

ZOU Zhanhuo, WANG Liming, WEI Junfeng, TANG Zhongcai, SONG Xiaoyuan, ZHU Jinpeng, CHEN Jinsong, LI Na. New Denoising Method Based on the Contribution Value Parameters of the Medium Frequency Radar Antenna (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(3): 820–828. CSTR:32142.14.cjss.2024-0197. DOI:10.11728/cjss2025.03.2024-0197

基于中频雷达天线贡献值参数的降噪新方法*

邹展卓¹ 王黎明¹ 韦峻峰¹ 唐仲才¹
宋晓远² 朱金鹏² 陈金松² 李娜³

1(广西民族大学物理与电子信息学院, 多模态信息智能感知处理与应用广西高校工程研究中心,
广西智能视觉协作机器人工程研究中心 南宁 530006)

2(中国电波传播研究所 青岛 266107)

3(海南大学电子科学与技术学院 海口 570228)

摘要 全相关分析法 (Full Correlation Analysis, FCA) 是常用的中频雷达 (Medium Frequency Radar, MF Radar) 风场反演算法, 但其对噪声较为敏感, 对噪声的有效处理可以帮助提升 FCA 方法在 MF 雷达风场反演中的准确性. 目前, MF 雷达广泛采用的多项式拟合降噪法在不同噪声环境下的处理能力不一致, 导致 MF 雷达所能观测到的有效风场数据变少, 制约了 MF 雷达在 MLT 区域风场观测的应用前景. 因此, 寻找一类对噪声强度不敏感的降噪方法是提高 MF 雷达大气风场反演有效性的一条新思路. 本文首次将天线贡献值参数引入 MF 雷达, 提出了以天线贡献值参数为评价标准的 MF-AH 算法, 对 MF 雷达接收信号生成的相关函数进行有效降噪处理. 将该算法与现有成熟雷达的多项式拟合方法相比, 通过模型数据和实测数据验证, MF-AH 算法在低信噪比条件下将纬向风速和经向风速的误差降低了约 20%. 同时, 该算法摒弃了以噪声为核心评价指标的限制, 显著提升了风场数据的有效性和丰富性.

关键词 中频雷达, 全相关分析法, 风场反演, 降噪, 天线贡献值参数

中图分类号 P356

New Denoising Method Based on the Contribution Value Parameters of the Medium Frequency Radar Antenna

ZOU Zhanhuo¹ WANG Liming¹ WEI Junfeng¹ TANG Zhongcai¹
SONG Xiaoyuan² ZHU Jinpeng² CHEN Jinsong² LI Na³

1(School of Physics and Electronic Information, Guangxi Minzu University; Engineering Research Center of Multi-modal Information Intelligent Sensing, Processing and Application, University of Guangxi; Guangxi Engineering Research Center for Intelligent Vision and Collaborative Robotics, Nanning 530006)

* 广西民族大学科研基金项目 (2023KJQD37), 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2024KY0171) 和广西青苗人才普惠性支持政策补助资金项目 (RZ2400003442) 共同资助

2024-12-25 收到原稿, 2025-05-07 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

2(Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107)

3(School of Electronic Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228)

Abstract The wind field of the Mesosphere and Lower Thermosphere (MLT) is an important parameter for studying the dynamics of the middle and upper atmosphere. Medium Frequency Radar (MF Radar) is one of the important techniques for observing the atmospheric wind field in the MLT region. Full Correlation Analysis (FCA) is a commonly used inversion algorithm for MF radar wind fields, but it is highly sensitive to noise. Effective noise processing can significantly enhance the accuracy of the FCA method in MF radar wind field inversion. Currently, the polynomial fitting denoising method widely used in MF radar exhibits inconsistent performance in different noise environments, leading to a reduction in the amount of valid wind field data that MF radar can observe, which restricts its application prospects for wind field observation in the MLT region. To address this challenge, this study introduces the antenna contribution parameter into MF radar for the first time and proposes the MF-AH algorithm, which uses the antenna contribution parameter as the evaluation criterion to effectively reduce noise in the correlation functions generated from MF radar signals. Compared with the conventional polynomial fitting method, the MF-AH algorithm, validated by both simulation and experimental data, reduces zonal and meridional wind speed errors by approximately 20% under low Signal-to-Noise Ratio (SNR) conditions. Moreover, the algorithm eliminates reliance on noise as the primary evaluation metric, significantly enhancing the effectiveness and richness of wind field data.

Key words Medium Frequency Radar, Full correlation analysis, Wind field inversion, Noise reduction, Antenna contribution parameter

0 引言

中间层和低热层大气 (Mesosphere and Lower Thermosphere, MLT) 动力学过程是中高层大气的重要研究方向, MLT 大气动力学理论研究需依赖其中大气风场、温度、密度等物理参数的精确观测^[1-3]. 中频雷达 (Medium Frequency Radar, MF Radar) 发射中频 (频率范围) 电磁波, 通过被大气不规则体散射, 电磁波在地面衍射信号中包含大气背景风速及电子密度等重要信息. MF 雷达成本相对较低, 可持续提供观测数据, 曾是观测 MLT 层大气风场及电子密度的重要手段. 然而 MF 雷达风场的探测高度随日夜变化波动较大, 且所测风场幅度偏低^[4], 在 MLT 区域探测中的应用较为有限. 如何提高 MF 雷达大气风场反演的有效性, 是一个值得深入研究的问题.

MF 雷达主要采用空分天线 (Spaced Antenna, SA) 体制并基于全相关分析法 (Full Correlation Analysis, FCA) 理论^[5] 来进行风场反演. FCA 的大致思路如下, SA 天线接收到携带背景风速信息的回波后, 经过相关函数的计算可提取出与时间相关的一系列相关参数 (Correlation Parameter), 利用相关参

数即可反演出大气背景风场. 在实际应用中, 大气环境和雷达系统硬件所产生的噪声会不同程度地影响回波信号, 进而影响相关参数的计算, 最终使得反演所得风场偏离其真实值. 因此, 在杂波和干扰相对恒定的探测场景中, 对接收信号或相关函数进行降噪是提高 MF 雷达风场反演有效性的一条重要途径. 目前比较成熟的 MF 雷达系统均采用多项式拟合算法进行降噪处理^[6,7]. 多项式拟合算法将含噪相关函数的部分区域拟合成一条平滑的曲线, 其计算复杂度较低, 可实现反演数据在线更新. 然而, 多项式拟合过程所依赖的样本包含噪声, 该算法天然对噪声较为敏感, 因此, 无法对强噪回波进行有效降噪^[8]. 为使 MF 雷达能稳定提供有效的风场数据, 有必要寻找一类不受噪声干扰的降噪算法.

综上所述, MF 雷达风场反演技术并没有一种无关噪声的降噪算法. 因此, 本文从与 MF 雷达探测原理相似的 MST (Mesosphere Stratosphere Troposphere) 雷达出发, 进行相关分析. 研究发现, Doviak 等^[9] 提出的天线贡献值参数 (Antenna Contribution) a_n 在 MST 雷达的降噪过程中作为相关函数有效性的评判标准具有重要作用. 该参数与噪声无关,

且仅与天线配置相关. 因此研究将 a_h 参数引入 MF 雷达降噪, 提出一种全新的 MF-AH 算法. 该算法通过对接收信号的相关函数进行深度处理, 结合雷达回波模型及实测数据, 验证有效性.

1 接收信号模型

使用的模型是 Holdsworth 等^[10]在 1995 年提出的模型基础上进行构建的, 保持了原模型的简洁性和真实性, 同时对模型的数据参数进行了优化, 使其回波数据更加贴合实际情况. 该模型为雷达后向散射模型, 通过接收并记录从目标物体或大气中不规则结构散射所得的信号, 生成一系列用于 FCA 分析的时间序列回波. 模型还考虑了发射方向图、散射体方位敏感性等多种因素, 以更好地模拟 MF 雷达运行环境.

模型的几何结构如图 1 所示, 包括雷达照射范围和封闭体积两部分. 雷达照射范围是雷达脉冲所照射的区域, 而封闭体积是散射体生成的范围, 雷达照射范围位于圆柱形的封闭体积内. 散射体在封闭体积中随机分布, 模拟了折射率不规则区域的方位敏感性. 在每个采样时刻, 来自各个散射体的回波累加成为该时刻接收到的总回波信号. 回波信号的幅值由发射和接收天线的综合极化图、散射体的方位敏感性以及发射雷达脉冲的形状决定. 在每个采样时刻后, 散射体的位置根据平均背景风和当前散射位置进行更新. 超

出封闭体积的散射体会从其离开的相反边界重新进入, 以保持散射体数量的恒定.

在每个采样时刻, 来自雷达照射范围内所有散射体的复信号回波会在接收天线 d_j 处累加. 第 j 根接收天线所接收到的由位于位置 r_i 的第 i 个散射体引起的复信号 f_j 表达式为

$$f_j(r_i) = a_j(r_i) \exp[-i\phi_j(r_i)]. \quad (1)$$

复信号 f_j 由两部分组成, 分别为 a_j 和 ϕ_j , a_j 代表信号幅度, 而 ϕ_j 代表信号的相位. 信号幅度的表达式为

$$a_j(r_i) = \sqrt{p_i P(r_i) S(r_i) R(r_i)}. \quad (2)$$

其中, p_i 为散射体的反射因子, $P(r_i)$ 为发射和接收天线的综合极化图函数, $S(r_i)$ 为散射体方位敏感性的极化图函数, 而 $R(r_i)$ 则为距离加权函数. 信号相位的表达式为

$$\phi_j(r_i) = 2\pi \left(\frac{|\mathbf{r}_i - \mathbf{t}| + |\mathbf{r}_i - \mathbf{d}_j|}{\lambda} \right). \quad (3)$$

其中, $\mathbf{t}$ 为发射天线阵列的中心位置, λ 为雷达的波长. 由于该模型在天线坐标的设定中, 发射天线阵列位于坐标原点, 因此 $\mathbf{t} = \mathbf{0}$.

式(2)等号右边项可分为三个部分, 第一部分为发射与接收天线的综合极化图函数 $P(r_i)$, 其是由发射天线极化图函数 $T(r_i)$ 和接收天线极化图函数 $D(r_i)$ 相乘得出的. 但是由于在 SA 系统中, 接收天线的极化图函数通常远大于由发射天线和散射体的方位敏感性导致的后向散射的极化图函数, 因此 $D(r_i)$ 可以设置为 1. 在实际情况中, 极化图函数一般以高斯分布的形式出现, 因此模型中的 $T(r_i)$ 也为高斯分布, 其一般形式为

$$T(r_i) = \exp \left(-\frac{|\mathbf{r}_i|^2 - (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_a)^2}{(|\mathbf{r}_i| \sin \theta_t)^2} \right). \quad (4)$$

其中, θ_t 为半波束宽度, $\mathbf{r}_a$ 为波束倾斜方向上的单位矢量, θ_a 可以通过天顶角和从北向南顺时针方向的方位 ϕ_a 来表示, $\mathbf{r}_a = [\sin \phi_a \sin \theta_a, \cos \phi_a \sin \theta_a, \cos \theta_a]$.

第二部分为散射体方位敏感性的极化图函数 $S(r_i)$, 其一般形式为

$$S(r_i) = \exp \left(-\frac{|\mathbf{r}_i|^2 - (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_{s,i})^2}{(|\mathbf{r}_i| \sin \theta_s)^2} \right). \quad (5)$$

其中, θ_s 为方位敏感性参数, 这个参数描述了散射体对于波入射角度变化的敏感性, 通常与散射体在不同

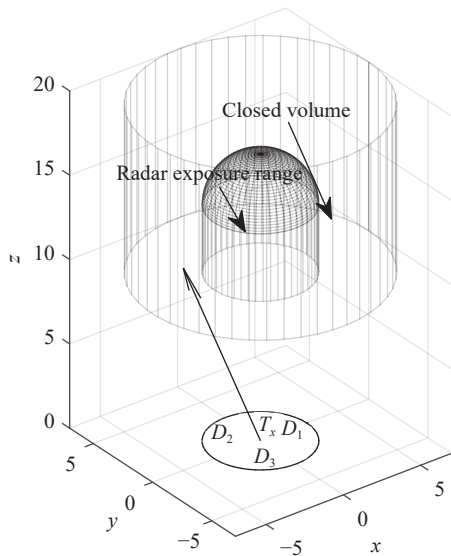


图 1 雷达模型几何结构

Fig. 1 Geometric structure of radar model

方向上反射波的强度衰减有关. $\mathbf{r}_{s,i}$ 为第 i 个散射体倾斜方向的单位矢量, 这是用来描述散射体在空间中倾斜方向的一个向量.

第三部分为距离加权函数 $R(\mathbf{r}_i)$, 其是一种距离惩罚机制, 在超出一定距离时的数值会被放弃, 其一般形式为

$$R(\mathbf{r}_i) = \exp\left(\frac{-(|\mathbf{r}_i| - r_0)^2}{r_e^2}\right). \quad (6)$$

其中, r_0 为距离门的中点, r_e 为距离门的宽度.

根据式 (1) 将会得到三条回波曲线 $S_1(K)$, $S_2(K)$ 和 $S_3(K)$ 用于相关函数的计算, 取 $S_1(K)$ 和 $S_2(K)$ 为例, 自相关函数 $\rho_1(\tau)$ 和互相关函数 $\rho_{12}(\tau)$ 表达式为

$$\rho_1(\tau) = \frac{\langle S_1[k]S_1'[k+\tau] \rangle}{\langle |S_1[k]|^2 \rangle}, \quad (7)$$

$$\rho_{12}(\tau) = \frac{\langle S_1[k]S_2'[k+\tau] \rangle}{\sqrt{\langle |S_1[k]|^2 \rangle \langle |S_2[k]|^2 \rangle}}. \quad (8)$$

其中, τ 为时延, k 为采样时刻, 符号 $\langle \cdot \rangle$ 为取统计平均, $S_1'[k+\tau]$ 为回波 S_1 在 $k+\tau$ 上的复共轭值, $S_2'[k+\tau]$ 同理.

2 基于天线贡献值的函数降噪方法

2.1 理论值 a_h

在 1996 年 Doviak 等提出了适用于 SA 系统的天线贡献值参数 a_h [10]. a_h 的一般形式为

$$a_h = \frac{2\pi\sqrt{2}\theta_t\theta_r}{\lambda\sqrt{\theta_t^2 + \theta_r^2}}. \quad (9)$$

其中, λ 为雷达的波长, θ_r 为接收天线的半波束宽度加权函数, θ_t 为发射天线的半波束宽度加权函数. 波束宽度为天线主波束中功率密度下降到峰值一半 (-3 dB 或 3 dB) 时的两个角度之和, 记为 θ . 半波束宽度为波束宽度的一半, 即 $\theta/2$. 在回波计算公式 $P(\mathbf{r}_i)$ 中, 波束宽度是关键参数之一. 因为 $P(\mathbf{r}_i)$ 由 $T(\mathbf{r}_i)$ 和 $D(\mathbf{r}_i)$ 构成, 二者均取发射和接收天线波束宽度的一半, 即为半波束宽度. 半波束宽度加权函数可以表达为 $(\theta/2)/2.355$. 该值根据天线配置计算得出, 因此将其称为理论值 a_h .

2.2 观测值 $\tilde{a}_h$

1997 年 Cohn 等 [11] 提出一个新的天线贡献值参数 a_h 的计算方式, a_h 值可以直接通过测量得到的自相关函数 (Autocorrelation Function, ACF) 和互相关

函数 (Cross-Correlation Function, CCF) 在零滞后点进行计算得出, 因此将其称为观测值 $\tilde{a}_h$, 其表达式为

$$\tilde{a}_h = \frac{2}{\Delta x} \sqrt{-\ln[R_{CCF}(0)]}. \quad (10)$$

其中, Δx 为接收天线组之间的间距, $R_{CCF}(0)$ 为互相关函数在零滞后点的值. 理论值 a_h 与观测值 $\tilde{a}_h$ 的对比有助于判断降噪后的相关函数是否符合降噪标准, 从而评估其作用于 FCA 算法的准确性.

2.3 基于天线贡献值的相关函数降噪方法

结合 Holdsworth 等提出的多项式拟合方法 [12] 与天线贡献值参数 a_h , 对相关函数进行降噪. 根据式 (7) 和式 (8) 的计算得到的相关函数, 以计算观测值 $\tilde{a}_h$, 并将其与理论值 a_h 进行比较. 根据经验, 设定一个误差阈值 (± 0.01) [13], 用于判断观测值 $\tilde{a}_h$ 与理论值 a_h 之间的差异. 超过该阈值的数据将被丢弃, 而未超出阈值的数据将被进一步处理.

在降噪过程中, 多项式拟合方法天然对噪声较为敏感, 因此利用理论值 a_h 来校准拟合后的相关函数, 使其不受噪声的影响. 对于未超出阈值的数据, 将其互相关函数在零滞后点的值, 与基于理论值 a_h 反推出的互相关函数零滞后点值进行匹配, 从而进一步提高互相关函数的幅值和相关性. 计算公式如下:

$$R_{CCF}(0) = e^{-\left(\frac{a_h \Delta x}{2}\right)^2}. \quad (11)$$

其中, a_h 为理论值 a_h , Δx 为模型接收天线组间的距离. 通过该公式得到了一个由天线参数所决定的标准 $R_{CCF}(0)$ 来校准所得到的互相关函数幅值, 从而降低所得的风速误差, 这种算法命名为 MF-AH. 在 MF-AH 算法中, 对于互相关函数信噪比高于 10 dB 和低于 10 dB 的情况分别采用了不同的处理策略. 这是因为在高信噪比和低信噪比条件下, 信号的相关性和幅值特性存在显著差异, 因此需要针对性地调整处理方法. 以无噪声回波信号 $S_1(k)$ 和 $S_2(k)$ 以及带噪声回波信号 $S_3(k)$ 和 $S_4(k)$ 为例, MF-AH 算法详细步骤如下.

算法 1 MF-AH算法的自相关函数.

输入: 无噪声回波信号 $S_1(k)$, 带噪声回波信号 $S_3(k)$.

输出: 降噪后的 $\rho_3(\tau)$.

- (1) 根据式 (7) 计算 $S_1(k)$ 和 $S_3(k)$ 的自相关函数, 得到 $\rho_1(\tau)$ 和 $\rho_3(\tau)$.
- (2) 对 $\rho_1(\tau)$ 和 $\rho_3(\tau)$ 进行多项式拟合, 得到降噪后的 $\rho_3(\tau)$.

算法 2 MF-AH算法的互相关函数.

输入: 无噪声回波信号 $S_1(k)$ 和 $S_2(k)$, 带噪声回波信号 $S_3(k)$ 和 $S_4(k)$.

输出: 校准后的 $\rho_{34}(\tau)$.

- (1) 根据式 (8) 计算 $S_1(k)$, $S_2(k)$ 和 $S_3(k)$, $S_4(k)$ 的互相关函数, 得到 $\rho_{12}(\tau)$ 和 $\rho_{34}(\tau)$.
- (2) 对 $\rho_{12}(\tau)$ 和 $\rho_{34}(\tau)$ 进行多项式拟合, 得到降噪后的 $\rho_{34}(\tau)$.
- (3) 利用 $\rho_{12}(\tau)$ 和天线参数根据式 (9) 和 (10) 得出理论值 a_h 和观测值 $\tilde{a}_h$.
- (4) 利用天线参数根据式(11)得出 $R_{CCF}(0)$.
- (5) 如果 $SNR > 10$ dB 且理论值 a_h 和观测值 $\tilde{a}_h$ 误差大于 0.01: 使用 $R_{CCF}(0)$ 校准降噪后的 $\rho_{34}(\tau)$ 得到校准后的 $\rho_{34}(\tau)$.
- (6) 如果 $SNR > 10$ dB 且理论值 a_h 和观测值 $\tilde{a}_h$ 误差小于等于 0.01: 将降噪后的 $\rho_{34}(\tau)$ 设为校准后的 $\rho_{34}(\tau)$.
- (7) 如果 $SNR < 10$ dB 且理论值 a_h 和观测值 $\tilde{a}_h$ 误差大于 0.01: 数据不合理, 舍弃数据.
- (8) 如果 $SNR < 10$ dB 且理论值 a_h 和观测值 $\tilde{a}_h$ 误差小于等于 0.01: 使用 $R_{CCF}(0)$ 校准降噪后的 $\rho_{34}(\tau)$ 得到校准后的 $\rho_{34}(\tau)$.

MF-AH 算法在多项式拟合方面与传统方法存在差异. 该算法通过对带噪声的相关函数和无噪声的相关函数进行拟合, 生成新的相关函数, 使数据有效率提升至 99.99%. 这种优化不仅确保了观测结果的准确性, 还避免了数据丢失问题.

3 仿真实例

3.1 天线位置和模型参数设定

不失一般性的条件下, 令 MF 雷达模型的工作频率为 2 MHz, 对应波长为 150 m. 为保证天线间距与该频率匹配, 接收天线的间距设置为 200 m. 发射天线阵列的有效中心位于坐标原点, 三根接收天线以 60° , 180° 和 240° 的角度呈等边三角形分布. 天线的位置分布如图 2 所示.

模型中需设置两类参数, 第一类参数涉及散射体和标准大气的设置. 散射体的数量依据 FCA 技术的结果进行选择. θ_s 的取值参考了 Reid^[14] 在 MF 波段及 Hocking 等^[15] 在 VHF 波段的研究成果, 雷达在探测到不同高度的散射体时所得到的 θ_s 会随高度发生变化. 本研究中, 模型的适用高度为 70~90 km, 与之匹配的 θ_s 值为 10.4° . $\mathbf{r}_{s,i}$ 为散射体的倾斜矢量, 为了保证散射体不偏离水平面, 模型中将倾斜矢量全部设为 0. 表 1

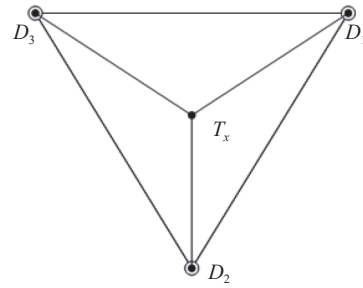


图 2 天线位置分布

Fig. 2 Antenna position distribution

表 1 散射体和标准大气设置

Table 1 Scatterers and standard atmosphere settings

模型参数	中频雷达
散射体的数量 N	1000
速度大小 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	50
速度方向 $\theta / (^\circ)$	15
方位敏感性 $\theta_s / (^\circ)$	10.4

为散射体和标准大气的设置.

模型中另一类参数为雷达参数. 在数值仿真中采用 15° 的发射天线半波束宽度, 旨在缩小雷达脉冲的照射区域, 从而减少所需散射体的数量, 提升模型的运行效率. 采样时间设置为 0.4 s, 共采集 256 个时间序列样本, 总时序持续时间为 102.4 s. 鉴于采样总时序对最终风速结果的影响, 该设置在准确性和效率之间取得了较好的平衡. 表 2 为雷达参数配置.

3.2 仿真实验

以上述建立的模型进行仿真实验. 令天线坐标如下: 发射天线位置为 $T_x = [0, 0, 0]$, 接收天线的位置分别为 $D_1 = [0, 116.21, 0]$, $D_2 = [-100, -57, 0]$ 和 $D_3 = [100, -57, 0]$. 这三根天线所生成的回波信号分别记为 $|y_1(k)|$, $|y_2(k)|$ 和 $|y_3(k)|$, 回波信号如图 3 所示.

根据式 (7) 和式 (8) 计算出回波信号 $|y_1(k)|$ 在不同信噪比下的自相关函数相关性以及 $|y_1(k)|$ 与 $|y_2(k)|$ 在不同信噪比下的互相关函数相关性, 如图 4 所示. 结果表明, 噪声对信号的影响会导致自相关函数和互相关函数的相关性发生变化, 从而造成相关函数幅值的波动. 随着信噪比的持续降低, 相关性的减弱导致相关函数的幅值逐渐下降, 最终可能引发相关函数图像的严重畸变, 这种幅值衰减的不均匀性将对风速测量产生一定程度的误差.

为降低噪声引起的幅值衰减对风速测量精度的

影响, 采用 MF-AH 算法对信噪比范围为 $-30 \sim -5$ dB 的相关函数数据进行处理. 虽然传统多项式拟合算法能够处理该信噪比范围的数据, 但其效果有限. 相比之下, MF-AH 算法在此条件下表现出一定的优势. 处理后, 得到不同信噪比下 $|y_1(k)|$ 自相关函数相关性, 以及 $|y_1(k)|$ 与 $|y_2(k)|$ 的互相关函数相关性, 如图 5 所示. 结果表明, MF-AH 算法在提升有噪声的相关函数相关性和幅值方面具有显著效果, 使其更加接近无噪声回波信号的相关函数值, 从而验证了该算法在噪声抑制方面的有效性.

为验证 MF-AH 算法在降低 FCA 反演风场中因幅值衰减引起的风速误差方面的有效性, 对其与多项

式拟合方法进行了深入对比研究, 设定了两个不同的风场环境. 仿真实验 1 在背景风速为 $+50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的均匀风场条件下进行, 背景风场方向设定为正东方 (即 x 轴正方向), 并与正北方向 (y 轴正方向) 呈 15° 的夹角. 根据设定条件, 计算得到的纬向风速和经向风速分别为 $-37.9844 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $+32.5144 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 仿真实验 2 在背景风速为 $+40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的均匀风场条件下进行, 背景风场方向设定为正东方 (即 x 轴正方向), 并与正北方向 (y 轴正方向) 呈 5.236° 夹角. 根据设定条件, 计算得到的纬向风速和经向风速分别为 $20.0004 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $-34.6408 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 在此基础上, 分别采用 MF-AH 算法和多项式拟合方法对风速误差进行计算. 两者都采用了多项式拟合, 拟合点数为 70, 拟合阶数为 35, 并通过 10000 次蒙特卡罗实验获取风速误差的平均值, 结果如图 6 所示. 实验结果表明, 在

表 2 雷达参数配置
Table 2 Radar parameter configuration

模型参数	中频雷达
雷达频率, f_0 /MHz	2
雷达照射高度范围/km	70~90
雷达照射宽度范围/km	-20~20
方位敏感性, $\theta_s/(\circ)$	10.4
采样时间, Δt /s	0.4
时间序列样本, N /个	256
总时序持续时间, $N\Delta t$ /s	102.4
反射天线半波束宽度, $\theta_t/(\circ)$	15
发射波束指向角, $\theta_a/(\circ)$	0
距离门宽度, r_e /m	2000
接收线间的间距, d_{ij} /m	200

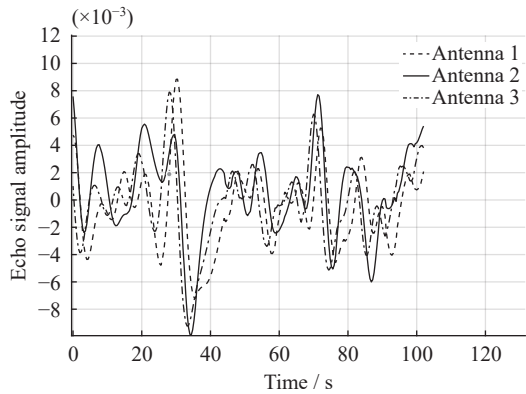


图 3 三根天线生成的回波信号
Fig. 3 Echo signal generated by three antennas

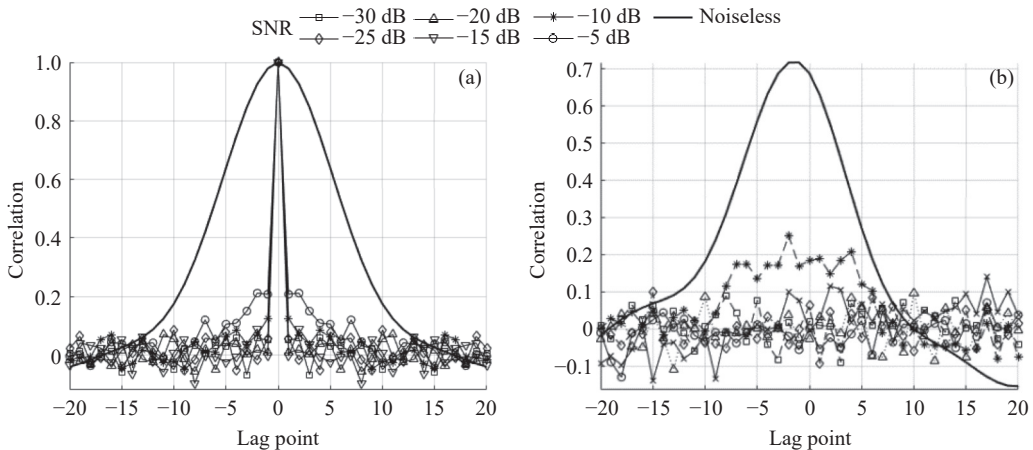


图 4 不同 SNR 下的自相关函数 (a) 和互相关函数 (b) 的相关性
Fig. 4 Correlation of autocorrelation function (a) and cross-correlation function (b) with different SNR

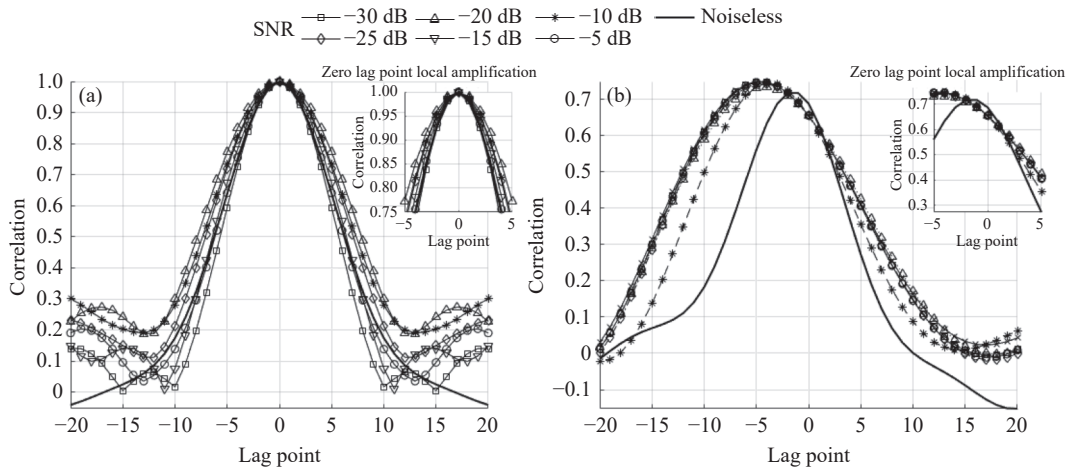


图5 不同SNR下MF-AH算法矫正过的自相关函数(a)和互相关函数(b)的相关性

Fig. 5 Correlation of autocorrelation function (a) and cross-correlation function (b) corrected by MF-AH algorithm with different SNR

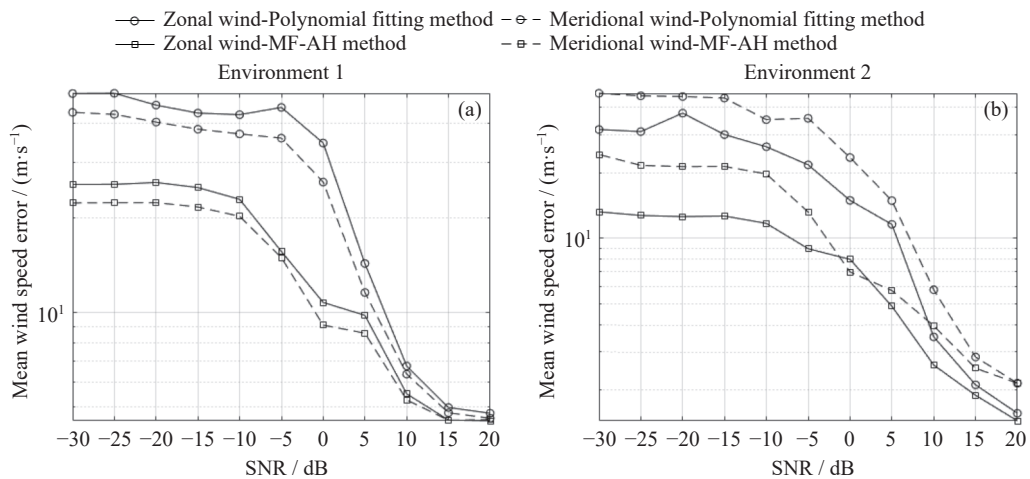


图6 10000次蒙特卡罗实验下平均风速误差

Fig. 6 Mean wind speed error for 10000 times of Monte Carlo experiments

信噪比范围为 $-30 \sim 20$ dB内, MF-AH 算法在风速误差的控制上表现出较大优势, 尤其是在低信噪比条件下, 能够有效降低风速误差, 表现出更强的降噪性能. 随着信噪比的逐步提高, MF-AH 算法的误差进一步减小, 但在高信噪比区域, 误差降低的趋势趋于平缓. 这表明, MF-AH 算法在逼近理论最优状态后, 其性能已接近稳定, 充分体现了算法在不同信噪比条件下的适应性和可靠性.

与此同时, 为评估 MF-AH 算法在提升风速反演精度的同时对计算效率的影响, 本文对其时间复杂度与现阶段拟合方法进行了对比研究. 在 -5 dB 和 10 dB 两种典型信噪比条件下, 分别计算两种算法的时间复

杂度, 并将结果绘制为图7. 实验结果表明, MF-AH 算法在计算时间复杂度上略高于现阶段拟合方法, 尽管牺牲了约 0.01 s 的计算时间, 但换来了较好的性能提升, 体现了该算法在性能与效率之间的良好权衡.

4 实测数据验证

为了验证 MF-AH 算法的可行性和准确性, 选取了中国电波传播研究所第22所昆明观测站 MF 雷达的实测数据进行对照实验^[16]. 昆明 MF 雷达的工作频率为 2.138 MHz, 可对 $50 \sim 100$ km 范围内、间隔 2 km 的 26 个高度窗口内的大气平均水平风场进行

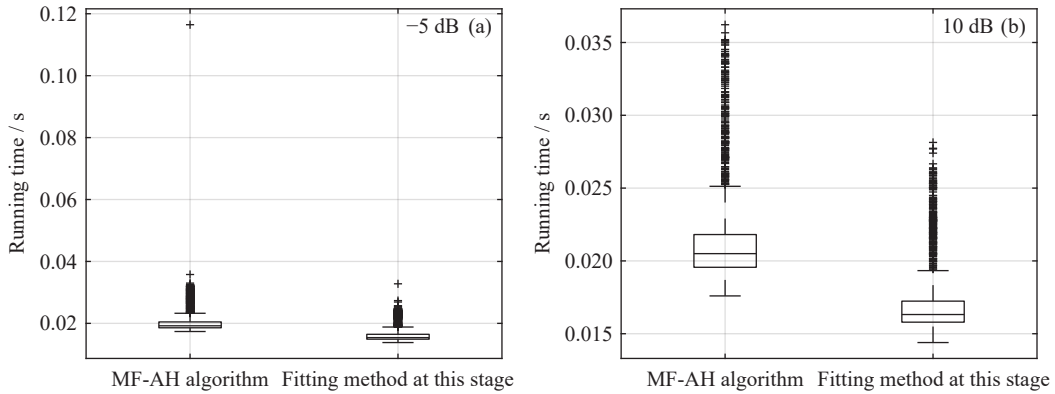


图 7 不同 SNR 下两种算法的时间复杂度

Fig. 7 Time complexity of two algorithms with different SNR

探测. 在 2023 年 7 月 23 日的原始观测数据中, 每小时包含 20 次观测记录, 每次记录包括 26 个高度窗口内 4 通道的回波序列. 每条回波序列采样点数为 285 点, 采样间隔为 0.4 s, 总时长为 114 s. MF-AH 算法的平均运行时间为 0.02 s, 能够高效处理该数据. 本文使用雷达系统的原始观测数据 (Raw Data) 和 FCA 反演模块的分析结果 (Analyzed Data) 进行分析. 原始观测数据保存在 .raw 文件中, 每个 .raw 文件对应 1 h 的观测记录; 分析结果存储于 .fca 文件中, 每个 .fca 文件包含 24 h 内的风场反演结果. 文件命名方式采用系统默认设置. 2023 年 7 月 23 日的 .fca 反演结果如图 8 所示.

图 6 表明, 在信噪比为 20 dB 的条件下, MF-AH 算法和多项式拟合算法的风速误差已经接近理论最优状态, MF-AH 算法在此条件下带来的改进较为微小. 为进一步验证 MF-AH 算法的有效性, 选取了

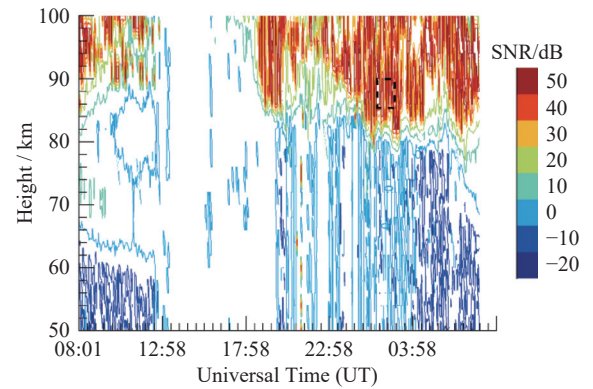


图 8 2023 年 7 月 23 日 .fca 反演结果

Fig. 8 .fca inversion results on 23 July 2023

2023 年 7 月 23 日 02:01—02:58 期间 86~90 km 高度范围内的数据进行分析 (见图 8 虚线框), 该区域的信噪比均大于 20 dB. 图 9 给出了风速误差, 通过

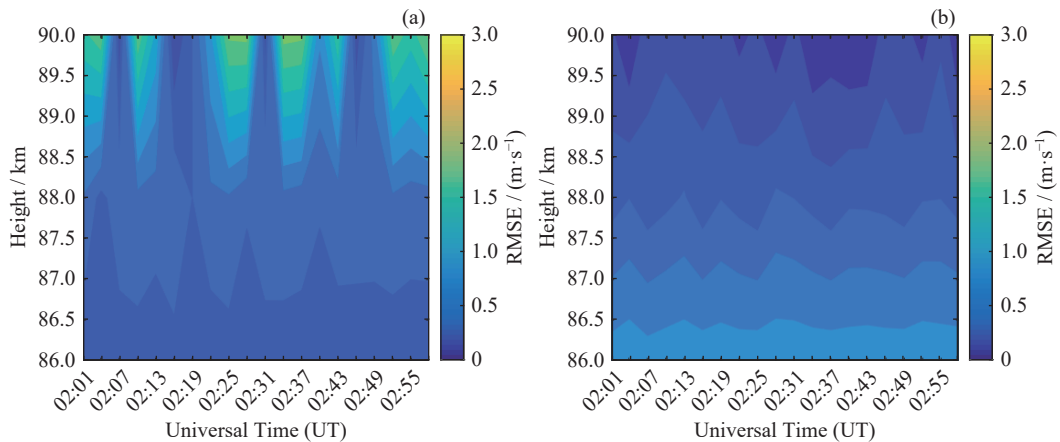


图 9 实测数据下 MF-AH 算法与雷达模块拟合算法的风速误差. (a) 纬向风速误差, (b) 经向风速误差

Fig. 9 Wind speed error of MF-AH algorithm and radar module fitting algorithm under measured data.

(a) Zonal wind speed error, (b) meridional wind speed error

对比雷达模块中的拟合算法与 MF-AH 算法的分析结果可以发现, 无论是纬向风还是经向风, 两种算法的风速误差均保持在 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内, 表现出较高的一致性. 通过这种交叉验证, 证明 MF-AH 算法不仅在仿真环境下表现良好, 也能够真实数据中同样取得有效的降噪和风速误差优化效果, 进一步说明了 MF-AH 算法的可靠性和有效性.

5 结论

为提高 MF 雷达大气风场反演的有效性, 构建一种不受噪声干扰的降噪算法. 据此提出了以天线贡献值参数 a_h 为评价标准的 MF-AH 算法. 通过模型数据和实测数据的验证, 结果表明, MF-AH 算法不仅显著提高了风场反演的有效性, 降低了风速误差, 而且能够不受噪声干扰, 提供更加准确的风场数据. 该算法为 MF 雷达在中高层大气风场反演中的应用提供了新的思路.

参考文献

- [1] YI W, XUE X H, REID I M, *et al.* Climatology of the mesopause relative density using a global distribution of meteor radars[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(11): 7567-7581
- [2] YI W, XUE X H, REID I M, *et al.* Climatology of inter-hemispheric mesopause temperatures using the high-latitude and middle-latitude meteor radars[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2021, **126**(6): e2020JD034301
- [3] YI W, XUE X H, CHEN J S, *et al.* Estimation of mesopause temperatures at low latitudes using the kunming meteor radar[J]. *Radio Science*, 2016, **51**(3): 130-141
- [4] ZENG J, YI W, XUE X H, *et al.* Comparison between the mesospheric winds observed by two collocated meteor radars at low latitudes[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(10): 2354
- [5] VENKATESH V, FRASIER S J. Simulation of spaced antenna wind retrieval performance on an X-Band active phased array weather radar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, **30**(7): 1447-1459
- [6] ZHAO Jun. Research on General Design and Key Technologies of Wuhan MF Radar[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009 (赵军. 武汉中频雷达总体设计与若干关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009)
- [7] ATRAD. Atrad radar system software reference manual[OL]. [2025-02-17]. <https://www.atrad.com.Au>
- [8] CHEN J S, ZHANG Y, WANG L M, *et al.* Polynomial fitting-based noise reduction for correlation functions in medium-frequency radar[J]. *Atmosphere*, 2024, **15**(8): 899
- [9] DOVIAK R J, LATATIS R J, HOLLOWAY C L. Cross correlations and cross spectra for spaced antenna wind profilers: 1. theoretical analysis[J]. *Radio Science*, 1996, **31**(1): 157-180
- [10] HOLDSWORTH D A, REID I M. A simple model of atmospheric radar backscatter: description and application to the full correlation analysis of spaced antenna data[J]. *Radio Science*, 1995, **30**(4): 1263-1280
- [11] COHN S A, HOLLOWAY C L, ONCLEY S P, *et al.* Validation of a UHF spaced antenna wind profiler for high-resolution boundary layer observations[J]. *Radio Science*, 1997, **32**(3): 1279-1296
- [12] HOLDSWORTH D A. Signal analysis with applications to atmospheric radars[D]. Adelaide: University of Adelaide, 1995
- [13] KUMAR S, RAO T N, RAO M D, *et al.* Multi-Receiver augmentation to advanced Indian MST Radar (AIR)—implementation of spaced antenna technique[J]. *Radio Science*, 2021, **56**(9): e2021RS007263
- [14] REID I M. Radar observations of stratified layers in the mesosphere and lower thermosphere (50–100 km)[J]. *Advances in Space Research*, 1990, **10**(10): 7-19
- [15] HOCKING W K, RÜSTER R, CZECHOWSKY P. Absolute reflectivities and aspect sensitivities of VHF radio wave scatterers measured with the soupy radar[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1986, **48**(2): 131-144
- [16] ZHAO Lei, CHEN Jinsong, LI Na, *et al.* MF radar in kunming and its preliminary observation results[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, **31**(1): 27-33 (赵蕾, 陈金松, 李娜, 等. 昆明 MF 雷达及初步探测结果 [J]. *空间科学学报*, 2011, **31**(1): 27-33)

作者简介



邹展卓 男, 2000 年出生于广东省韶关市, 广西民族大学电子信息学院硕士研究生, 研究方向为中频雷达信号处理理论.
E-mail: 1084024616@qq.com



王黎明 (通信作者) 男, 1988 年出生于广西壮族自治区南宁市, 广西民族大学电子信息学院讲师, 博士, 研究方向为中高层大气探测、MIMO 雷达估计理论及雷达信号处理理论.
E-mail: lwang@gxmzu.edu.cn