 X 波段双线偏振多普勒天气雷达差分相位数据质量控制 [J]. 高原气象, 31 (1): 223–230. Xiao Yanjiao, Wang Bin, Chen Xiaohui, et al. 2012. Differential phase data quality control of mobile X-band dual-polarimetric Doppler weather radar [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (1): 223–230.

张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 等. 2000. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 417–418. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi, et al. 2000. Radar Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 417–418.

Bringi V N, Chandrasekar V. 2001. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications [M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 636pp.

Bringi V N, Chandrasekar V, Balakrishnan N, et al. 1990. An examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 7 (6): 829–840, doi:10.1175/1520-0426(1990)007<0829:AEOPEI>2.0.CO;2.

Chang W Y, Vivekanandan J, Wang T C C. 2014. Estimation of X-band polarimetric radar attenuation and measurement uncertainty using a variational method [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53 (4): 1099–1119, doi:10.1175/JAMC-D-13-0191.1.

Cho Y H, Lee G W, Kim K E, et al. 2006. Identification and removal of ground echoes and anomalous propagation using the characteristics of radar echoes [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 23 (9): 1206–1222, doi:10.1175/JTECH1913.1.

Doviak R J, Bringi V, Ryzhkov A, et al. 2000. Considerations for polarimetric upgrades to operational WSR-88D radars [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 17 (3): 257–278, doi:10.1175/1520-0426(2000)017<0257:CFPUTO>2.0.CO;2.

Gorgucci E, Baldini L. 2015. Influence of beam broadening on the accuracy of radar polarimetric rainfall estimation [J]. Journal of Hydrometeorology, 16 (3): 1356–1371, doi:10.1175/JHM-D-14-0084.1.

Gosset M. 2004. Effect of nonuniform beam filling on the propagation of radar signals at X-band frequencies. Part II: Examination of differential phase shift [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 21 (2): 358–367, doi:10.1175/1520-0426(2004)021<0358:EONBFO>2.0.CO;2.

Hu Z Q, Liu L P. 2014. Applications of wavelet analysis in differential propagation phase shift data de-noising [J]. Adv. Atmos. Sci., 31 (4): 825–835, doi:10.1007/s00376-013-3095-y.

Hubbert J, Bringi V N. 1995. An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 12 (3): 643–648, doi:10.1175/1520-0426(1995)012<0643:AIFTFT>2.0.CO;2.

Jameson A R, Caylor I J. 1994. A new approach to estimating rainwater content by radar using propagation differential phase shift [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 11 (2): 311–322, doi:10.1175/1520-0426(1994)011<0311:ANATER>2.0.CO;2.

Mueller E A. 1984. Calculation procedure for differential propagation phase shift [C]//Preprints 22nd Radar Meteorology Conference. Zurich: AMS, 397–399.

Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al. 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and

application to an MCS [J]. Wea. Forecasting, 24 (3): 730–748, doi:10.1175/2008WAF2222205.1.

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]. J. Atmos. Oceanic Technol., 22 (11): 1621–1632, doi:10.1175/JTECH1803.1.

Park S G, Kim J H, Ko J S, et al. 2015. Identification of range overlaid echoes using polarimetric radar measurements based on a fuzzy logic approach [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 33 (1): 61–80, doi:10.1175/JTECH-D-15-0042.1.

Ryzhkov A V. 2007. The impact of beam broadening on the quality of radar polarimetric data [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 24 (5): 729–744, doi:10.1175/JTECH2003.1.

Ryzhkov A V, Zrnić DS. 1998. Beamwidth effects on the differential phase measurements of rain [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 15 (3): 624–634, doi:10.1175/1520-0426(1998)015<0624:BEOTDP>2.0.CO;2.

Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J. 2003. Rainfall measurements with the polarimetric WSR-88D radar [R]. Norman: National Severe Storms Laboratory, 98pp.

Sachidananda M, Zrnić D S. 1986. Differential propagation phase shift and rainfall rate estimation [J]. Radio Sci., 21 (2): 235–247, doi:10.1029/RS021i002p00235.

Seliga T A, Bringi V N. 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation [J]. J. Appl. Meteor., 15 (1): 69–76, doi:10.1175/1520-0450(1976)015<0069:PUORDR>2.0.CO;2.

Straka J M, Zrnić D S, Ryzhkov A V. 2000. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations [J]. J. Appl. Meteor., 39 (8): 1341–1372, doi:10.1175/1520-0450(2000)039<1341:BHCAQU>2.0.CO;2.

Wang Y T, Chandrasekar V. 2009. Algorithm for estimation of the specific differential phase [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 26 (12): 2565–2578, doi:10.1175/2009JTECHA1358.1.

Zrnić D S, Ryzhkov A V. 1999. Polarimetry for weather surveillance radars [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80 (3): 389–406, doi:10.1175/1520-0477(1999)080<0389:PFWSR>2.0.CO;2.