

基于改进 Zoom-FFT 的无人机仿地飞行毫米波雷达测高方法

杜柳青 刘 凯 余永维 黄 倩 刘 豪 刘中元

(重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054)

摘要: 为解决频率估计精度受限于频率分辨率和栅栏效应的难题,以提高无人机测高精度,提出了一种基于改进 Zoom-FFT 算法的毫米波雷达高精度频率估计方法。在建立 Zoom-FFT 算法误差模型、系统分析误差关键因素的基础上,提出了一种基于频率修正的改进 Zoom-FFT 频率估计方法:首先,使用 FFT 算法对中频信号进行频率粗估计,确定频率的感兴趣区间;然后,通过 Zoom-FFT 频谱细化技术,提高感兴趣频带内的频率分辨率;最后,提出二次多项式拟合细化频谱的频率修正方法,拟合最大谱线及其相邻谱线,求解修正频率,以有效补偿栅栏效应带来的偏差。仿真表明,本文方法在不同信噪比和频率条件下,均表现出良好的频率估计精度与稳定性,性能比传统方法更接近理论极限。进一步的无人机测高实验表明,在 2 m 悬停状态下,本文算法的无人机测高最大误差为 2.8 mm,实现了毫米级精度;在飞行状态下,测高与测角精度也优于传统 Zoom-FFT 等算法,测量精度提高 33% 以上,证明了本文方法的有效性与实用性。

关键词: 毫米波雷达; 测高; 坡度测量; 无人机; 仿地飞行; Zoom-FFT 算法

中图分类号: TN959.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)19-0346-09

OSID:



Altitude Measurement Method for UAV Terrain-following Flight Using Millimeter-wave Radar Based on Improved Zoom-FFT

Du Liuqing Liu Kai Yu Yongwei Huang Qian Liu Hao Liu Zhongyuan

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Aiming to solve the problem that frequency estimation accuracy is limited by frequency resolution and the fence effect, and improve the altitude measurement accuracy of unmanned aerial vehicles (UAVs), a high-precision frequency estimation method was proposed for millimeter-wave radar based on an improved Zoom-FFT algorithm. Based on the establishment of an error model of the Zoom-FFT algorithm and a systematic analysis of the key error factors, an improved Zoom-FFT frequency estimation method using frequency correction was proposed. Firstly, the fast Fourier transform (FFT) algorithm was used to perform coarse frequency estimation on the intermediate frequency (IF) signal to determine the frequency band of interest. Secondly, the Zoom-FFT spectrum refinement technique was applied to enhance the frequency resolution within the band of interest. Finally, a frequency correction method based on quadratic polynomial fitting of the refined spectrum was proposed, which fit the maximum spectral line and its adjacent spectral lines to obtain the corrected frequency, thereby effectively compensating for the bias caused by the fence effect. Simulations demonstrated that the proposed method exhibited good frequency estimation accuracy and stability under different signal-to-noise ratio and frequency conditions, and its performance was closer to the theoretical limit than that of conventional methods. Further UAV altitude measurement experiments showed that in a hovering state at 2 m altitude, the maximum altitude measurement error of the proposed algorithm was 2.8 mm, achieving millimeter-level accuracy. In the flying state, both altitude and angle measurement accuracies were superior to those

收稿日期: 2026-04-03 修回日期: 2026-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375083)、重庆市教委重大科研项目(KJZD-M202401101、KJZD-M202501102)和重庆英才项目(CQYC20220207232/cstc2024ycjh-bgzxm0052)

作者简介: 杜柳青(1975—),女,教授,博士,主要从事无人机控制技术研究,E-mail: lqdu@cqut.edu.cn

通信作者: 余永维(1973—),男,教授,博士,主要从事毫米波雷达测量技术研究,E-mail: weiyi@cqut.edu.cn

of the traditional Zoom-FFT and other algorithms, and the measurement accuracy was improved by more than 33%, proving the effectiveness and practicality of the proposed method.

Key words: millimeter-wave radar; altitude measurement; slope measurement; UAV; terrain-following flight; Zoom-FFT algorithm

0 引言

植保无人机可以高效完成一系列任务,如农药喷洒^[1]、土壤检测^[2]、作物授粉^[3]和作物监测^[4]等。植保无人机的仿地飞行要求无人机始终与农作物保持在 1.5~3.0 m 的近地空中进行作业,以达到良好的植保作业效果^[5-6]。

准确的高度测量是无人机实现自主仿地飞行的关键,目前主要采用的 GNSS、气压计、超声波、立体视觉、激光雷达等传感器及相应算法^[7-9],测量准确性受大气压、光线、烟雾等环境条件的影响很大。毫米波雷达不受大气压、温度、能见度及烟雾等的影响,能够全天候地工作,且具有较强的探测能力和分辨力^[10],是目前自动驾驶距离探测领域的研究热点。毫米波雷达具有出色的尺寸、重量和功耗指标,工业界和学术界探索其在汽车领域之外的应用。Awan 等^[11-12]研究毫米波雷达波形设计和地形变化补偿方法,探讨将 77 GHz 车载毫米波雷达用于无人机测高的可行性,目前毫米波雷达在无人系统测高方面的研究相对较少。

毫米波雷达通过快速傅里叶变换(Fast Fourier transform,FFT)来估计回波与发射信号之间的频率差以获得距离信息^[13-14],但传统 FFT 的频率分辨率受采样频率和采样点数影响,会出现栅栏现象,频率估计误差较大,这是导致无人机距离测量产生误差的主要因素。为降低频率估计偏差,相关学者提出了不同的优化算法,主要围绕改进 FFT 类频率估计算法,Zoom-FFT 优化方法等^[15-20]。但是 Zoom-FFT 算法本质上仍是基于离散谱线进行估计,其细化后的频谱依然会受到栅栏效应的影响,导致估计精度达到瓶颈,难以满足无人机仿地飞行高精度测量的要求。

为解决频率分辨率和栅栏效应对无人机高度测量精度的影响,在建立误差模型,并系统分析影响 Zoom-FFT 算法频率估计误差关键因素的基础上,本文提出一种改进 Zoom-FFT 算法的毫米波雷达高精度频率估计方法。将频率估计的过程分成粗估计、细估计和频率修正 3 个阶段:首先,使用 FFT 算法进行粗测,基于中频信号频率粗估计值确定频率的兴趣区间;然后,通过复调制、低通滤波和 D 倍降采样,实现频谱的“局部放大”,提高感兴趣频带

内的频率分辨率;最后,采用二次多项式拟合方法,对细化频谱的最大谱线及其相邻谱线进行插值修正,对栅栏效应带来的偏差进行补偿。

1 Zoom-FFT 测距算法误差建模

1.1 无人机毫米波雷达测距模型

无人机毫米波雷达测距系统主要由压控振荡器、功分器、收发天线、混频器、模数转换器、信号处理器、无人机机载计算机、无人机控制器等构成,如图 1 所示。

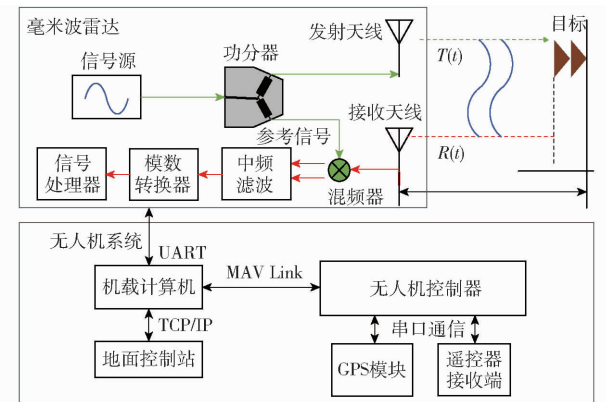


图 1 无人机毫米波雷达测距系统原理图
Fig. 1 Millimeter-wave radar ranging system

毫米波雷达发射线性调频连续波(Frequency modulated continuous wave, FMCW),即频率随时间线性变化的连续信号,测量目标的距离 L 与发射信号 $T(t)$ 、接收信号 $R(t)$ 之间的频率差(即中频信号频率 f_{IF})成正比,毫米波雷达以此“感知”未知目标位置信息。距离 L 的计算式为

$$L = \frac{c_0 T_c}{2B} f_{IF} \tag{1}$$

式中 T_c ——频率调制周期, s
 B ——带宽, Hz
 c_0 ——光速, m/s

1.2 Zoom-FFT 算法误差模型

中频信号频率估计的准确性直接影响无人机高度测量的精度。传统通过 FFT 来估计中频信号频率 f_{IF} ,受采样频率和采样点数限制,其频率估计分辨率低。Zoom-FFT 算法采用局部频率细化策略来提高频率估计的分辨率,其将高频信号转换到低频段,然后再通过 FFT 估计出中频信号频率 f_{IF} ,如图 2 所示。

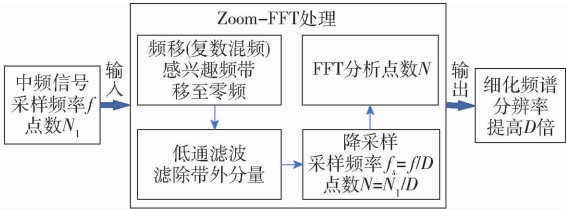


图 2 Zoom-FFT 算法框图

Fig. 2 Block diagram of Zoom-FFT algorithm

在 FFT 分析阶段,设降采样频率为 f_s , 采样点数为 N , 对中频信号的时域离散序列进行采样, 则以欧拉公式表示的中频信号离散序列 S_{IF} 为

$$S_{IF}(n) = Ae^{j(2\pi n \frac{\Delta f}{f_s} + \phi)} \quad (0 < n < N - 1) \quad (2)$$

式中 n ——离散序列索引号
 A ——中频信号幅值
 Δf ——信号频率与细化中心频率差值, Hz
 ϕ ——初始相位, rad

该序列对应的 N 个采样点的 FFT 频谱描述为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} S_{IF}(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (0 \leq k \leq N) \quad (3)$$

$X(k)$ 对应的频谱如图 3 所示。

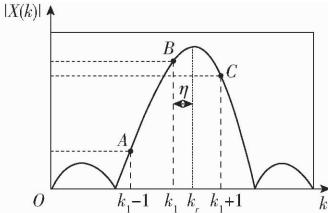


图 3 离散中频信号序列的 DFT 频谱

Fig. 3 DFT spectrum of intermediate frequency sequence

图 3 中实线为频谱包络线, 虚线为频谱谱线, η 为频率测量偏差。 k_r 处的竖直虚线是频谱包络最高点对应的频率, 即真实频率。

由于信号的非整周期截断, FFT 计算的频谱被限制在基频的整数倍, 导致真实峰值谱线 k_{real} 落在最大谱线和相邻谱线之间, 类似于通过栅栏观察连续变化的频谱, 即产生栅栏效应。 栅栏效应导致 Zoom-FFT 算法计算出的幅值峰点与真实频率存在一个未知的频率测量偏差 η , 即

$$\eta = \frac{f_s}{ND} \varepsilon \quad (4)$$

式中 ε ——插值算法的残余误差系数
 D ——降采样因子

栅栏效应导致的偏差 Δf 是 Zoom-FFT 算法测距误差的主要来源, 由其产生的测距误差 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{cT_s f_s}{2BND} \varepsilon \quad (5)$$

2 基于改进 Zoom-FFT 的频率估计算法

为降低栅栏效应导致的 Zoom-FFT 算法频率

估计偏差, 提出采用二次多项式拟合方法对细化频谱的最大谱线及其相邻谱线进行修正, 有效补偿栅栏效应带来的偏差, 获得精确的中频信号频率估计值。 改进算法分为频率粗估计、频谱细化和频率修正 3 个阶段, 其算法流程如图 4 所示。

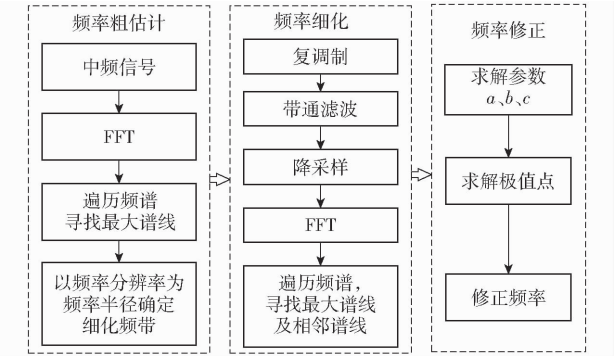


图 4 改进算法流程图

Fig. 4 Improved algorithm flowchart

2.1 频率粗估计

首先, 对中频信号 $x(n)$ 使用 FFT 算法, 并计算出信号的幅值 $|X(k)|$ 。 对频谱进行搜索, 找到最大幅值点对应的频率 f_0 , 以频率分辨率 Δf 为频率半径, 设置频率细化区间 (f_l, f_h) 为

$$f_l = f_0 - \Delta f \quad (6)$$

$$f_h = f_0 + \Delta f \quad (7)$$

2.2 频率细化

对中频离散信号 $x(n)$, 在 $[f_l, f_h]$ 进行高分辨率频谱分析, 具体步骤如下:

(1) 复调制

离散中频信号乘以复指数信号, 将整个频谱向左平移 f_0 , 将细化频段移到零频附近, 复调制后的输出信号 $x_m(n)$ 为

$$x_m(n) = x(n) e^{-j2\pi f_0 n / f_s} \quad (8)$$

通过复调制将整个频谱向左平移 f_0 , 原来位于 f_0 的频率分量现在到了 0 Hz, 而原来在 $[f_l, f_h]$ 的频带现在变成了 $\left[-\frac{z}{2}, \frac{z}{2}\right]$ ($z = f_h - f_l$), 即感兴趣的带宽。

(2) 低通滤波

将复调制后的信号通过一个截止频率为 $\frac{z}{2}$ 的低通滤波器, 滤除感兴趣频带 $\left[-\frac{z}{2}, \frac{z}{2}\right]$ 之外的频率分量, 为降采样做准备。 设低通滤波器的冲激响应为 $h(n)$, 则低通滤波器输出 $x_f(n)$ 为

$$x_f(n) = x_m(n) h(n) \quad (9)$$

(3) 降采样

由于复调制和低通滤波后, 感兴趣频段的带宽

较窄,可以通过降采样减少冗余计算。对滤波后的信号进行 D 倍降采样,即每隔 $D-1$ 个点取一个点,得到新信号。降采样后的第 m 个信号 $x_r(m)$ 为

$$x_r(m) = x_f(nD) \tag{10}$$

(4) FFT 分析

对降采样信号 $x_r(m)$ 进行 FFT 分析,使用更多采样点数的 N_z 提高频率分辨率。计算式为

$$X_z(k) = \sum_{m=0}^{N_z-1} x_r(m) e^{-j\frac{2\pi}{N_z}km} \tag{11}$$

频率分辨率 Δf_z 为

$$\Delta f_z = \frac{\Delta f}{D} \tag{12}$$

2.3 频率修正

对 $X_z(k)$ 进行频谱搜索,找到最大幅值点对应的谱线及其相邻谱线。对 3 根谱线进行二次多项式拟合,令二次多项式函数为

$$R(x) = ax^2 + bx + c \tag{13}$$

式中 $a、b、c$ ——抛物线的拟合系数

拟合函数与数据序列之间的均方误差为

$$S(a,b,c) = \sum_{i=1}^m (R(x_i) - y_i)^2 \tag{14}$$

由多元函数极值原理, $S(a,b,c)$ 的极小值满足

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^m (ax_i^2 + bx_i + c - y_i) x_i^2 = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^m (ax_i^2 + bx_i + c - y_i) x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^m (ax_i^2 + bx_i + c - y_i) = 0 \end{cases} \tag{15}$$

整理公式(15)得到二次多项式函数的拟合方程为

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^4 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \sum_{i=1}^m y_i \end{bmatrix} \tag{16}$$

通过式(16)求解二次多项式参数 $a、b、c$,得到二次多项式的极值点,极值点对应的频率即为修正频率 f_r

$$f_r = -\frac{b}{2a} \tag{17}$$

真实频率 f'_0 的补偿公式为

$$f'_0 = f_0 + f_r \tag{18}$$

3 仿真

为了验证本文方法的性能,将本文算法与 FFT

类算法(FFT 算法、补零 FFT 算法和 Zoom-FFT 算法)、目前效果相对较优的 CZT 算法,以及克拉美罗下限(Cramér-Rao lower bound, CRLB)进行仿真比较分析。单一频率复正弦信号的 CRLB 为

$$CRLB = \sqrt{\frac{6f_s^2}{4\pi^2 N(N^2 - 1)R_s}} \tag{19}$$

式中 R_s ——信噪比

使用均方根误差(Root mean square error, RMSE)来衡量频率估计的精度,使用标准差(Standard deviation, SD)来衡量算法的稳定性。

在仿真时,向信号 $s(n)$ 加入高斯白噪声,并进行采样后得到

$$s(n) = Ae^{j(\frac{2\pi}{f_s}m_c n + \varphi_0)} + w(n) \tag{20}$$

式中 $w(n)$ ——高斯白噪声

m_c ——差拍频率,Hz φ_0 ——初始相位

仿真采样频率 $f_s = 10\,000$ Hz,初相位 φ_0 随机取值,振幅 $A = 1$ V,进行 10 000 次独立蒙特卡罗实验。

3.1 不同信噪比下的算法性能

设置信号 $s(n)$ 的频率 $f_c = 2\,000$ Hz,采样点数 $N = 1\,024$,比较信噪比在 $[-20\text{ dB}, 20\text{ dB}]$ 时 FFT 算法、补零 FFT 算法、CZT 算法、Zoom-FFT 算法以及改进 Zoom-FFT 算法频率估计精度和稳定性,结果如图 5、6 所示。

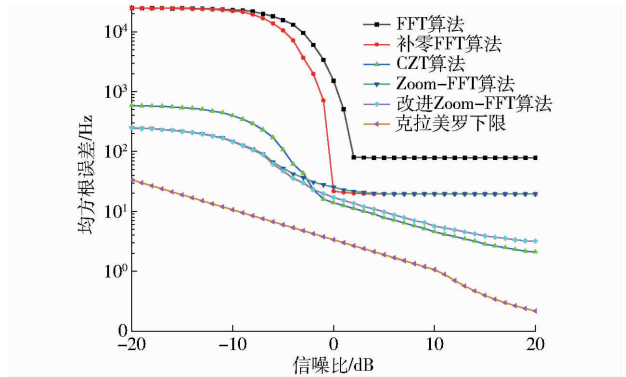


图 5 不同信噪比下频率估计的均方根误差变化曲线

Fig. 5 RMSE at different SNRs

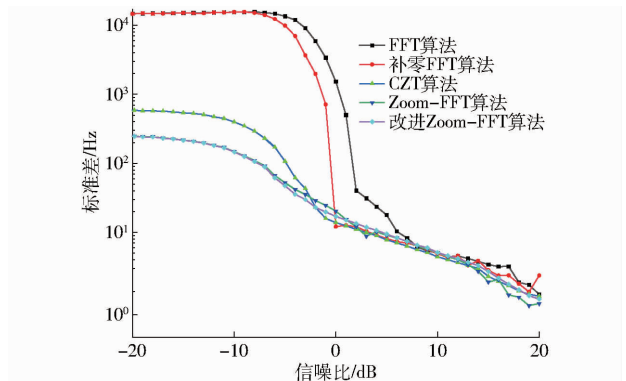


图 6 不同信噪比下频率估计的标准差变化曲线

Fig. 6 Standard deviation at different SNRs

从图 5 可看出,当信噪比较低(<0 dB)时,各种算法的均方根误差差异较大,其中 FFT 算法和补零 FFT 算法误差较大,CZT 算法误差大于 Zoom-FFT 算法,本文改进 Zoom-FFT 算法具有最优的估计精度。当信噪比大于 0 dB 时,FFT 算法、补零 FFT 算法和 Zoom-FFT 算法因受到栅栏效应的影响逐渐趋于稳定,而本文改进 Zoom-FFT 算法解决了 FFT 类算法的栅栏效应问题,不受栅栏效应的影响。整体上来看改进 Zoom-FFT 算法的均方根误差均优于其他算法。

图 6 反映了不同信噪比下各算法频率估计的稳定性。从结果可以看出,在低信噪比情况下,FFT 算法和补零 FFT 算法的标准差远高于其他算法,说明这两种算法的频率估计结果波动较大;CZT 算法、Zoom-FFT 算法波动较小;本文改进 Zoom-FFT 算法波动最小,具有更强的稳定性。

不同信噪比下的性能比较表明,改进 Zoom-FFT 算法在不同信噪比下保持着良好的稳定性,同时显著降低了栅栏效应带来的影响,提高了测距精度。

3.2 不同频率下的算法性能

为了评估本文所提出的改进 Zoom-FFT 算法在不同频率时的性能,在信噪比不变的情况下,设计了仿真实验。实验中,设定采样点数保持不变,并将仿真信号的频率从 1 950 Hz 开始,以 1 Hz 为步长逐步递增至 2 050 Hz。通过此次仿真,可以分析不同算法在不同信号频率下的估计精度和稳定性,信噪比为 1 dB 时仿真结果如图 7、8 所示。

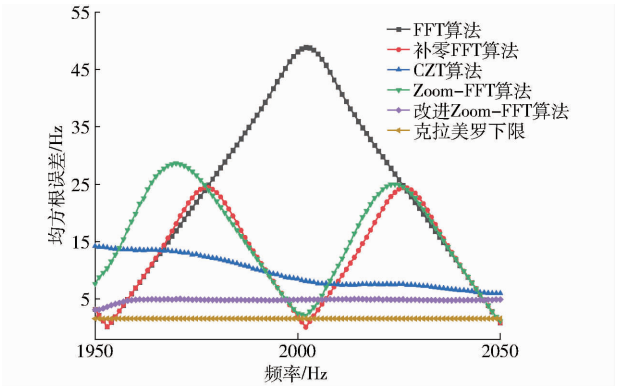


图 7 不同频率下频率估计的均方根误差变化曲线
Fig. 7 RMSE at different frequencies

从图 7 和图 8 中可以看出,FFT 算法、补零 FFT 算法、Zoom-FFT 算法在信号逐渐增大时,其频率估计的均方根误差与标准差都呈现出周期性变化,而 CZT 算法与改进 Zoom-FFT 算法则未出现规律性波动,但改进 Zoom-FFT 算法在精度上优于 CZT 算法。整体上,改进 Zoom-FFT 算法的均方根误差相

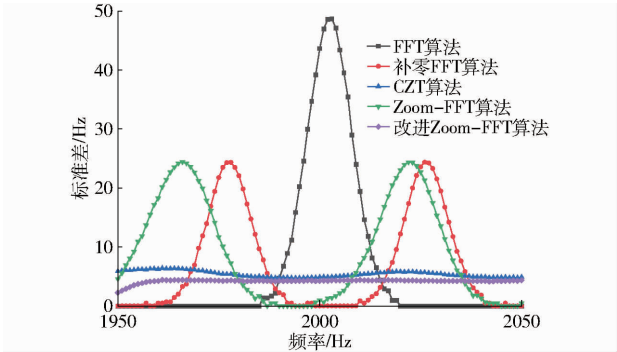


图 8 不同频率下频率估计的标准差变化曲线
Fig. 8 Standard deviation at different frequencies

较于其他算法都更加趋近于 CRLB,意味着改进 Zoom-FFT 算法频率估计的精度受频率变化的影响较小,且改进 Zoom-FFT 算法的标准差 SD 优于其他算法,意味着其稳定性也更好。

不同频率时的算法性能比较表明,改进 Zoom-FFT 算法在精度和稳定性上整体优于其他 FFT 类算法及 CZT 算法。改进 Zoom-FFT 算法在整个频率范围内表现稳定,能够有效降低均方根误差和标准差,表现最佳,具有良好的估计精度和稳定性。

4 实验

以 ZD850 型六旋翼无人机为载体搭建无人机仿地飞行实验平台,其主要组成为:ZD850 型无人机、Jetson Xavier NX 机载控制器和 IWR1642 毫米波雷达。

以英伟达 Jetson Xavier NX 控制器作为无人机的数据处理中心,执行毫米波雷达高度测量算法及仿地飞行程序等。实验中,该 IWR1642 单芯片 FMCW 毫米波雷达传感器工作于 76~81 GHz 频带,带宽 4 GHz、调频周期 2 ms、采样频率 1~10 MHz、采样点数 256、飞行速度 1~10 m/s,在白天、夜晚、大雾共 3 类环境下进行测试。

4.1 测高实验

为了验证无人机仿地飞行过程中改进 Zoom-FFT 算法的测高精度,以及仿地飞行系统整体的有效性与稳定性,设计了一系列实验以评估不同算法在多种环境条件下的测距表现。实验主要针对 FFT 算法、Zoom-FFT 算法以及本文改进的 Zoom-FFT 算法进行对比分析,重点考察其在不同高度、不同光照及天气条件下的测量误差及抗干扰能力。

4.1.1 自稳测高实验

分别在白天强光、夜晚和大雾 3 种环境下,使用毫米波雷达对设定的 6 个不同高度目标(1.5、1.7、1.9、2.1、2.3、2.5 m)进行测距。实验场景如图 9 所示,结果如表 1~3 所示。



图 9 实验场景

Fig.9 Experimental setup

表 1 毫米波雷达白天测高结果

Tab.1 Altimetry results under daytime conditions

mm			
距离/mm	FFT 误差	Zoom-FFT 误差	本文算法 误差
1 486	-20.97	9.55	0.90
1 705	4.20	4.20	0.03
1 968	-14.62	-14.62	-0.90
2 158	39.55	9.03	-2.80
2 285	34.63	4.11	-1.62
2 524	39.80	9.28	2.25

表 2 毫米波雷达夜晚测高结果

Tab.2 Altimetry results under nighttime conditions

mm			
距离/mm	FFT 误差	Zoom-FFT 误差	本文算法 误差
1 526	-60.17	0.07	0.68
1 725	-15.80	14.72	0.02
1 932	21.38	-9.15	1.23
2 098	-22.54	7.98	-1.08
2 312	7.63	7.63	-0.50
2 504	59.80	-1.24	2.59

表 3 毫米波雷达大雾测高结果

Tab.3 Altimetry results in foggy environment

mm			
距离/mm	FFT 误差	Zoom-FFT 误差	本文算法 误差
1 460	5.03	5.03	-0.32
1 684	25.20	-5.32	0.34
1 896	57.38	-3.67	2.13
2 042	33.46	2.93	0.55
2 318	1.63	1.63	-0.11
2 486	-44.28	-13.76	0.17

表 1~3 表明,在各种环境中,本文改进 Zoom-FFT 算法的最大测距误差从 Zoom-FFT 的 14.72 mm 精确到 2.8 mm,实现了毫米级精度。

采用均方根误差和平均绝对误差 (Mean absolute error, MAE) 作为测量精度和稳定性的评价指标。RMSE 数值越小,说明整体测量误差越小,测距精度越高;MAE 反映了算法计算值与真实值之间的平均偏差,数值越小说明测量误差越小,测量精度越高。重复 5 组自稳测高实验,各方法的 RMSE 和 MAE 结果如表 4~6 所示。

表 4 白天环境下的 RMSE 与 MAE 比较

Tab.4 RMSE and MAE under daytime conditions

mm		
算法	RMSE	MAE
FFT	23.84	19.60
Zoom-FFT	14.85	12.07
本文算法	3.23	2.73

表 5 夜晚环境下的 RMSE 与 MAE 比较

Tab.5 RMSE and MAE under nighttime conditions

mm		
算法	RMSE	MAE
FFT	30.92	25.48
Zoom-FFT	17.30	14.42
本文算法	3.79	3.17

表 6 大雾环境下的 RMSE 与 MAE 比较

Tab.6 RMSE and MAE in foggy environment

mm		
算法	RMSE	MAE
FFT	26.75	22.01
Zoom-FFT	16.30	13.58
本文算法	2.11	1.85

表 4~6 表明,改进 Zoom-FFT 算法相较于 FFT 算法和 Zoom-FFT 算法,能在不同环境下提供更高的测距精度和更稳定的测高性能。特别是在大雾环境下, RMSE 为 2.11 mm, MAE 仅为 1.85 mm, 远优于 Zoom-FFT 算法的 16.30 mm 和 13.58 mm, 展现出优异的抗干扰能力,验证了其在无人机仿地飞行中的可行性。在不同环境中均表现出了较高的精度和较强的稳定性。

4.1.2 飞行测高实验

为了进一步验证改进 Zoom-FFT 算法在无人机仿地飞行过程中的实时测高性能与稳定性,本文设计了飞行中的动态测高实验,无人机以 2 m 的设定高度沿预定路线进行仿地飞行, FFT、Zoom-FFT 及本文改进 Zoom-FFT 算法的结果如图 10 和表 7 所示。

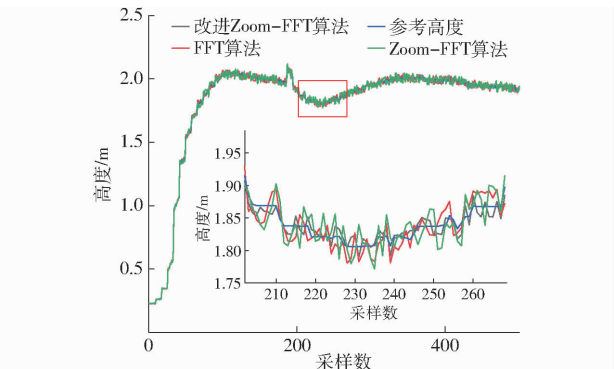


图 10 仿地飞行实验结果

Fig.10 Terrain-following flight test

表 7 仿地飞行的 RMSE 与 MAE

Tab.7 RMSE and MAE for terrain-following flight

mm		
算法	RMSE	MAE
FFT	21.8	18.4
Zoom - FFT	15.7	13.3
本文算法	10.3	8.7

从表 7 可知,改进 Zoom - FFT 算法的 MAE 和 RMSE 最小,分别从 Zoom - FFT 算法的 13.3 mm 和 15.7 mm,降低到 8.7 mm 和 10.3 mm,表明其测量误差最小、稳定性好,能更准确反映飞行高度的变化。

4.2 坡度检测实验

坡度环境是植保无人机仿地飞行时的典型场景,为了验证本文所提方法的坡度测量精度,设计了无人机悬停状态下的坡度检测实验和无人机飞行状态下的坡度检测实验。

本文采用两个毫米波雷达来测量地形坡度。其中对地雷达测量高度为 h_1 ,前置雷达测量的高度为 h_2 ,前置雷达和对地雷达的安装角度为 α ,对地雷达法线与地形之间的夹角为 γ ,地形坡度为 β 。无人机测量上坡和下坡模型示意图如图 11、12 所示。

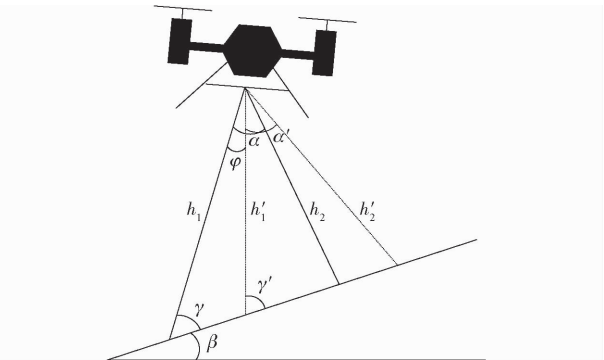


图 11 动态上坡检测示意图

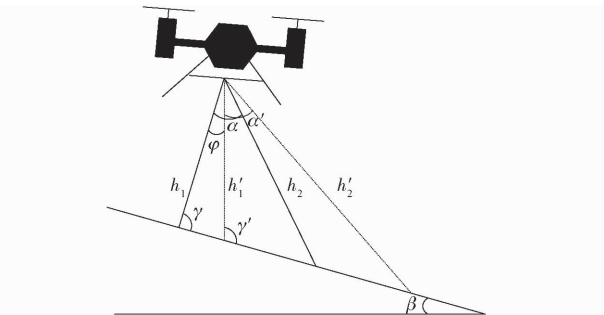


图 12 动态下坡检测示意图

Fig. 11 Schematic of dynamic uphill detection

Fig. 12 Schematic of dynamic downhill detection

对地雷达法线和地形之间的夹角为

$$\gamma = \arccos \frac{h_1 - h_2 \cos \alpha}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2 - 2h_1h_2 \cos \alpha}}$$

(21)

若 $\gamma < 90^\circ$,则无人机处于上坡,对应地形坡度 β 为

$$\beta = 90^\circ - \gamma$$

(22)

若 $\gamma > 90^\circ$,则无人机处于下坡,对应地形坡度 β 为

$$\beta = \gamma - 90^\circ$$

(23)

无人机在坡度环境飞行时,会存在俯仰角 φ ,导致对地雷达和前置雷达测量的无人机对地高度和前置对地距离与实际值之间存在偏差。如图 11、12 所示, h_1' 和 h_2' 为毫米波雷达理论测量高度值。

可知,实际坡度角 γ' 为

$$\gamma' = \gamma + \varphi$$

(24)

4.2.1 自稳坡度检测实验

为了验证多毫米波雷达在静态环境下的坡度检测能力,将无人机悬停于距离地面 1.5 m 的高度,并利用毫米波雷达分别对坡度为 15° 、 20° 、 25° 和 30° 的坡地进行测量。实验场景如图 13 所示,实验结果如表 8 所示。



图 13 坡度检测实验场景

Fig. 13 Slope detection experiment setup

表 8 自稳地形坡度检测误差

Tab.8 Detection error for self-stabilizing terrain

(°)			
坡度/ (°)	FFT 误差	Zoom - FFT 误差	本文算法 误差
15	-1.81	-0.57	-0.13
20	1.38	-0.76	-0.39
25	1.36	0.04	0.54
30	1.99	-0.89	-0.15

改进 Zoom - FFT 算法在自稳坡度检测中的最大误差为 0.54° ,远优于 FFT 和 Zoom - FFT 算法的 1.99° 和 -0.89° ,其表现出更高的准确性,其测量值在所有坡度条件下均最接近真实值,尤其是在 15° 和 30° 坡度测量中表现尤为突出,误差仅为 -0.13° 和 -0.15° ,同时也验证了多毫米波雷达坡度测量的有效性。

4.2.2 飞行坡度检测实验

为了进一步验证毫米波雷达在动态环境下的坡度检测能力,在无人机处于飞行状态时进行测试,无

人机以 2 m 的飞行高度匀速向前飞行,实验测量结果如表 9 所示。

表 9 飞行地形坡度检测误差
Tab.9 Error in flight terrain slope detection (°)

坡度/(°)	FFT	Zoom-FFT	本文算法
	误差	误差	误差
15	2.34	1.72	1.24
20	-2.14	-1.13	-0.98
25	2.80	1.85	1.14
30	2.16	1.52	1.23

表 9 表明,无人机飞行过程中,在受到气流扰动和自身电机带来的振动情况下,改进 Zoom-FFT 算法解算的地形坡度精度最大误差仅为 1.24°,优于 FFT 和 Zoom-FFT 算法的 2.80°和 1.85°,测量精度提高了 33% 以上,验证了毫米波雷达在无人机复杂地形飞行中的应用价值。

4.3 算法复杂度与实时性分析

本文改进 Zoom-FFT 算法的计算复杂度约 0.24 ms/f,与传统 Zoom-FFT 算法相当,为传统 FFT 的近 2 倍,但相比达到相同频率分辨率的传统 FFT,降低了 80% 以上的运算量。在主流嵌入式平台(XAVIER NX、STM32H7、TMS320C6748)上单帧处理时间小于 0.3 ms,可支持高达 2 000 Hz 的更新率,远超无人机仿地飞行 50 Hz 的实际需求。该算法在保证高精度测量的同时,具备良好的实时性和低资源占用,适合部署于各类机载计算平台,具有明确的工程应用价值。

5 结论

(1)通过建立误差模型系统分析了影响 Zoom-FFT 算法频率估计精度的关键因素,提出了一种基于频率修正的改进 Zoom-FFT 频率估计方法,有效解决了“栅栏效应”导致的测量偏差。该方法在中高信噪比区域优势明显,并且对信号频率的变化不敏感,在整个测试频率范围内均能保持高精度和稳定性能。

(2)通过系统仿真与实验验证,本方法展现出以下显著优势。精度高、性能优:在不同信噪比和频率条件下,其频率估计的均方根误差和标准差均优于 FFT、补零 FFT、CZT 及传统 Zoom-FFT 等方法,性能更接近理论极限(克拉美罗下限);实用性强:在真实的 FMCW 毫米波雷达无人机测高实验中,成功降低了测距误差,提高了坡度测量精度,有力证明了其在实际工程中的应用价值与有效性。

(3)本文改进 Zoom-FFT 算法可部署于主流无人机飞控/雷达一体化平台,如 STM32H7、TMS320C6748、NXP RT 系列等,实时性良好;在 IWR1642 毫米波雷达平台上表现出良好的适用性,能够适应典型的雷达参数配置(雷达带宽大于等于 500 MHz、调频周期 0.5~2 ms、采样点数 N 为 256~512、采样频率 f_s 为 1~12 MHz、飞行高度 1~30 m)和复杂飞行环境。

(4)本文算法对信噪比变化、动态目标和多路径效应的敏感性总体可控,计算复杂度满足实时性要求。

参 考 文 献

[1] 董建华,宫程翔,刘小刚,等. 基于无人机多光谱遥感的食用玫瑰土壤含水率反演模型[J]. 农业机械学报,2026,57(6): 215-226.
Dong Jianhua, Gong Chengxiang, Liu Xiaogang, et al. Soil moisture content inversion model of edible roses based on UAV multispectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(6):215-226. (in Chinese)

[2] 崔利华,张梦飞,李凭阳,等. 基于无人机遥感的夏玉米农田土壤呼吸速率估算方法[J]. 农业机械学报,2026,57(4): 287-295,326.
Cui Lihua,Zhang Mengfei,Li Pingyang, et al. Estimation method of soil respiration rate in summer maize farmland based on UAV remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(4):287-295,326. (in Chinese)

[3] 龙拥兵,李坤,刘丹丹,等. 基于无人机遥感图像的水稻稻穗识别与估产方法研究[J]. 农业机械学报,2026,57(3):109-118.
Long Yongbing, Li Kun,Liu Dandan,et al. Rice panicle recognition and yield estimation based on UAV remote sensing images [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(3):109-118. (in Chinese)

[4] 王娟,高振,王树昌,等. 香蕉冠层结构特征下无人机施药雾滴沉积规律研究[J]. 农业机械学报,2026,57(3):153-163.
Wang Juan,Gao Zhen, Wang Shuchang,et al. Deposition law of UAV spraying droplets under canopy structural characteristics of banana[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(3):153-163. (in Chinese)

[5] 吴开华,孙学超,张竞成,等. 基于高度融合的植保无人机仿地飞行方法研究[J]. 农业机械学报,2018,49(6):17-23.
Wu Kaihua, Sun Xuechao, Zhang Jingcheng, et al. Terrain following method of plant protection UAV based on height fusion

- [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(6):17–23. (in Chinese)
- [6] 臧英,吴海添,周志艳,等. 植保无人机仿地定高飞行控制技术的应用现状及展望[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(2): 250–256.
- Zang Ying, Wu Haitian, Zhou Zhiyan, et al. Terrain following technology of unmanned aerial vehicle for plant protection: a review[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(2): 250–256. (in Chinese)
- [7] Bhattarai A, Scarpin G J, Jakhar A, et al. Optimizing unmanned aerial vehicle LiDAR data collection in cotton through flight settings and data processing[J]. Remote Sensing, 2025, 17(9):1524.
- [8] 沈跃,张念,孙志伟,等. 基于多速率卡尔曼滤波的植保无人机仿地飞行方法[J]. 农业机械学报,2023,54(3):190–197.
- Shen Yue, Zhang Nian, Sun Zhiwei, et al. Terrain following flight for plant protection UAV based on multi-rate Kalman filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(3):190–197. (in Chinese)
- [9] 王大帅,刘晓光,李伟,等. 基于多传感器融合的无人机精准自主飞行控制方法[J]. 农业机械学报,2019,50(12):98–106.
- Wang Dashuai, Liu Xiaoguang, Li Wei, et al. Precision autonomous flight control method of UAV based on multi-sensor integration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(12):98–106. (in Chinese)
- [10] He J, Terashima S, Yamada H, et al. Diffraction signal based human recognition in non-line-of-sight (NLOS) situation for millimeter wave radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2021,14: 4370–4380.
- [11] Awan M A, Dalveren Y, Kara A, et al. Towards mmWave altimetry for UAS: exploring the potential of 77 GHz automotive radars[J]. Drones, 2024, 8(3):94.
- [12] Awan M A, Dalveren Y, Kara A, et al. Advancing mmWave altimetry for unmanned aerial systems: a signal processing framework for optimized waveform design[J]. Drones, 2024, 8(9): 440.
- [13] Javanbakht N, Faraki-dana R, Loyez S, et al. The role of millimeter-waves in the distance measurement accuracy of an FMCW radar sensor[J]. Sensors, 2019, 19(18): 3938.
- [14] Piotrowsky L, Jaeschke T, Kueppers S, et al. Enabling high accuracy distance measurements with FMCW radar sensors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(12): 5360–5371.
- [15] Wang K, Wang L, Yan B, et al. Efficient frequency estimation algorithm based on chirp-Z transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2022,70:5724–5737.
- [16] Wang J L, Ma Y. An improved Rife algorithm for frequency estimation of sinusoidal signal under low SNR conditions[C] // Proceedings of the 6th International Conference on Information Communication and Signal Processing(ICICSP),2023:1163–1167.
- [17] Chang H Y, Chen Y Y, Chung W H. Two-stage zoom FFT-enhanced deep learning-aided weighted scheme for wireless vital sign estimation using mmWave FMCW radar[J]. IEEE Sensors Letters, 2024,8(7):1–4.
- [18] Park J H, Park J K, Jeong J H, et al. Detection and feature extraction of small UASs using adaptive hybrid CW radar with hybrid zoom FFT[J]. Measurement, 2025,253(Pt. C):11755–11767.
- [19] Zhang L, Zhang Y, Su Y, et al. A new method for improving time and frequency resolution of passive receiving radar system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024,20(11):13416–13428.
- [20] Sanjeeva N, Kim W H. Design and performance analysis of Zoom – FFT based FMCW radar level meter[J]. Journal of Satellite, Information and Communications, 2014, 9(2): 38–44.