

邢晓晴,陆威,范红云,等.相干多普勒激光雷达微弱回波综合频率估计算法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):378-384.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240387
XING Xiaoqing,LU Wei,FAN Hongyun,et al.A comprehensive frequency estimation algorithm for weak echoes in coherent Doppler lidar[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(3):378-384.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240387

相干多普勒激光雷达微弱回波综合频率估计算法

邢晓晴¹, 陆威², 范红云¹, 邢志伟³

(1. 中国民用航空飞行学院航空电子电气学院,四川广汉 618307;2. 哈尔滨工业大学可调谐激光技术重点实验室,黑龙江哈尔滨 150006;3. 中国民航大学电子信息与自动化学院,天津 300300)

摘要:为解决相干多普勒激光雷达微弱回波信号频谱信息提取精度低、探测概率低的问题,基于传统信号的时频域分析方法,提出一种将信号的相干积累、自相关运算、Welch功率谱估计与能量重心法相结合的频谱估计算法。仿真结果表明:与能量重心法和比值法相比,该算法的频率估算平均精度分别提高43%和46%,在相同条件下雷达探测概率最高。所提算法能效提升相干多普勒激光雷达微弱信号的频率估计性能,提高雷达测速精度与探测距离,探测能力更加稳定。将该算法应用于1 550 nm相干多普勒激光雷达回波信号处理,有效提高了雷达的测速精度。

关键词:相干多普勒激光雷达;频率估计;能量重心法;Welch谱估计;自相关运算;微弱信号;回波信号
中图分类号:TN958 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-0562(2025)03-0378-07

A comprehensive frequency estimation algorithm for weak echoes in coherent Doppler lidar

XING Xiaoqing¹, LU Wei², FAN Hongyun¹, XING Zhiwei³

(1. College of Aviation Electronics and Electrical, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China; 3. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract:In order to solve the problem of low accuracy and low detection probability of spectrum information extraction of weak echo signal of coherent Doppler lidar, a spectrum estimation algorithm combining coherent accumulation, autocorrelation operation, Welch power spectrum estimation and energy barycenter method of signal is proposed based on the time-frequency domain analysis method of traditional signal. The simulation results show that compared with the energy center of gravity method and the ratio method, the average frequency estimation accuracy of the algorithm is increased by 43% and 46% respectively, and the lidar detection probability is the highest under the same conditions. The simulation results verify that the proposed algorithm can improve the frequency estimation performance of the weak signal of the coherent Doppler lidar, improve the lidar speed measurement accuracy and detection distance, and the detection ability is more stable. The algorithm is applied to the echo signal of 1 550 nm coherent Doppler lidar. The results show that the proposed algorithm effectively improves the velocity measurement accuracy of the lidar.

Keywords:coherent Doppler lidar; frequency estimation; energy barycenter method; Welch spectrum estimation; autocorrelation operation; weak signal; echo signal

0 引言

相干多普勒激光雷达具有测量精度高、动态

响应快、时空分辨率高等特点^[1-4],被广泛应用于低空风切变探测、飞机尾涡监测等领域,是风场探测的可靠技术手段与研究热点之一^[5-7]。目前学

收稿日期:2024-11-05 修回日期:2024-12-24 接受日期:2024-12-30 责任编辑:焦丽
基金项目:国家自然科学基金项目(U2333205);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(24CAFUC0320)
作者简介:邢晓晴(1991-),女,辽宁沈阳人,博士研究生,讲师,主要从事激光雷达信号处理方面的研究。E-mail: xingxiaoping@cafuc.edu.cn

者们主要针对激光雷达结构、风场反演和信号处理技术方面开展研究^[8-11]。在国外, 2 μm 激光雷达的研究与应用较为成熟, 但在国内该波段元器件难以获取, 因此国内相干激光雷达的研究主要集中在 1 550 nm 波段^[12-13]。该波段的雷达采用光纤激光器作为探测光源, 受限于较低的激光输出能量, 回波信号中存在背景噪声、电噪声等干扰, 使信号信噪比大幅降低, 进而大幅降低了信号的频率估计精度, 限制了系统的探测能力^[14]。

精确提取多普勒频域的信息是实现系统高精度速度测量的关键。目前, 相干激光雷达的信号处理主要采用以傅里叶变换为基础的频域分析, 并结合频谱校正算法。其中, 能量重心法算法简单, 在选用汉宁窗时校正精度较高。丁康等^[15]验证了能量重心法在提升频谱分析精度方面的可行性。姚金杰等^[16]提出利用改进的能量重心法进行多普勒频率测量, 测频精度高于能量重心法。刘帆等^[17]利用“频谱细化+频谱校正”技术提高多普勒测速精度。上述算法均对信号信噪比有较高要求, 无法针对微弱信号进行精确分析。有研究表明, 雷达信号的相干积累与自相关运算能有效提升信号信噪比^[18-19]。因此, 本文提出一种将信号的相干积累、自相关运算、Welch 功率谱估计与能量重心法相结合的频谱分析综合算法。

为验证本文所提算法在微弱信号频谱分析方面的性能及其对测速精度的影响, 将该算法与两种常用的经典算法——“Welch+比值法”“Welch+能量重心法”进行对比分析。在仿真分析的基础上将 3 种算法应用于 1 550 nm 真实雷达回波信号的频谱分析。通过对比 3 种算法频谱分析结果的平均绝对误差 (MAE) 与均方根误差 (RMSE), 验证本文所提算法的有效性与优越性。

1 频谱估计算法原理

相干激光雷达发射的信号在气溶胶粒子处发生散射产生回波信号, 由雷达接收回波信号并与本振信号进行混频, 得到带有气溶胶粒子运动速度相关信息的中频信号, 计算可得由风场引起的多普勒频移。相干激光测风雷达信号的特点与处理难点在于噪声水平较高, 实际雷达信号的信噪比较低, 同时信号的截断导致频谱离散化, 频谱估计的精度较低。结合以上特点, 提出本算法的基本思路: 先通过相干积累与自相关运算提高信号的信噪比, 再通过 Welch 功率谱估计与能量重心法提高频谱分析的精度, 相关理论如下。

(1) 相干积累

相干积累是利用信号的相关性和噪声的随机性, 通过时域叠加提高信号的信噪比。设雷达的回波信号 $R(t)$ 由正弦信号 $S(t)$ 和均值为 0 的高斯白噪声 $N(t)$ 组成, 可表示为

$$R(t) = S(t) + N(t) \quad 0 < t < T. \quad (1)$$

基于正弦信号的相关性和噪声的随机性, 计算得到对 M 个目标回波信号进行相干叠加后的信噪比, 即

$$\left(\frac{S}{N}\right)_M = \frac{M^2 [S(t)]^2}{E \left\{ \sum_{i=1}^M N_i^2(t) \right\}} = M \left(\frac{S}{N}\right)_1. \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 雷达信号的相干积累可有效提升信号的信噪比, 但 M 的增加会延长系统探测时间, 导致系统实时性下降。当风场发生快速剧烈的变化时, 雷达信号的相干叠加会造成风场信息丢失。此外, 气溶胶粒子的散射会破坏信号的相干性, 从而降低相干积累的效率^[20]。因此进行相干积累时, M 不宜过大, 该方法对系统信噪比的提升存在一定局限。

(2) 自相关运算

对雷达信号 $R(t)$ 进行等间隔抽样, 其离散信号序列 $R[n]$ ($n=0, 1, 2, \dots, K-1$) 由 K 个实样本组成, 是目标回波信号 $S[n]$ 和噪声 $N[n]$ 之和, 可表示为

$$R[n] = S[n] + N[n] = A \sin[2\pi fn\Delta t + \varphi_0] + N[n], \quad (3)$$

式中: A 、 f 、 φ_0 分别为雷达回波信号的振幅、频率和初始相位; Δt 为采样时间间隔; $N[n]$ 为均值为 0、方差为 δ^2 的高斯白噪声。

输入信号 $R[n]$ 与延迟 m ($m=0, 1, 2, 3, \dots$) 个采样点后的输入信号 $R[n+m]$ 之间的自相关函数可表示为

$$y[m] = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} R[n+m] \times R[n]. \quad (4)$$

当 K 较大时, $y[m]$ 的信噪比可表示为

$$\text{SNR}_y = \frac{KA^4}{8(A^2\delta^2 + \delta^4)} = \frac{K \cdot \text{SNR}_R^2}{2(2 \cdot \text{SNR}_R + 1)}, \quad (5)$$

式中, SNR_R 为输入信号 $R[n]$ 的信噪比。

由式 (5) 可见, 自相关运算可有效提升输出信号的信噪比, 且信噪比的提升与自相关运算的实样本数 K 成正比, K 由信号探测时长直接决定。考虑到雷达信号相干长度以及算法运算时长的限制, 信号探测时长无法无限增加。因此, 自相关算法对信号信噪比的提升程度有限。

(3) Welch 功率谱估计

在经典谱估计中, 直接使用周期图法会出现

功率谱方差较大等问题。采用Welch功率谱估计法可有效改善直接周期图法的方差特性。Welch功率谱估计法通过分段加窗,将输入信号 $R(t)$ 分为 L 段等长的信号,允许各段信号间出现重叠。首先,分别计算各段信号的功率谱 $P_i(\omega)$,再计算平均功率谱为

$$\bar{P}(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L P_i(\omega) \quad (6)$$

根据概率统计理论计算可得,Welch功率谱估计法计算得到的功率谱方差为直接周期图法方差的 $1/L$ 。 L 越大,得到的功率谱方差越小,但 L 的增大会导致各功率谱偏差增大,功率谱分辨率降低。因此,采用Welch功率谱估计时,需综合权衡方差与谱分辨率,选取合适的 L 值。

(4) 能量重心法

能量重心法是基于窗函数离散频谱的能量重心趋近于坐标原点或位于原点附近这一特性提出的,采用该方法对频谱主瓣图形与谱线进行能量重心计算,得到校正后的多普勒频率为

$$f_d^* = \frac{f_s}{N} \cdot \frac{\sum_{i=-n}^n y_{k_0+i}(k_0+i)}{\sum_{i=-n}^n y_{k_0+i}} \quad n = \infty, \quad (7)$$

式中: f_s 为信号的采样频率; N 为采样点数; k_0 为最大值谱线序号; y_{k_0+i} 为功率谱第 k_0+i 条谱线值。

2 频谱估计实验

2.1 仿真实验

根据上述理论,构建基于相干积累、自相关运算、Welch功率谱估计和能量重心法的多普勒信号频率估计算法,算法流程见图1。在开展Welch功率谱估计与能量重心法之前,先对时域信号实施相干积累与自相关运算,提高信号信噪比,实现对微弱信号频率的高精度测量。

为验证本文所提出算法的性能,参照激光雷达实际使用的单频窄线宽激光源,通过Matlab仿真产生接近实际的雷达信号,即添加高斯白噪声的单频正弦信号。设置仿真参数如下:中频信号的频率 f 为80 MHz,未添加高斯白噪声的信号为 $x(t)=\sin(2\pi ft)$ 。考虑频率的对称性,设系统采样频率为1.024 GHz,采样点数为1024,离散频谱分辨率为1 MHz。设相干积累信号帧数为100,自相关点数为500。Welch功率谱估计选用Hanning窗,恢复系数为2.667。

在频率分辨率区间(80 MHz, 81 MHz)内均匀

选取9个点,信噪比设定为-10 dB、-5 dB、0 dB、5 dB,分别采用本文算法、“Welch+比值法”和“Welch+能量重心法”对信号进行频率估计,计算频谱估计结果的MAE和RMSE,结果见图2和图3。

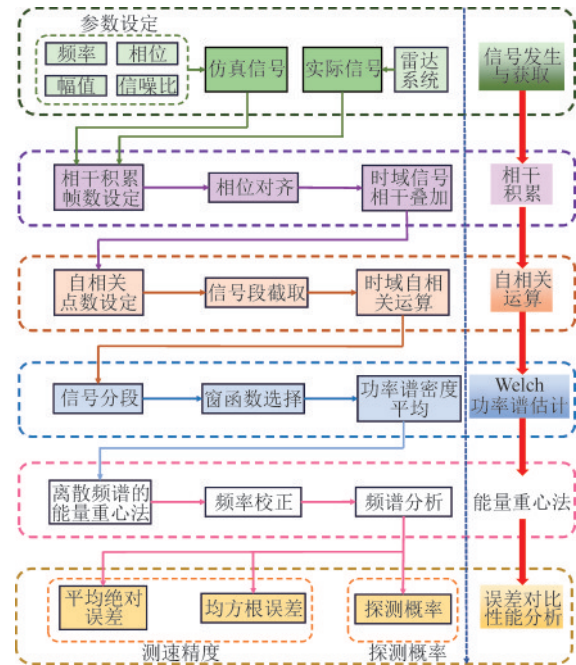


图1 频谱估计算法流程

Fig.1 process of spectrum estimation algorithm

由图2与图3可以看出,在相同的信噪比条件下,本文算法的MAE和RMSE均优于“Welch+比值法”和“Welch+能量重心法”。“Welch+比值法”的MAE与RMSE的波动幅度大于“Welch+能量重心法”。当信号信噪比提高时,3种算法的计算精度均有不同程度的提高。在任意频率条件下,本文算法的MAE和RMSE均低于“Welch+能量重心法”。针对所选频率范围内的各频率信号,分别进行20组重复实验,计算各频率信号估计的平均绝对误差的平均值。对比可知,与“Welch+比值法”和“Welch+能量重心法”相比,本文算法的频率估算精度分别提高了43%和46%。仿真实验结果表明,时域信号的相干积累和自相关运算可有效提高信号的信噪比,降低噪声对频率估计精度的影响,有效提高频率估计精度。对比图2与图3可见,在相同信噪比条件下,同组实验数据的MAE与RMSE整体走势接近,但仍存在微小的幅度差别。其内在原因为MAE为 L_1 范数,RMSE为 L_2 范数。范数次数越高,计算结果与较大数值的相关性越高。因此RMSE对于测量异常值更为敏感。

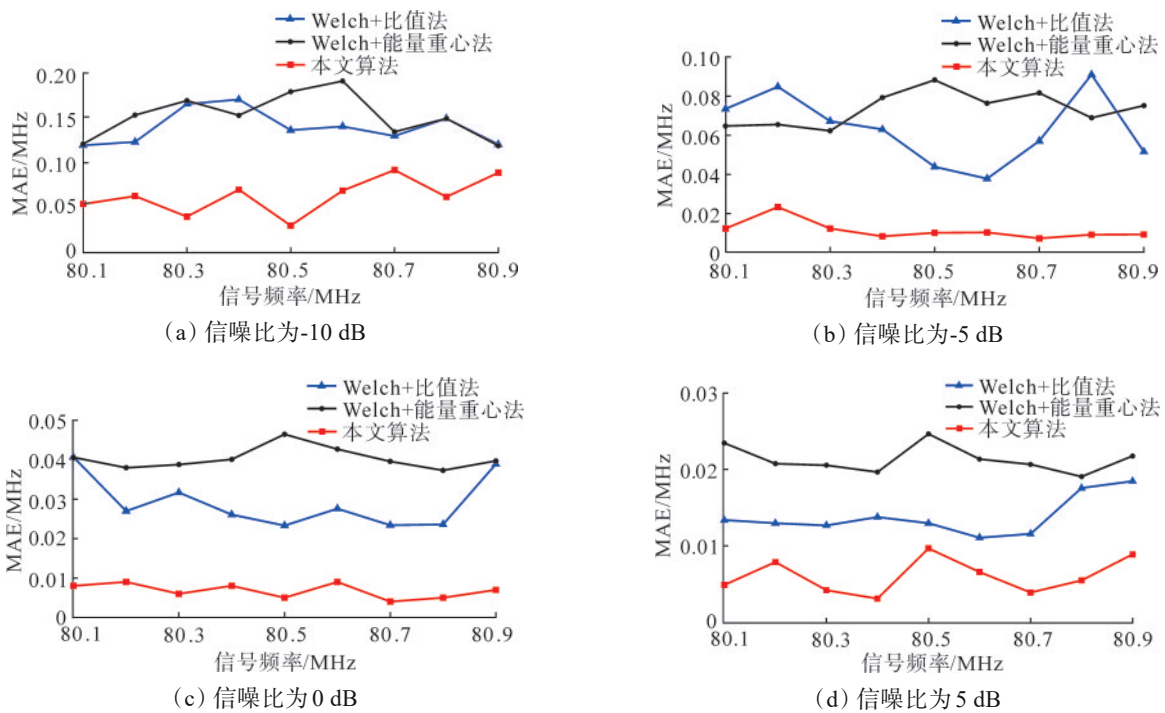


图2 不同信噪比下3种算法的MAE

Fig.2 MAE of three algorithms under different signal-to-noise ratios conditions

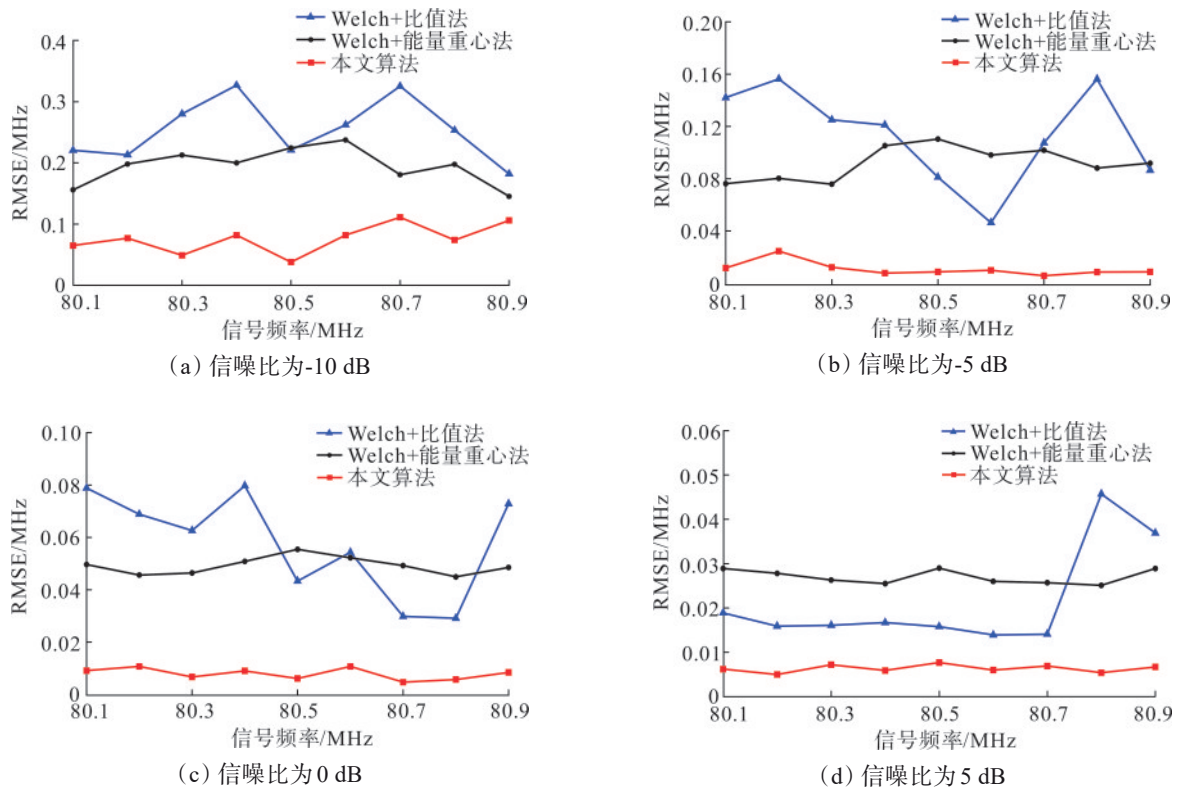


图3 不同信噪比下3种算法的RMSE

Fig.3 RMSE of three algorithms under different signal-to-noise ratios

雷达探测概率是衡量雷达探测能力的重要参数之一。通过 Matlab 编程产生频率为 80 MHz、信

噪比在(-20 dB, -5 dB)范围内的多组正弦信号, 并针对每组信号分别开展 100 次探测实验, 采用 3 种

算法对探测结果进行分析并计算其探测概率,结果见图4。

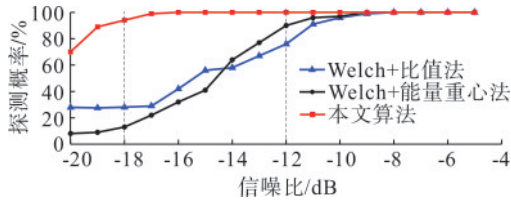


图4 不同信噪比条件下3种算法探测概率对比

Fig.4 comparison of detection probability of three algorithms under different signal-to-noise ratios

由图4可见,本文算法的探测概率在信号信噪比范围内均高于“Welch+比值法”和“Welch+能量重心法”。通常认为相干激光测风雷达的系统探测概率达到85%时,雷达处于较为稳定的探测水平,探测结果的可信度较高。因此本次实验选定探测概率为85%作为有效探测的阈值。本文算法在信号信噪比为-19.21 dB时探测概率达到85%。

而“Welch+比值法”“Welch+能量重心法”则分别需要在信号信噪比达到-11.40 dB、-12.38 dB时,才能实现85%的探测概率。因此,本文算法在信噪比较低的条件下可获得较高的探测概率。在实际探测中,雷达信号信噪比的降低意味着探测距离的增加,因此认为本文算法可提升微弱信号的探测能力,增大雷达探测距离。

对采集信噪比分别为-18 dB、-12 dB,探测时长为6 000 ms的雷达信号进行探测概率分析,分别采用本文算法、“Welch+比值法”和“Welch+能量重心法”进行信号处理,时频分析结果见图5和图6。由图5、图6可见,信噪比为-18 dB时,3种算法的探测概率分别为28.02%、13.15%、94.32%;信噪比为-12 dB时,3种算法的探测概率分别为76.15%、90.42%、99.99%。由此可知,与“Welch+能量重心法”相比,本文算法的探测概率提升效果更显著。

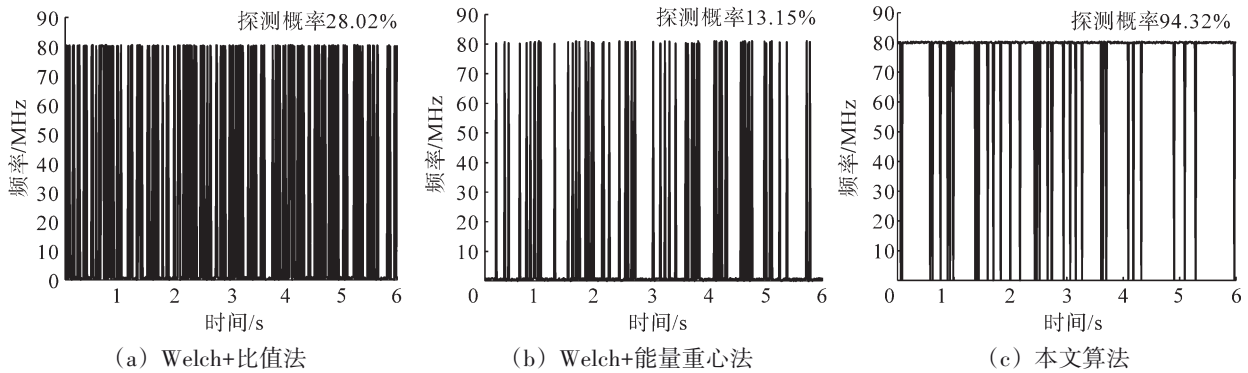


图5 信噪比为-18 dB条件下不同算法的时频分析

Fig.5 time-frequency analysis of different algorithms under the condition of -18 dB signal-to-noise ratio

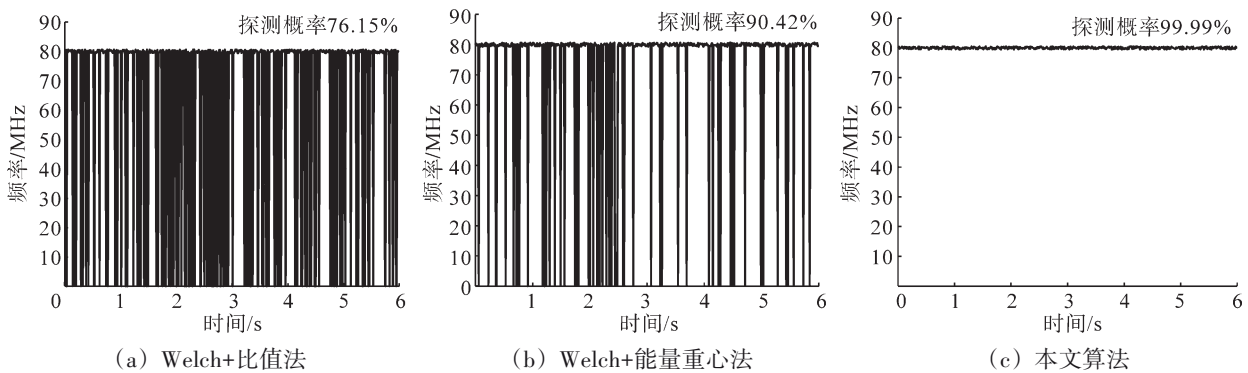


图6 信噪比为-12 dB条件下不同算法的时频分析

Fig.6 time-frequency analysis of different algorithms under the condition of -12 dB signal-to-noise ratio

综上,本文算法采用相干积累和自相关运算相结合的时域信号处理方法可以有效提高雷达回波信号的信噪比,进而提高频谱估计的精度。另外,与“Welch+比值法”和“Welch+能量重心

法”相比,本文算法在保证快速响应的同时,可获得更高的探测精度与探测概率,进一步提升了雷达探测性能。

2.2 相干激光雷达实验

1 550 nm全光纤相干激光雷达实验装置见图7,由该装置开展针对硬目标的多组速度测量实验。一台转速可调的旋转电机为实验的动力源,表面磨砂处理的叶片为探测目标的运动装置,结构见图8。由理论分析可知,回波信号的多普勒频移 Δf 与雷达探测点处叶片在探测方向的速度分量成正比。探测目标为高速机动物体,在相干积累过程中,目标产生的距离抖动和多普勒抖动会导致回波信号的相位出现偏差,因此本文算法中的相干积累效率略低于理论值。

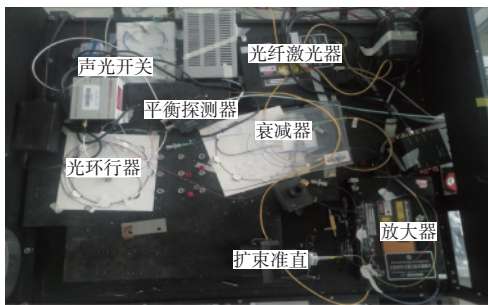


图7 相干激光雷达实验装置
Fig.7 coherent lidar devices

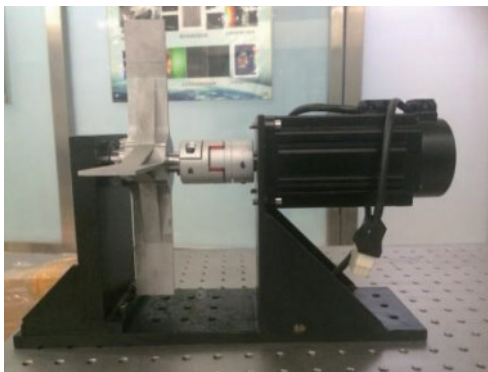


图8 转速可调的运动装置
Fig.8 speed-adjustable motion device

结合日常的风速和雷达的目标测速范围,将电机转速分别设置为700 r/min、1 000 r/min、1 300 r/min、1 600 r/min和1 900 r/min,利用转动叶片为雷达提供不同运动速度的目标,各转速条件下回波信号的信噪比水平相当,电机转速为700 r/min时的回波信号见图9。回波信号受噪声干扰出现振幅波动,影响鉴频精度。

在不同转速条件下,分别采集100组雷达回波信号。设置采样频率为10 GHz,采样点数为1 024,相干积累信号帧数为10,自相关点数为100。分别采用3种算法对采集的回波信号进行频率估计,估

计结果的MAE和RMSE见图10和图11。

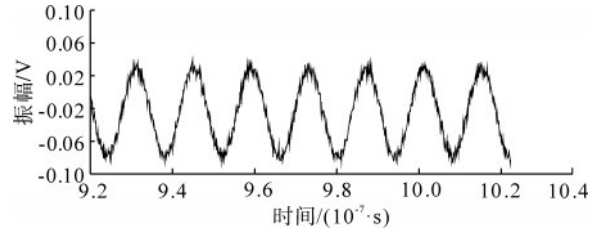


图9 转速700 r/min的雷达回波时域信号
Fig.9 lidar echo time-domain signal at 700 r/min rotational speed

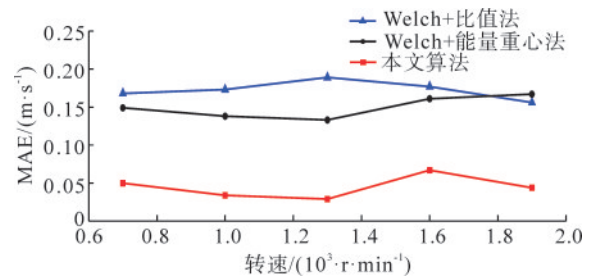


图10 不同速度下3种算法的MAE
Fig.10 MAE of three algorithms under different speed conditions

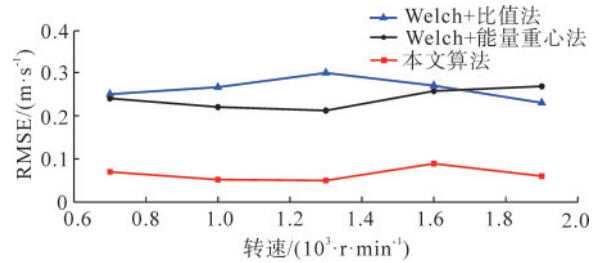


图11 不同速度下3种算法的RMSE
Fig.11 RMSE of three algorithms under different speed conditions

由上述实验结果可知,在对多普勒雷达信号处理时,本文算法的MAE与RMSE均低于“Welch+比值法”和“Welch+能量重心法”,有效提升了频谱分辨精度,验证了时域信号的相干积累与自相关运算在提升信号信噪比与系统整体测量精度方面的有效性。同时,“Welch+比值法”的MAE与RMSE波动幅度整体高于“Welch+能量重心法”。以上实验结果均与仿真分析结论一致。

3 结论

(1) 本文提出了一种以信号相干积累、自相关运算为基础,以Welch功率谱估计与能量重心法为核心的频率估计综合算法。仿真结果表明,与“Welch+比值法”和“Welch+能量重心法”相比,该算法的平均绝对误差、均方根误差和探测概率

均最优。本文算法可提升系统对微弱信号的探测能力,获得更高的频率估算精度与探测概率,进而有效提升雷达探测精度与探测距离。开展相干激光雷达实验,验证了算法的可行性。结论与仿真基本一致。

(2) 考虑到大气微粒对雷达信号的相位破坏,本文算法针对风场探测时相干积累效率会有所降低,但仍可以在一定程度上提高信号的信噪比,提升雷达探测性能。

参考文献(References):

- [1] 胡申森,刘继桥,刁伟峰,等. 机载多普勒激光测风雷达风场反演研究[J]. 气象科学,2016, 36(1):96-101.
HU Shensen, LIU Jiqiao, DIAO Weifeng, et al. Wind profile inversion based on airborne Doppler wind lidar[J]. Journal of the Meteorological Sciences,2016,36(1):96-101.
- [2] XIA H Y, CHEN Y X, YUAN J L, et al. Windshear detection in rain using a 30 km radius coherent Doppler wind lidar at mega airport in Plateau [J]. Remote Sensing,2024,16(5):924.
- [3] ABDELAZIM S, SANTORO D, MOSHARY F. FPGA programming challenges when estimating power spectral density and autocorrelation in coherent doppler lidar systems for wind sensing[J]. Sensors, 2025, 25(3): 973.
- [4] LE DUFF A, PLANTIER G, VALIERE J C, et al. Analog sensor design proposal for laser Doppler velocimetry[J]. IEEE Sensors Journal,2004,4(2):257-261.
- [5] 裴家伟,章振,余赛芬,等. 1.5 微米大气探测激光雷达研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程,2021,50(3):46-60.
QIU Jiawei, ZHANG Zhen, YU Saifen, et al. Development of 1.5 μm lidar for atmospheric detection(invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021,50(3): 46-60.
- [6] LIU Z, YUAN L C, TANG J, et al. Coherent Doppler lidar wind retrieval for a typhoon based on the genetic simulated annealing algorithm[J]. Chinese Optics Letters,2024,22(4):040101.
- [7] 顾桃峰,岳海燕,王四化,等. 一种基于多普勒原理的相干测风激光雷达及其外场应用[J]. 大气与环境光学报,2024,19(1):22-37.
GU Taofeng, YUE Haiyan, WANG Sihua, et al. A coherent wind lidar based on Doppler principle and its field application [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2024, 19(1): 22-37.
- [8] 吴松华,戴光耀,龙文睿,等. 风云第三代极轨卫星测风激光雷达仿真与指标分析(特邀)[J]. 光学学报,2024,44(18):51-63.
WU Songhua, DAI Guangyao, LONG Wenrui, et al. Observation simulation and metrics demonstration of FY third-generation polar-orbiting spaceborne wind measurement lidar(invited) [J]. Acta Optica Sinica,2024, 44 (18):51-63.
- [9] KAMEYAMA S, FURUTA M, YOSHIKAWA E. Performance simulation theory of low-level wind shear detections using an airborne coherent Doppler lidar based on RTCA DO-220[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2023,61:5700112.
- [10] ZHANG Y P, YUAN J L, WU Y B, et al. Sub-meter wind detection with pulsed coherent Doppler lidar[J]. Physical Review Fluids, 2023,8(2):L022701.
- [11] YU R H, WANG Q C, DAI G Y, et al. The design and performance evaluation of a 1550 nm all-fiber dual-polarization coherent Doppler Lidar for atmospheric aerosol measurements[J]. Remote Sensing,2023,15(22):5336.
- [12] 左金辉,贾豫东. 多普勒激光雷达风场反演研究进展[J]. 激光与红外,2021,51(1):3-8.
ZUO Jinhui, JIA Yudong. Research progress in wind field inversion of Doppler lidar [J]. Laser and Infrared,2021,51(1):3-8.
- [13] 金效梅,朱文越,刘庆,等. 相干测风激光雷达的数值建模和仿真分析[J]. 光学学报,2021,41(6):29-38.
JIN Xiaomei, ZHU Wenyue, LIU Qing, et al. Numerical modeling and simulation analysis of coherent wind lidar [J]. Acta Optica Sinica,2021,41(6):29-38.
- [14] SMALIKHO I N, BANAKH V A, SHERSTOBITOV A M. Estimation of signal-to-noise ratio from pulsed coherent Doppler lidar measurements under nonstationary noise[J]. Atmospheric and Oceanic Optics,2024, 37(3):373-381.
- [15] 丁康,江利旗. 离散频谱的能量重心校正法[J]. 振动工程学报, 2001,14(3):354-358.
DING Kang, JIANG Liqi. Energy centrobaric correction method for discrete spectrum[J]. Journal of Vibration Engineering,2001,14 (3):354-358.
- [16] 姚金杰,韩焱. 基于 Welch 谱估计和能量重心法的多普勒速度测量[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(2):291-292,296.
YAO Jinjie, HAN Yan. Doppler velocity measurement based on Welch power spectral estimation and energy centro-baric method [J]. Journal of Missile and Guidance,2008,28(2):291-292,296.
- [17] 刘帆,金世龙. 激光多普勒测速仪中的频谱分析技术[J]. 红外与激光工程,2012,41(6):1462-1470.
LIU Fan, JIN Shilong. Frequency analysis technology in laser Doppler velocimeter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (6):1462-1470.
- [18] LIN R Q, GUO P, CHEN H, et al. Smoothed accumulated spectra based wDSWF method for real-time wind vector estimation of pulsed coherent Doppler lidar[J]. Optics Express, 2022, 30(1): 180-194.
- [19] SHERSTOBITOV A M, MAKHMANAZAROV R M. Pulse coherent Doppler lidar signal processing on FPGA: implementation of the method of accumulation of a real autocorrelation function[J]. Proceedings of SPIE,2021,11916.
- [20] 徐荷,孙迪峰,李健兵. 相干测风激光雷达回波相干性分析[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(14):329-337.
XU He, SUN Difeng, LI Jianbing. Coherence analysis of echoes from coherent wind lidar [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2023,60(14):329-337.