

文章编号: 1001-3806(2012)02-0221-04

## 自适应中值滤波在云雷达数据预处理的应用

王德旺<sup>1,2</sup>, 王改利<sup>1\*</sup>

(1. 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室 北京 100081; 2. 成都信息工程学院 电子工程学院 成都 610225)

**摘要:** 为了解决毫米波雷达回波噪声的污染,剔除Ka波段雷达探测数据中的散点噪声,得到雷达真实的探测大气云粒子回波,采用自适应滤波方法,改进并使其适用于Ka波段雷达资料的噪声剔除,同时进行了理论分析和实验论证。结果表明,相对于传统的中值滤波,自适应滤波具有明显的滤波性能,不仅可以剔除噪声,并有效地保留了雷达探测数据的局部细节。

**关键词:** 激光技术; 信号处理; 毫米波雷达; 散点噪声; 自适应滤波

**中图分类号:** TP391; TN958 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.019

## Application of adaptive median filtering in cloud Doppler radar data pre-processing

WANG De-wang<sup>1,2</sup>, WANG Gai-li<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to deal with the pollution caused by the noises embodied in the millimeter-wave radar data, and remove the noises from the data, a so-called method, adaptive median filtering, was adopted to get the true atmospheric cloud information data detected by a millimeter radar by means of theoretical analysis and experimental demonstration. The result shows compared with traditional median filtering, this kind of method displays more excellent capability filtering, and it not only can deal with the noises in the radar data, but also persist the partial details of the radar data.

**Key words:** laser technique; signal processing; millimeter-wave radar; splatter noise; adaptive median filter

### 引言

云雷达在探测大气中气象目标时,由于探测环境、非气象因素以及雷达仪器本身噪声的影响(比如高温、高湿、空中飞行物、雷达硬件等),导致雷达回波经常出现很多散点噪声<sup>[1]</sup>。为了减小散点噪声的影响,可以通过滤波的方法减少探测数据中的噪声。中值滤波去噪的效果明显,但主要问题是这种方法模糊了数据中的尖锐、不连续部分,这对于想通过探测数据了解并认知大气云层的精细结构有很大的影响。

传统滤波的方法,如加权中值滤波<sup>[2]</sup>、中心加权滤波<sup>[3]</sup>、开关中值滤波<sup>[4]</sup>等,对改善中值滤波器的性能做出了重要的贡献,但在实际使用中仍然需要进一步改进。加权中值滤波和中心加权滤波通过加权降低了细节的损失,但去噪性能同时下降了;开关中值滤波在噪

声密度较低时效果较好,但其性能随着输入图像信噪比的降低逐渐接近标准中值滤波;相比之下,自适应中值滤波具有较为优秀的滤波性能<sup>[5]</sup>。

作者改进了自适应中值滤波方法,将探测数据分成若干个数据块,针对每一个数据块受噪声影响程度,自适应调整滤波窗口的大小,最后采用改进的中值滤波方法对噪声点进行滤波处理。这种方法能够有效滤除噪声并保留数据局部变化,为剔除探测数据中的散点噪声提供了一种有效途径<sup>[6]</sup>。

### 1 自适应滤波

#### 1.1 单窗口确定噪声

确定噪声点在整个滤波算法中是最关键的一步,它关系到数据中数据点的正确分类。散点噪声点的确定主要是判断该数据点的强度值是否大于某一个阈值,大于为噪声,反之则为信号点<sup>[7]</sup>。关于此阈值主要有两种途径得到;一是根据长期处理去噪的经验得来;二是采用窗口内数据点的均值来粗略估计<sup>[8]</sup>。相邻数据之间存在着较大的相关性,某点

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40975014)

作者简介: 王德旺(1989-),男,硕士研究生,研究方向为雷达信号处理。

\* 通讯联系人。E-mail: wgl3111@cams.cma.gov.cn

收稿日期: 2011-07-01; 收到修改稿日期: 2011-08-02

的强度值与其周围点的强度值非常接近,除了孤立点(一般认为是噪声)外,即使在边缘部分也满足。在毫米波雷达数据中,如果一个数据点的强度值和其邻域的值相差很远,那么,该点很有可能就是被噪声点污染了,否则,如果其值与邻点很接近,就应该是一个有效的信号点。

在中值滤波算法中,有的算法采用固定窗口大小(比如 $3 \times 3$ 矩阵、 $5 \times 5$ 矩阵等)滤波,有的根据数据被影响程度采用动态窗口大小滤波。而本文中采用相对较大的窗口进行噪声检测( $50 \times 50$ 矩阵),然后再根据噪声的影响程度动态选择( $3 \times 3$ 或 $5 \times 5$ 等矩阵)进行噪声剔除。而且这种自适应变化窗口大小不会明显增加计算时间,因为只对检测出来确定是噪声点的数据进行剔除<sup>[9]</sup>。

将1个大小为 $500(1s) \times 500(30m)$ ( $1s$ 是一个数据点,高度是每 $30m$ 一个数据点)的探测数据记为 $A$ ,并分成100个 $50(1s) \times 50(30m)$ 的数据块,记为 $B_k$ ,其中 $k=1, 2, 3, \dots, 100$ 。假设数据块中位置为 $(i, j)$ 点的数据值为 $R(i, j)$ ,以该点位中心形成 $3 \times 3$ 大小的检测窗口。窗口内所有数据点构成的单元为:

$$C_{ij} = \{R(i+l, j+l) \mid (i, j) \in B_k, l \in [-1, 1]\} \quad (1)$$

假设数据点单元内的最大值是 $R(i, j)_{\max}$ ,最小值是 $R(i, j)_{\min}$ ,将数据点单元内其它与 $R(i, j)_{\max}$ 和 $R(i, j)_{\min}$ 不相等的的数据点构成另外一个单元,并求出该单元内所有数据点的均值 $R(i, j)_{\text{average}}$ ,如果 $R(i, j)$ 与 $R(i, j)_{\text{average}}$ 的差值大于该数据单元标准差 $\sigma$ 的3倍,同时 $R(i, j)$ 与 $R(i, j)_{\max}$ 和 $R(i, j)_{\min}$ 中某一个最值相等,则判定 $(i, j)$ 为噪声点,用 $N(i, j) = 1$ 进行标记,否则认为 $(i, j)$ 为非噪声点,用 $N(i, j) = 0$ 进行标记。此方法简称标准方法(standard deviation, STD)。

$$\begin{cases} R(i, j) - R(i, j)_{\text{average}} > 3\sigma \\ R(i, j) = R(i, j)_{\max} \parallel R(i, j) = R(i, j)_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

## 1.2 单窗口滤除噪声

通过数据块散点噪声出现的个数进行统计,对数据块被噪声影响程度进行评估,从而动态选择滤波窗

$$\begin{cases} S_0(i, j) = \{R(i, n) \mid n \in [j-l, j+l] \text{ 且 } n \neq j\} \\ S_{45}(i, j) = \{R(m, n) \mid m, n \in [j-l, j+l] \text{ 且 } m+n = (i+j) \text{ 且 } m \neq i, n \neq j\} \\ S_{90}(i, j) = \{R(m, j) \mid m \in [i-l, i+l] \text{ 且 } m \neq i\} \\ S_{135}(i, j) = \{R(m, n) \mid m, n \in [i-l, i+l], \text{abs}(m+n-i-j) = 2l \text{ 且 } m \neq i, n \neq j\} \end{cases} \quad (4)$$

对上述4个窗口中值滤波结果加权求和得到受污染数据点滤波后对应的值为:

$$R(i, j)_{\text{filter}} = \sum_{k=0}^{135} c_k S_k(i, j) \quad (5)$$

口大小,用 $r$ 参量进行判断,它等于数据块噪声点个数与数据块总的的数据点个数之比。当 $r$ 比较小的时候,应该选择较小尺寸的滤波窗口,这样能够去噪的同时保护数据的细节;而当 $r$ 较大时,应该选择较大的尺寸的滤波窗口以加强去噪能力。根据这个原则,选择方形窗口进行滤波,窗口长度为:

$$L = \begin{cases} 3 & (r < r_1) \\ 5 & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ 7 & (r_2 < r \leq r_3) \\ 9 & (r_3 < r) \end{cases} \quad (3)$$

当数据块被噪声影响超过设定的边界,则根据被影响程度自适应选择滤波窗口大小进行滤波。根据对雷达探测数据进行统计分析表明 $r_1 = 0.2\%$ , $r_2 = 1\%$ , $r_3 = 5\%$ (通过对雷达回波数据进行处理,记录处理区间噪声点的个数,根据噪声点的个数与总数据量比值来判断数据被噪声污染程度,实验中选取这几个门限值并自适应选取滤波窗口的最终去噪效果比较好)。

数据点经过噪声检测之后,被判定为噪声和非噪声。对非噪声数据点不进行处理,而对于噪声点,采用改进的中值滤波将其滤除。改进的中值滤波不像标准的中值滤波那样,对窗口内所有的数据点进行排序并取其中值取代窗口中心数据点的值,只选择窗口几个特定方向上的数据点进行排序,取排序后的各中值进行加权运算。由于改进的中值滤波值对图像特定方向上的数据进行处理,因此可比较好地保护数据细节。

对数据的子块 $B_k$ ,滤波窗口尺寸 $L = (2l + 1)$ ,对数据点 $(i, j)$ 的受噪声污染值为 $R(i, j)$ ,为了保护数据局部细节,选择滤波窗口内 $0^\circ$ , $45^\circ$ , $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 4个特定方向。接下来以 $l = 1$ 为例求解滤波过程。某一滤波方向对应的窗口为需要处理的噪声点,由此可以得到4个窗口<sup>[10]</sup>。

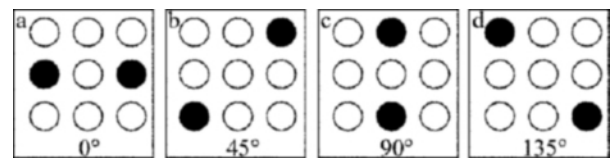


Fig. 1 Filtering in destine direction

式中 $k=0, 45, 90, 135$ ;  $S_k(i, j)$ 表示水平角度的数据加权得到的最终值; $c_k$ 为加权系数,其大小由4个中值滤波结果决定,即:

$$c_k = \frac{S_k(i, j)}{\sum_{k=0}^{135} S_k(i, j)} \quad (6)$$

## 2 试验结果及分析

在 MATLAB7.1 以上对雷达探测数据  $500(1s) \times 500(30m)$  数据矩阵进行仿真试验。为了对比自适应滤波与常规  $3 \times 3$  或  $5 \times 5$  的中值滤波<sup>[11]</sup>的优劣,分为主观评价和客观评价两种评价方式。主观评价从数据资料的滤波效果来判断,客观评价在这里采用定量参数:归一化均方误差(normalization mean square error, NMSE)、峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)以及平均绝对值差<sup>[12]</sup>(mean absolute error, MAE)。其定义如下:

$$\sigma_{NMSE} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [R(i, j)_{\text{filter}} - R(i, j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [R(i, j)]^2} \quad (7)$$

$$R_{PSNR} = 10 \lg \frac{M^2 [R(i, j)_{\text{max}}]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [R(i, j)_{\text{filter}} - R(i, j)]^2} \quad (8)$$

$$M_{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |R(i, j)_{\text{filter}} - R(i, j)|}{M^2} \quad (9)$$

式中  $R(i, j)$  为原始数据,  $R(i, j)_{\text{filter}}$  为滤波后的数据,  $M$  表示图像数据横坐标点数(与纵坐标方向点数相等)。由公式可知,  $R_{PSNR}$  值越大,  $M_{MAE}$  值越小, 则算法效果越好<sup>[13]</sup>。

图 2 为 Ka 波段雷达探测到的反射率数据。从图 2a 中可以看到, 在 7km 左右的高空以上出现散点噪声, 图 2b 是常规  $3 \times 3$  中值滤波的效果图, 图 2c 是自适应滤波的结果。当然, 常规滤波效果应该更好一些, 但是从图中标示的黑色方框可以看出, 常规中值滤波模糊了峰值信息, 但是自适应滤波保存了这种效果。

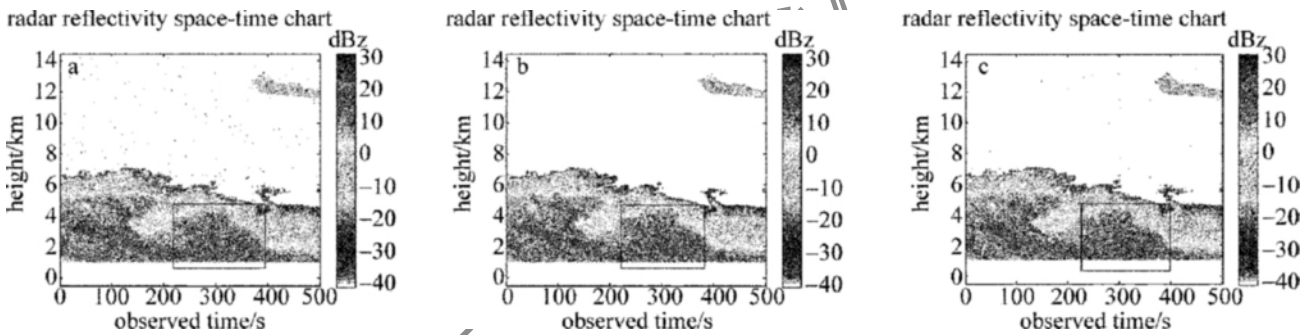


Fig. 2 Result of dealing with reflectivity data of the Ka-band radar  
a—convention median filtering b—median filtering c—adaptive median filtering

图 3 为 Ka 波段雷达探测到的退偏振因子数据。从图 3a 中可以看到, 在回波边缘出现散点噪声, 图 3b 是常规  $3 \times 3$  中值滤波的效果图, 图 3c 是自适应滤波

的结果。从图中标示的黑色方框可以很明显地看出, 常规中值滤波不仅模糊了峰值信息, 还滤除了有效数据信息, 但是自适应滤波兼顾了两方面的问题。

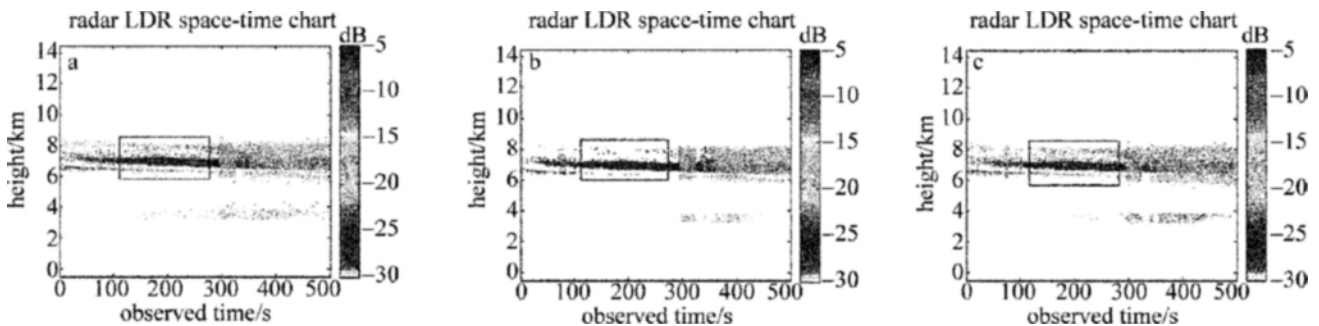


Fig. 3 Result of dealing with liner depolarization ratio(LDR) data of the Ka-band radar  
a—convention median filtering b—median filtering c—adaptive median filtering

表 1 是经过客观定量参数的计算公式得到的数据表。从表中可以看出, 自适应滤波的  $\sigma_{NMSE}$  要比中值滤

波小 1 倍以上, 并且自适应滤波的  $R_{PSNR}$  参量更大,  $M_{MAE}$  更小, 表明这种算法效果更好。

Table 1 Norm comparison of the two methods

filtering mean	parameter	Fig. 2	Fig. 3
median filtering	$\sigma_{\text{NMSE}}$	0.0023108	0.002281
	$R_{\text{PSNR}}$	21.242	7
	$M_{\text{MAE}}$	33.426	25.658
adaptive median filtering	$\sigma_{\text{NMSE}}$	0.00055026	0.0004944
	$R_{\text{PSNR}}$	27.474	17.699
	$M_{\text{MAE}}$	3.5192	3.8326

### 3 结论

(1) 自适应滤波在数据处理,特别是在数据局部细节保留上,相对于中值滤波有明显的优势。(2) 自适应滤波的客观评价指标上,相对于中值滤波也有明显优势。(3) 对于雷达探测到的云数据,去除噪声点是预处理中一个至关重要的任务,噪声点去除的程度影响到云层微观物理量的反演。

因此,本文中改进的方法主要在于散点噪声的剔除。经实验证明,改进的方法性能优于传统的中值滤波,而且滤波的效果比较好。

#### 参考文献

- [1] ZHONG L Z. Calibration and capability analysis of china new generation of cloud radar-HMBQ and its preliminary application in retrieving cloud microphysics parameters[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2009: 25-43( in Chinese).
- [2] BROWNRING D P K. The weighted median filter[J]. Communications of the Association for Computing Machinery, 1984, 27( 8): 807-818.
- [3] KO S J, LEE Y H. Center weighted median filters and their applications to image enhancement[J]. Journal of IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38( 9): 984-993.
- [4] SUN T, NEUVO Y. Detail-preserving median based filters in image processing[J]. Journal of Pattern Recognition Letters, 1994, 15( 4): 341-347.
- [5] HU W, FENG W S, LI Zh Sh. An adaptive median filter with double windows for impulsive noises[J]. Journal of Sichuan University( Engineering Science Edition), 2006, 38( 4): 131-135( in Chinese).
- [6] ZHANG X M, XU B Sh, DONG Sh Y. Adaptive median filtering for image processing[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17( 2): 295-299( in Chinese).
- [7] JIANG J, JIAO B L. New median filtering method based on statistic analysis[J]. Laser Technology, 2011, 35( 1): 29-31( in Chinese).
- [8] KWAN P, KAMEYAMA K, TORAICHI K. On a relaxation-labeling algorithm for real-time contour-based image similarity retrieval[J]. Journal of Image and Vision Computing, 2003, 21( 3): 285-294.
- [9] WANG J H, LIN L D. Improved median filter using min/max algorithm for image processing[J]. Electronics Letters, 1977, 33( 16): 1362-1363.
- [10] WEI Y F, DU Zh Ch, YAO Zh Q. Application of median filter in point cloud data pre-processing lidar[J]. Laser Technology, 2009, 33( 2): 213-216( in Chinese).
- [11] LIU G H, GUO W M. Application of improved arithmetic of median filtering denoising[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46( 10): 187-189( in Chinese).
- [12] ZHOU J. The modified algorithms of median filtering applied in image processing[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007: 19-20( in Chinese).
- [13] WANG X K, LI F. Improved adaptive median filtering[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46( 3): 175-176( in Chinese).
- (上接第220页)
- 作用距离的可行性方法: 选用发射束散角小的激光光源; 选用高灵敏度的探测器; 对于不同的天气情况, 选用不同波长的激光光源。
- [1] JIANG Zh G, TAN J Ch, LIANG J, et al. Suitability of "cat's eye" effect for reconnaissance by the scanning laser[J]. Laser Technology, 2005, 29( 5): 550( in Chinese).
- [2] MIEREMET A L, SCHLEIPEN R M A, POUCHELLE P N. Modeling the detection of optical sights using retro-reflection[J]. SPIE, 2008, 6950: 6950E1-6950E2.
- [3] ZHAO H W, WANG J, SONG M, et al. Laser experimental study of "cat-eye" effect[J]. Laser Technology, 2005, 29( 1): 62-63( in Chinese).
- [4] CHEN H Zh, ZHENG R Sh, ZHANG Y Y, et al. Application of laser active intelligence technology[J]. Electro-optic Technology Application, 2007, 22( 2): 19-20( in Chinese).
- [5] ZHAO X J, GAO Zh Y, ZHANG Y Y, et al. Technique of active laser reconnaissance and the applications in the military[J]. Optical Technique, 2003, 29( 4): 415( in Chinese).
- [6] ZHAO M J, HU Y Zh, ZENG X D. Estimation of the operation range of the active laser surveillance[J]. Journal of Xidian University( Natural Science Edition), 2004, 31( 1): 73( in Chinese).
- [7] ZHENG R Sh. Analysis of laser detection distance for ground optics lens[J]. Electro-optic Technology Application, 2005, 20( 4): 16-19( in Chinese).
- [8] QIN K, HAN Sh K, ZENG Ch H. Analysis of active laser detection distance for "cat's eye" target[J]. Optical Technique, 2009, 35( 4): 487( in Chinese).
- [9] SUN H, XIONG F, GU S. Ranging performance of active laser detection[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6344: 63442P.