



研究与开发

面向FMCW毫米波雷达的Macleod-CZT 高精度距离估计算法

卢云峰¹, 张远辉¹, 陈邵靖¹, 郑超群¹, 黄志恒²

(1. 中国计量大学机电工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 杭州岸达科技有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要: 在毫米波雷达系统中, 近距离高精度测距是一项关键技术。然而, 现有高精度测距算法计算复杂度较高, 难以在资源受限的嵌入式平台上有效部署。为此, 提出一种融合 Macleod 插值与 Chirp-Z 变换 (Chirp-Z transform, CZT) 的 Macleod-CZT (MCZT) 距离估计算法。该算法采用“粗估-细化-精插”三级级联结构, 通过融合 Macleod 的插值修正与 CZT 的频域细化能力, 有效抑制离散采样引起的栅栏效应。在 ADT6101P 雷达系统上的实测结果表明: 在低变换点数 ($M=32$) 配置下, MCZT 算法在低信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 与非整数频点等复杂条件下表现出更优的测距精度。在未引入明显额外计算负荷的前提下, MCZT 算法的实测误差可稳定控制在 20 mm 以内, 为资源受限的毫米波雷达系统提供了一种高效、实用的测距方案。

关键词: 毫米波雷达; Macleod 算法; Chirp-Z 变换; 频率估计

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX250655

Macleod-CZT high-precision range estimation algorithm for FMCW millimeter-wave radar

Lu Yunfeng¹, Zhang Yuanhui¹, Chen Shaojing¹, Zheng Chaoqun¹, Huang Zhiheng²

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

2. Andar Technologies Co., Ltd, Hangzhou 310018, China

Abstract: High-precision close-range measurement is identified as a critical technology in millimeter-wave radar systems. However, existing high-precision ranging algorithms are hampered by high computational complexity, which made them difficult to deploy effectively on resource-constrained embedded platforms. To address this, a Macleod-CZT(MCZT) range estimation algorithm integrating Macleod interpolation and the Chirp-Z transform (CZT) was proposed. A three-stage cascaded structure consisting of "coarse estimation - refinement - fine interpolation" was ad-

收稿日期: 2025-11-07; 修回日期: 2026-01-15

通信作者: 张远辉, zyh@cjlz.edu.cn

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY19F010007)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY19F010007)



opted by the algorithm. By combining the interpolation correction of the Macleod method with the frequency-domain refinement capability of the CZT, the picket fence effect caused by discrete sampling was effectively suppressed. It was demonstrated by experimental results on the ADT6101P radar system that under a low transform-point configuration ($M=32$), superior ranging accuracy was exhibited by the MCZT algorithm under complex conditions such as low signal-to-noise ratios (SNR) and non-integer frequency bins. Without introducing significant additional computational load, the measured error was found to be stably controlled within 20 mm. This scheme provides a high-efficiency and practical ranging solution for resource-constrained millimeter-wave radar systems.

Key words: millimeter-wave radar, Macleod algorithm, Chirp-Z transform, frequency estimation

0 引言

随着毫米波雷达在自动驾驶^[1]、智慧医疗^[2-3]和人员识别^[4-5]等领域的广泛应用,系统对测距精度与实时性的要求不断提高。频率调制连续波(frequency-modulated continuous wave, FMCW)雷达凭借其高距离分辨率^[6]、结构简单和适应性强等优势,已成为主流雷达架构之一。FMCW雷达通过将发射信号与目标反射回波混频得到差拍信号,从而获取目标的距离和速度信息。然而,实际采集的信号不可避免地受到噪声污染,导致采用离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)直接进行频率估计时误差较大,这限制了测距的最终精度。因此,在DFT频谱的基础上开展高精度的频率估计,是实现FMCW雷达高精度测距的关键^[7-8]。

目前,主流的高精度频率估计方法可分为时域和频域两大类。极大似然^[9]、多信号分类^[10]和自回归^[11]等时域方法虽能达到较高的估计精度,但其计算复杂度高且对噪声敏感,难以在嵌入式系统中实时部署。相比之下,以快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)为基础的频域方法,因其计算量小、速度快而被广泛采用。现有频率细化算法主要分为插值法与邻域谱细化法两类。其中, Rife^[12-13]、Quinn^[14]、Macleod^[15]等修正算法^[16-17],通过对FFT主瓣内若干谱线进行数学插值来逼近真实频率。这些算法虽具备计算高效的优点,但其性能易受频谱泄露^[18]和栅栏效

应^[19]的影响,在低信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)条件下其估计精度下降尤为明显。针对传统DFT插值在低信噪比、样本数受限时精度显著下降的问题, Wang等^[20]提出了融合频率偏差方向检测器的双样本插值方案。该方案通过精准识别插值方向,有效减少噪声对估计结果的干扰。Jia等^[21]提出了一种基于频谱细化与相位角插值的改进算法,通过提升局部频率分辨率增强了系统在噪声环境下的稳健性。

为突破插值法的精度瓶颈,邻域谱细化法凭借局部频谱高分辨率的特性受到广泛关注,零填充法^[22]和Chirp-Z变换(Chirp-Z transform, CZT)^[23-24]是其中的典型代表。Meng等^[25]提出了一种基于Rife修正因子的CZT测距方法, Xu等^[26]通过构造偏差校正因子对CZT的栅栏效应误差进行补偿。然而,现有CZT算法仍面临精度与效率的平衡难题:标准CZT算法的精度与变换点数密切相关,高变换点数带来的巨大计算负荷限制了其在嵌入式平台上的应用。

为此,本文提出了一种Macleod-CZT(MCZT)融合算法,该算法巧妙地结合了Macleod算法在低计算资源下的快速粗估优势和CZT在局部频谱精估中的高精度优势。实验结果表明,在低变换点数($M=32$)的情况下,MCZT算法实现了测距精度的显著提升,有效降低了栅栏效应的影响,为资源受限的嵌入式FMCW雷达系统提供了一种兼顾实时性与高精度的实用测距方案。

1 测距算法

1.1 测距原理及信号模型

FMCW 雷达通过发射线性调频信号并处理回波来实现距离测量。在一个理想的静止单目标场景下, 雷达接收的回波信号可以视为发射信号经过一个固定时延后的版本。将发射信号与回波信号进行混频, 再通过低通滤波器, 即可得到包含目标距离信息的拍频信号 $s(t)$, 其简化归一化表达式为: $s(t) = \exp(j(2\pi f_r t + \phi_r))$, 其中 $f_r = \frac{Bt_d}{T}$ 、 $\phi_r = 2\pi f_0 t_d$ 分别为拍频信号的频率和相位。 $s(t)$ 可进一步表示为:

$$s(t) = \exp\left(j\left(2\pi B t_d \frac{t}{T} + 2\pi f_0 t_d\right)\right) \quad (1)$$

其中, T 为扫频重复周期, B 为扫频带宽, f_0 为发射信号的初始扫频频率, t_d 为接收信号与发射信号之间的时延。

若目标与雷达间的距离为 R , 电磁波传播速度为 c , 则 t_d 可表示为:

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad (2)$$

对 $s(t)$ 进行傅里叶变换, 可得到其频谱函数 $S(f)$:

$$S(f) = \frac{\sin\left(\pi T(f - B t_d/T)\right)}{\pi(f - B t_d/T)} e^{-j\theta} \quad (3)$$

其中, θ 为由系统参数决定的初始相位项。

理论上, $S(f)$ 的频谱模值峰值将出现在频率 $f_r = B t_d/T$ 处。结合表达式 (2), 目标频率 f_b 与距离 R 的映射关系可表示为:

$$f_b = \frac{2BR}{cT} \quad (4)$$

由此可得, R 可表示为:

$$R = \frac{cTf_b}{2B} \quad (5)$$

1.2 Macleod 算法

Macleod 算法是一种基于二次函数插值的高

效频率估计算法。其核心思想基于一个假设: 当信号频率落在两个离散 FFT 频率点之间时, 其真实频谱主瓣的峰值附近可以用一个抛物线进行近似。因此, 通过对 FFT 频谱中幅度最大点及其相邻点进行抛物线拟合, 可以更精确地定位频谱的真实峰值。

该算法首先对信号进行 FFT, 并找到频谱 $X(k)$ 中的最大幅值点, 其索引记为 $k_{\max}$, 其左右相邻点分别为 $X(k_{\max} - 1)$ 和 $X(k_{\max} + 1)$ 。记这 3 个点的功率幅值分别为:

$$\alpha = |X(k_{\max} - 1)|^2, \quad \beta = |X(k_{\max})|^2, \quad \gamma = |X(k_{\max} + 1)|^2 \quad (6)$$

基于这 3 个点, Macleod 算法推导出真实频率相对于谱峰点 k 的归一化偏移量 δ 的估计式, 可表示为:

$$\delta = \frac{\alpha - \gamma}{2(\alpha - 2\beta + \gamma)} \quad (7)$$

经过修正的频率估计值表示为:

$$f_{\text{Macleod}} = (k_{\max} + \delta) \cdot \frac{f_s}{N} \quad (8)$$

其中, f_s 为采样率, N 为每个 Chirp 的采样点数。

Macleod 算法的主要优势在于其极低的计算复杂度, 仅需提取 FFT 频谱中的 3 个谱线点进行插值计算。然而, 该算法的精度高度依赖于谱峰的对称性。在低信噪比条件下, 噪声会破坏谱峰的抛物线形状; 同时, 当真实频率靠近 FFT 频率点的边界时, 频谱泄露也会导致谱峰不对称, 这些情况都会显著增大 Macleod 算法的估计误差。

1.3 Chirp-Z 算法

CZT 是离散傅里叶变换的一种推广形式。与 DFT 仅在单位圆上等间隔采样不同, CZT 算法允许在 Z 平面上沿任意螺旋路径进行采样, 从而能够对任意指定频段进行高分辨率频谱分析。

对于一个采样点数为 N , 采样频率为 f_s 的信号 $s(t)$ 进行离散采样。采样后的离散序列为:

$$s(n) = \exp\left(j\left(2\pi t_d\left(B \frac{n}{N} + f_0\right)\right)\right), \quad 0 \leq n < N \quad (9)$$



对该离散序列进行FFT变换。通过搜索频谱中的最大值,可以得到峰值频率 f_{FFT} 及其对应bin编号 k_{max} ,为后续的精确定位提供了快速定位。

在应用CZT算法中,CZT在Z平面上沿螺旋路径 z_k 采样,可通过式(10)表示:

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n)z_k^{-n} = \sum_{n=0}^{N-1} s(n)A^{-n}W^{nk}, \quad 0 \leq k < M \quad (10)$$

其中, M 是CZT的变换点数。 z_k 可以表示为:

$$z_k = AW^{-k} \quad (11)$$

其中, A 为复起点, W 为相邻采样点之间的间隔。 A 和 W 可以表示为:

$$A = A_0 e^{j\theta_0} \quad (12)$$

$$W = W_0 e^{-j\phi_0} \quad (13)$$

细化范围记为:

$$B_{\text{CZT}} = \Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (14)$$

CZT算法的起始频率为:

$$f_1 = f_{\text{FFT}} - \frac{B_{\text{CZT}}}{2} = k_{\text{max}} \Delta f - \frac{B_{\text{CZT}}}{2} \quad (15)$$

以FFT频谱中搜索得到的峰值 f_{FFT} 为中心,在其两侧 $\pm B_{\text{CZT}}/2$ 范围内进行频谱精细化。由于变换点数是 M ,因此插值频率点可以表示为:

$$f = f_1 + B_{\text{CZT}} \frac{k}{M}, \quad k = 0, 1, \dots, M \quad (16)$$

在这种情况下,起始点 A 、相邻点之间的间隔 W 可分别表示为:

$$A = \exp \left(j2\pi \frac{f_1}{f_s} \right) \quad (17)$$

$$W = \exp \left(-j2\pi \frac{B_{\text{CZT}}}{Mf_s} \right) \quad (18)$$

将式(17)和式(18)代入式(10),则 $s(n)$ 的离散谱可重组为:

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp \left(-j2\pi \frac{f_1}{f_s} n \right) \cdot \exp \left(-j2\pi \frac{B_{\text{CZT}}}{Kf_s} nk \right) \quad (19)$$

在变换得到离散频谱后,就可以得到谱峰所在的最大值 f_{CZT} 及其对应的编号索引。

CZT算法的性能优势主要体现在其可控的频率分辨率上。根据式(18),在频谱分析的总带宽 B_{CZT} 相同的情况下,其分辨率与变换点数成正比。然而,根据式(10),该算法的计算复杂度与变换点数 M 及信号长度 N 均呈正相关。因此,精度增益是以计算资源的消耗为代价的。对于资源受限且实时性要求严苛的嵌入式雷达系统,CZT算法面临核心问题:如何选取合适的 M 值,以在算法精度与执行效率之间取得最佳平衡。

2 算法改进及性能分析

2.1 MCZT算法

MCZT算法的核心逻辑在于将Macleod算法的高精度插值优势与CZT的频域局部细化能力深度融合。采用“粗估-细化-精插”三级级联结构,通过在粗估频段内实现局部频谱加密及插值补偿,从而获得更高的频率估计精度。

MCZT算法的主要流程如下:首先,利用FFT对信号进行初步的频谱分析,找到幅度最大的谱线位置,获得初始频率估计值。随后,以该粗估计频率为中心设定一个较窄的分析带宽,并在此带宽内利用CZT进行高分辨率的频谱细化。然而,CZT输出仍为离散频谱,目标的真实频率峰值仍可能落在CZT输出的离散频点之间。为此,在CZT细化谱上再次应用Macleod算法,通过对主瓣邻近谱线进行二次插值计算,进一步逼近真实频率。

MCZT算法的处理流程如图1所示(左侧部分)。为了便于比较,该流程图中还包含了CZT算法的核心步骤(右侧部分),以清晰地展示二者之间的区别。总体而言,该算法包括5个关键步骤,具体如下。

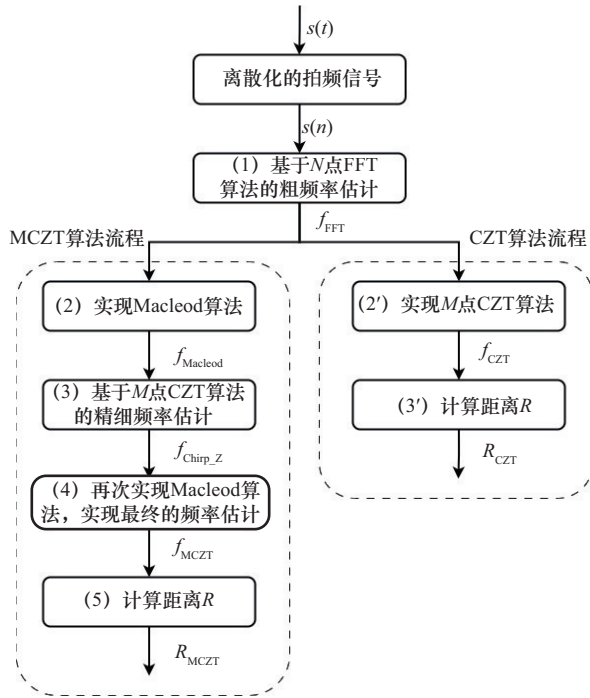


图1 算法流程

步骤1 粗频率定位：对离散化的拍频信号计算 N 点 FFT，找到离散频谱中幅度最大值的位置，得到频率粗估计值 f_{FFT} 及对应的 bin 编号 k_0 。

步骤2 首次频率校正：将第 k_0 个频点及其左右相邻谱线的幅度值代入式 (7)，使用 Macleod 插值法，通过幅度比值计算谱峰相对 bin 的偏移量 δ_{Macleod} ，从而得到第一次校正后的频率估计值 f_{Macleod} 。

步骤3 频带细化：以 f_{Macleod} 为中心，设定 CZT 的细化带宽，并在 $[f_{\text{Macleod}} - \frac{B_{\text{CZT}}}{2}, f_{\text{Macleod}} + \frac{B_{\text{CZT}}}{2}]$ 范围内根据式 (19) 进行 M 点 CZT 采样，得到细化后的离散谱 $X(z_k)$ 。搜索 $|X(z_k)|$ 的最大值，得到细化频率估计值 $f_{\text{Chirp-Z}}$ 。

步骤4 二次频率估计：以 $f_{\text{Chirp-Z}}$ 为中心，取其左右相邻的 CZT 细化谱线，再次使用 Macleod 插值法进行精确插值计算，得到最终的高精度频率估计值 f_{MCZT} 。

步骤5 距离解算：将最终的 f_{MCZT} 代入式 (5)，

计算目标距离 R 。

2.2 算法时间复杂度

为量化比较不同频率估计算法的计算开销，本节从时间复杂度的角度对 FFT、Macleod、Rife、标准 CZT 以及本文提出的 MCZT 算法进行了理论分析。5 种算法的时间复杂度见表 1。

表1 5种算法的时间复杂度

算法	频率分辨率	复杂度
FFT	$\Delta f_1 = \frac{f_s}{N}$	$\mathcal{O}(N \lg N)$
Macleod	$\Delta f_2 = \frac{f_s}{N}$	$\mathcal{O}(N \lg N)$
Rife	$\Delta f_3 = \frac{f_s}{N}$	$\mathcal{O}(N \lg N)$
CZT	$\Delta f_4 = \frac{f_s}{NM}$	$\mathcal{O}(N \lg N) + \mathcal{O}(M \lg M)$
MCZT	$\Delta f_5 = \frac{f_s}{NM}$	$\mathcal{O}(N \lg N) + \mathcal{O}(M \lg M)$

如表 1 所示，Macleod 和 Rife 算法在完成 FFT 之后，仅涉及常数级的运算，因此其额外开销可忽略不计。标准 CZT 与 MCZT 算法的计算复杂度主要由 CZT 决定，因此二者的时间复杂度在同一量级，实际计算量与 CZT 点数 M 和信号长度 N 紧密相关。

2.3 克拉默-拉奥下界

克拉默-拉奥下界 (Cramér-Rao lower bound, CRLB) 表示无偏估计器所能达到的最小方差。本研究利用 CRLB 来估计 FMCW 雷达的测距精度。对于单个复正弦信号的频率估计，根据文献[9]，在频率和相位均未知的情况下，其 CRLB 可表示为：

$$\text{CRLB} = \frac{3f_s^2}{2\pi^2 N^3 \gamma_{\text{SNR}}} \quad (20)$$

式 (20) 刻画了在给定采样率 f_s 、FFT 长度 N 及信噪比 γ_{SNR} 条件下，任何无偏频率估计器所能达到的估计方差下限。此下界是基于 N 个原始采样点所包含的信息量决定的，是所有频率估计算法共同的理论性能极限。



传统的FFT及插值算法,由于受到频谱泄露和栅栏效应的显著影响,其估计均方误差在大多数频点上远高于此CRLB。MCZT算法结合了CZT的局部高分辨率特性和Macleod的二次插值,能有效克服栅栏效应,显著减小由离散频谱分析引入的估计偏差。因此,在相同信噪比下,MCZT的估计性能能够明显优于传统方法,更逼近式(20)所示的理论下界。

3 算法仿真分析

为验证MCZT算法性能,本节在Matlab环境下进行蒙特卡洛仿真,并与传统的FFT、Macleod、Rife及标准CZT算法进行性能比较。仿真参数设置见表2。

表2 仿真参数设置

符号	涵义	取值
f_s	ADC采样率	7.14 MHz
f_0	初始扫频频率	57 GHz
B	扫频带宽	3 GHz
N	FFT点数	256
M	CZT点数	16~512

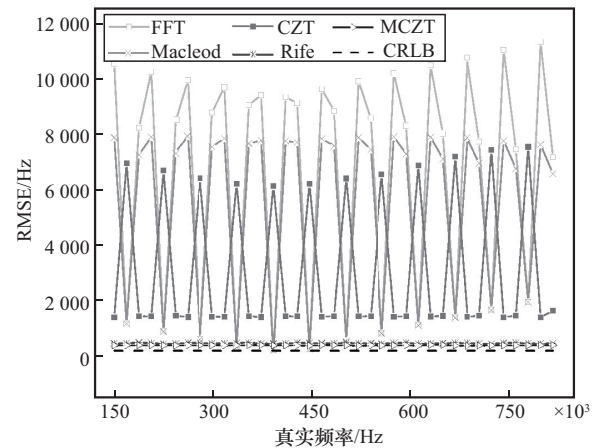
为衡量算法估计误差,本文采用频率估计的均方根误差(root mean square error, RMSE)作为性能指标,其定义如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (f_i - f_{\text{true}})^2} \quad (21)$$

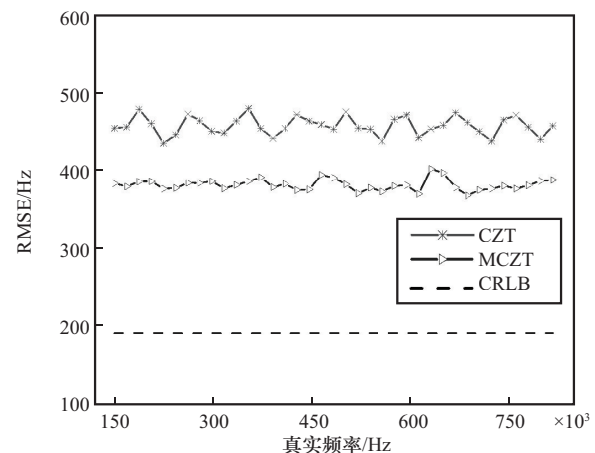
其中, K 表示仿真次数, f_i 表示第 i 次估计频率, f_{true} 表示真实频率。

为全面评估本文所提MCZT算法的性能,本节从不同目标距离、不同SNR以及不同变换点数3个维度,将其与FFT算法、Macleod算法、Rife算法及标准CZT算法进行对比。在SNR=5 dB、 $M=32$ 的条件下,各算法在不同目标距离下的RMSE性能对比如图2所示。由图2可知,FFT、Macleod及Rife算法因栅栏效应呈现显著的周期

性误差波动,引入标准CZT算法后虽有显著改善,但MCZT算法在整个测试区间内保持了最优的精度和稳定性。



(a) 不同算法的总体性能比较



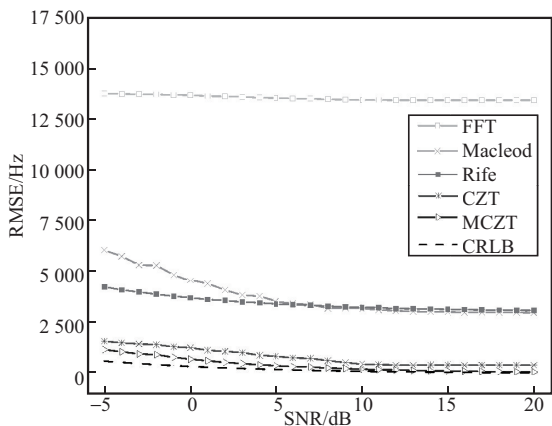
(b) CZT与MCZT算法性能放大对比

图2 各算法在不同目标距离下的RMSE对比

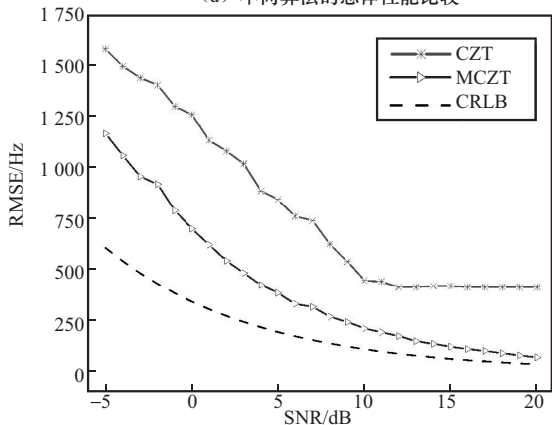
在固定目标频率为628 kHz, $M=32$ 情况下,随着SNR从-5 dB增至20 dB,各算法的RMSE对比如图3所示。图3可显示,随着SNR的增加,所有算法的性能均有不同程度的提高。在所有SNR条件下,MCZT算法的RMSE均为最低,表现出最强的抗噪能力。

在固定目标频率为628 kHz、SNR = 5 dB的条件下,随CZT点数从16增至512,标准CZT算法和MCZT算法的RMSE对比如图4所示。由图4可知,在CZT点数<50的情况下,MCZT算法的性能优势尤为突出;随着CZT点数的增大,两

种算法的RMSE逐渐收敛；当CZT点数增至300左右时，两种算法的误差趋近于一致。



(a) 不同算法的总体性能比较



(b) CZT与MCZT算法性能放大对比

图3 不同信噪比下各算法的RMSE对比

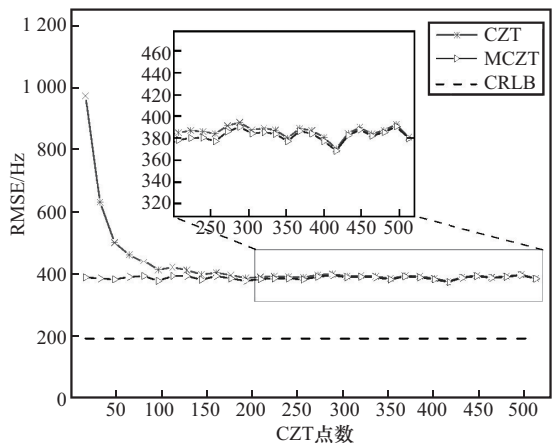


图4 不同CZT点数下标准CZT算法和MCZT算法的RMSE对比

综上所述，不论是在不同距离、不同噪声环境下，还是在低变换点数的情况下，MCZT算法

均表现出最优的综合性能。它能够在保证极低计算复杂度的同时，提供远优于传统方法的测距精度和稳健性，其性能始终最接近CRLB。

4 算法实现及实物验证

为验证所提MCZT算法在实际毫米波雷达系统中的可行性与有效性，本文基于一套实测平台开展了目标距离估计实验。实验环境示意图如图5所示。

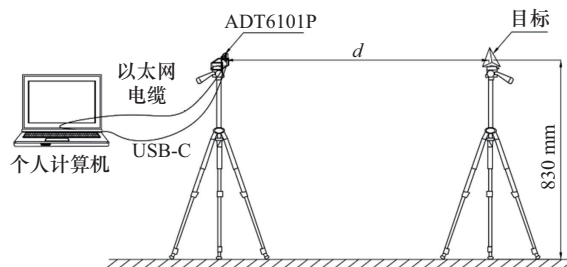


图5 实验环境示意图

实验硬件设备采用杭州 Andar 公司推出的 ADT6101P 60 GHz FMCW 毫米波雷达模块，雷达配备了2个发射天线和2个接收天线，并采用TDM-MIMO (time-division multiplexing multiple-input multiple-output) 工作模式。雷达硬件配置见表3。

表3 雷达硬件配置

符号	涵义	取值
f_s	ADC 采样率	7.14 MHz
f_0	初始扫频频率	57 GHz
B	扫频带宽	3 GHz
T_{ramp}	斜坡结束时间	94 μs
T_{idle}	空闲时间	14 μs
N_{Chirp}	一帧中的Chirp数	32
N_{sample}	一个Chirp中的采样点数	256

雷达前端捕获的原始数据通过用户数据报协议 (user datagram protocol, UDP) 进行实时传输与处理。同时，为了支持离线分析并比较不同参数配置下算法性能，系统设计了在线存储功能，



将所有采集到的数据以 .mat 文件格式保存到计算机, 便于后续加载和分析。

4.1 实验一: 微波暗室环境下测距实验

为在受控环境下评估算法的测距精度, 本研究构建了一套完整的实验系统, 其硬件配置与布局如图 6 所示。实验中, 采用一个标准角反射器作为目标, 将其与 ADT6101P 毫米波雷达分别固定于两个三脚架上。整个实验在微波暗室内进行, 且在三脚架前侧悬挂微波吸收海绵, 以避免三脚架金属结构引入的杂波干扰, 从而为算法性能测试营造一个接近理想的高 SNR 实验环境。

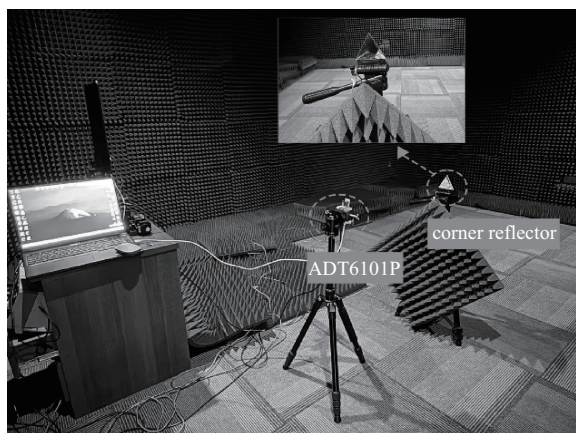


图6 实验一硬件配置与布局

在变换点数 M 的选取方面, MATLAB 仿真实验显示, 当 $M < 50$ 时, MCZT 算法的 RMSE 显著低于标准 CZT 算法, 表现出明显的精度优势。为验证算法在资源受限场景下的性能, 本文选取 $M = 32$ 作为低变换点数的代表。当 M 增至 300 左右时, MCZT 算法与标准 CZT 算法的 RMSE 趋于一

致。因此, 选取 $M = 320$ (低点数的 10 倍) 作为高变换点数对照组, 以全面对比算法在不同变换点数下的精度表现。

在实验距离的选取方面, 考虑 ADT6101P 雷达的有效工作范围约为 0.5 m 至 3 m, 实验设计以约 0.5 m 为步长覆盖全量程, 确保了探测范围的完整性。同时, 针对雷达的核心工作区间 (1.5 m 至 2 m), 通过加密采样选取了 2 个实验距离, 以重点验证算法在关键应用场景下的可靠性。

在数据采集环节, 将角反射器依次置于多个预设距离位置, 并在每个位置连续采集 50 帧原始雷达数据。所有数据通过 UDP 协议实时传输并保存至计算机, 用于后续的离线处理与算法验证。

在接收到原始雷达数据后, 选取来自雷达通道 0 的数据进行距离估计。每一帧数据均独立地通过 5 种算法处理, 从而获得一系列瞬时距离测量值。为消除瞬时测量误差的随机影响并获取更为稳定可靠的测距结果, 对每个位置点采集的所有帧数据进行了平均处理。实验结果汇总于表 4。为了更直观地比较不同算法的表现, 绘制了各算法的距离估计频率曲线, 如图 7 所示。同时, 还描绘了各算法的距离测量误差对比, 如图 8 所示。其中, M 表示 CZT 点数 ($M = 32$)。

从实际测距数据可以看出, MCZT 算法在所有测试距离上均表现出最优的测距性能, 其距离估计误差显著低于 FFT、Macleod、Rife 和标准 CZT 4 种对比算法。该结果进一步验证了栅栏效

表4 实验一($M=32$)各种算法的距离值

单位:mm

算法	856 mm		1 236 mm		1 745 mm		1 959 mm		2 414 mm		2 920 mm	
	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差
FFT	917.6	61.6	1 310.9	74.9	1 704.1	40.9	1 966.3	7.3	2 359.5	54.5	2 883.9	36.1
Macleod	900.9	44.9	1 278	42	1 705.3	39.7	1 966.1	7.1	2 369.1	44.9	2 883.3	36.7
Rife	874.9	18.9	1 251.1	15.1	1 732.6	12.4	1 954.3	4.7	2 379.4	34.6	2 863.6	56.4
CZT	884.8	28.8	1 278.1	42.1	1 732.5	12.5	1 955.4	3.6	2 392.3	21.7	2 899.2	20.8
MCZT	868.2	12.2	1 251.2	15.2	1 733.3	11.7	1 957.5	1.5	2 401.9	12.1	2 900.9	19.1

应的影响：在第4组测试中，由于目标频率恰好落在FFT频域栅格点上，FFT与Macleod等算法的性能出现短暂提升，而MCZT算法仍保持优势，将距离误差进一步缩小至仅1.5 mm。

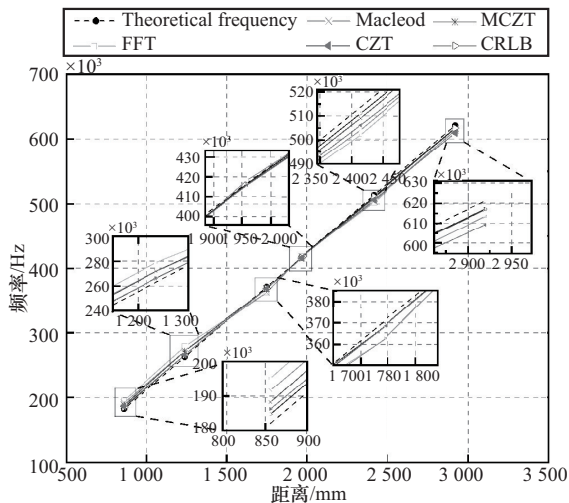


图7 实验一($M=32$)各种算法的估计频率曲线

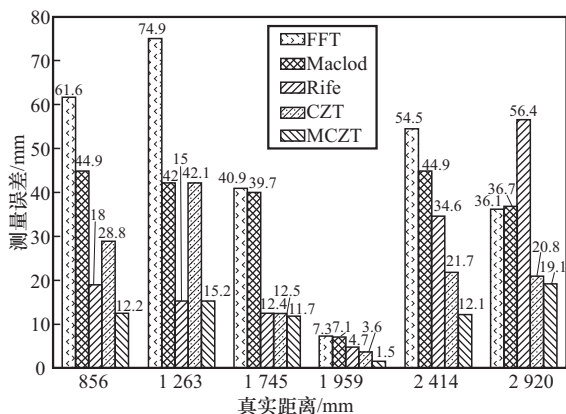


图8 实验一($M=32$)各种算法的距离误差

为探究变换点数对算法性能的影响，针对同一组数据，将CZT点数 M 从32提升至320，并对标准CZT算法和MCZT两种算法的性能进行了对比，实验结果见表5，其距离误差如图9所示。

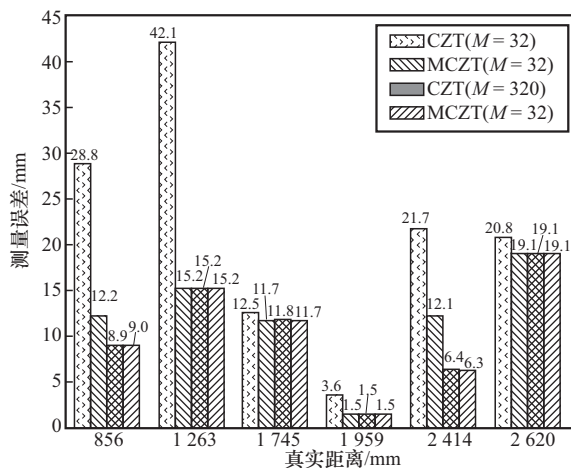


图9 实验一($M=320$)CZT和MCZT算法的距离误差

当变换点数提升至320点后，标准CZT算法与MCZT算法的性能差距显著缩小。在所有测试距离上，两者的测距误差均变得非常接近，部分距离点甚至完全一致。该结果与仿真实验的趋势高度吻合。

4.2 实验二：复杂电磁环境下测距实验

实验二的测试场地选在开阔、无遮挡的室内空旷区域，周围存在多种杂波干扰目标，如图10所示，以模拟算法在实际应用中可能面临的复杂电磁环境，从而更贴近毫米波雷达的实际工程使用场景。

在硬件配置方面，实验二沿用实验一使用的雷达设备，以排除硬件差异对实验结果的影响。同时，将被测目标由标准角反射器更换为自制金属目标物，以评估算法在非理想反射体下的测距性能。

实验参数、数据处理与实验一保持一致。在实验二测试环境下，雷达在探测2.9 m附近目标时，无法稳定提取峰值特征，测距结果出现明显

表5 实验一($M=320$)CZT和MCZT算法的距离值

单位:mm

算法	856 mm		1 236 mm		1 745 mm		1 959 mm		2 414 mm		2 920 mm	
	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差
CZT	864.9	8.9	1 251.2	15.2	1 733.2	11.8	1 957.5	1.5	2 407.6	6.4	2 900.9	19.1
MCZT	865	9	1 251.2	15.2	1 733.3	11.7	1 957.5	1.5	2 407.7	6.3	2 900.9	19.1



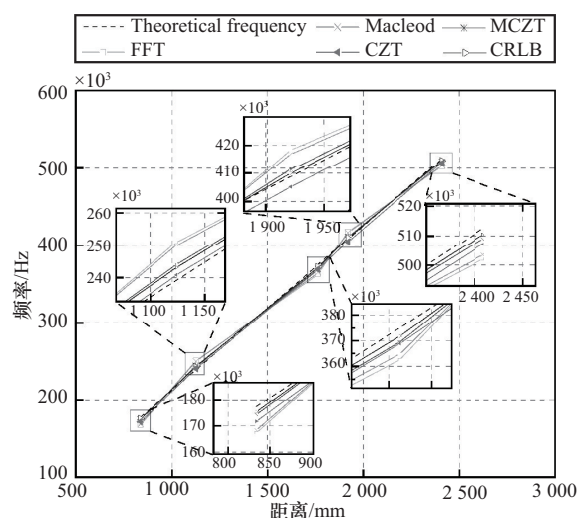
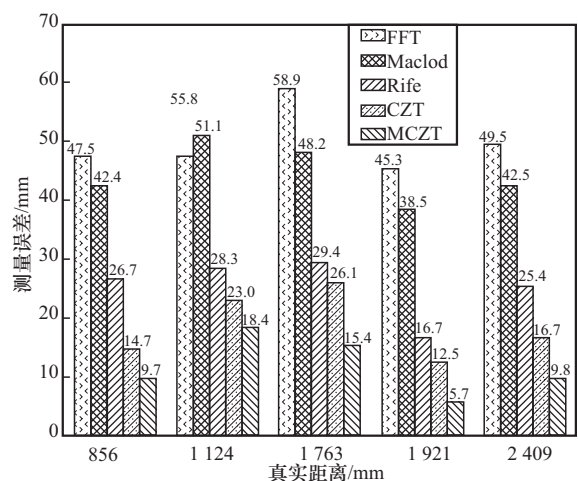
偏差和抖动。为避免非算法因素对性能评估的干扰,实验二舍弃了2.9 m处的测试组。实验结果如表6、图11、图12所示。其中, M 表示CZT点数($M=32$)。



图10 实验二现场图片

从实际测距数据中可以看出,在模拟真实工程应用的环境下,与其他4种算法相比,MCZT算法同样保持了高水准的测距精度表现,将最大距离测量误差控制在20 mm以内。

同样,为了探究变换点数对算法性能的影响,针对同一组数据,将CZT点数 M 从32提升至320,并对比了标准CZT算法与MCZT两种算法的性能。实验结果如表7和图13所示。

图11 实验二($M=32$)各种算法的估计频率曲线图12 实验二($M=32$)各种算法的距离误差表6 实验二($M=32$)各种算法的距离值

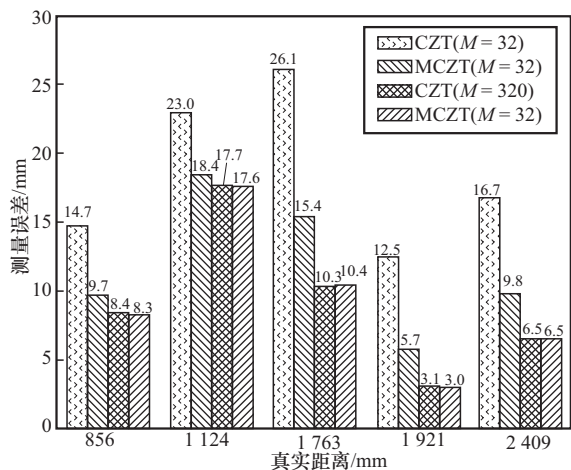
单位:mm

算法	834 mm		1 124 mm		1 763 mm		1 921 mm		2 409 mm	
	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差
FFT	786.5	47.5	1 179.8	55.8	1 704.1	58.9	1 966.3	45.3	2 359.5	49.5
Macleod	791.6	42.4	1 175.1	51.1	1 714.8	48.2	1 959.5	38.5	2 366.5	42.5
Rife	807.3	26.7	1 152.3	28.3	1 733.6	29.4	1 904.3	16.7	2 383.6	25.4
CZT	819.3	14.7	1 147	23	1 736.9	26.1	1 933.5	12.5	2 392.3	16.7
MCZT	824.3	9.7	1 142.4	18.4	1 747.6	15.4	1 926.7	5.7	2 399.2	9.8

表7 实验二($M=320$)CZT和MCZT算法的距离值

单位:mm

算法	834 mm		1 124 mm		1 763 mm		1 921 mm		2 409 mm	
	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差
CZT	825.6	8.4	1 141.7	17.7	1 752.7	10.3	1 924.1	3.1	2 402.5	6.5
MCZT	825.7	8.3	1 141.6	17.6	1 752.6	10.4	1 924	3	2 402.5	6.5

图13 实验二($M=320$)CZT和MCZT算法的测量误差

实验二的结果显示,随着变换点数的增加,标准CZT算法和MCZT算法的测距误差得到有效降低,两者的计算精度趋于一致。该结论与实验一在理想的微波暗室环境下获得的测试结果一致。

4.3 实验三:性能开销实测

为量化评估不同变换点数对算法执行效率的影响,本节在ADT6101P雷达的数字信号处理器平台上,对CZT算法与MCZT算法进行了嵌入式平台运行验证,具体实测耗时见表8。

表8 CZT和MCZT算法实测耗时

算法	FFT点数	变换点数	耗时/ μ s
CZT	256	32	630
	256	320	1 213
MCZT	256	32	658
	256	320	1 248

4.4 实验结果综合分析

在测距精度方面,MCZT算法在不同测试场景下均表现出最优的测距表现:在低变换点数($M=32$)下,MCZT算法的测距精度不仅超越了Rife、Macleod等经典插值算法,甚至逼近了标准CZT算法;在 $M=320$ 配置下的精度水平,全量程范围内的最大误差稳定控制在20 mm以内。由于所有对比算法均基于FFT框架基础,整体

误差仍受栅栏效应影响。MCZT算法则通过频域细化与二次插值的结合,显著降低了误差波动范围。

在执行效率方面,实测数据表明,与标准CZT算法相比,MCZT算法的运行耗时增加极少。这说明算法中新增的2次Macleod插值对整体计算负担几乎没有影响。

5 结束语

本文提出了融合Macleod插值与CZT的MCZT算法。通过“粗估-细化-精插”三级级联结构,实现了精度与效率的深度优化。相较于Macleod、Rife、CZT等算法,MCZT算法通过改进离散频谱峰值定位的方式,实现了测距精度的显著提升,并降低了栅栏效应的影响。仿真分析与实测试验表明,在低变换点数($M=32$)下,MCZT算法在全量程范围内的误差均能稳定控制在20 mm以内。

此外,在算法适用性方面,MCZT算法展现出良好的多目标扩展潜力。作为一种频域局部精细化技术,其极窄的分析带宽确保了在多目标场景下各目标的细化过程在频域上互不干扰,能够有效支撑多目标距离估计场景。综上所述,MCZT算法在维持较低计算开销的同时,实现了更高的测距精度,为嵌入式毫米波雷达系统在高精度测距研究领域提供了一种切实可行的技术方案。

参考文献:

- [1] Zhou T H, Yang M M, Jiang K, et al. MMW radar-based technologies in autonomous driving: a review[J]. Sensors, 2020, 20(24): 7283.
- [2] Liao G H, Ma J M, Luo F. Human activity recognition by using enhanced radar point cloud 2D histograms and Doppler feature fusion[C]//Proceedings of the 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2025: 11234-11241.



- [3] Testa O, Cicchetti R, Pisa S, et al. A novel FMCW radar scheme with millimeter motion detection capabilities suitable for cardio-respiratory monitoring[J]. *Sensors*, 2025, 25(9): 2765.
- [4] Xia Z Y, Ding G M, Wang H, et al. Person identification with millimeter-wave radar in realistic smart home scenarios[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 3509405.
- [5] Waqar S, Muaaz M, Pätzold M. Direction-independent human activity recognition using a distributed MIMO radar system and deep learning[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(20): 24916-24929.
- [6] Piotrowsky L, Kueppers S, Jaeschke T, et al. Distance measurement using mmWave radar: micron accuracy at medium range[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70(11): 5259-5270.
- [7] Scherr S, Ayhan S, Pauli M, et al. Accuracy limits of a K-band FMCW radar with phase evaluation[C]//*Proceedings of the 2012 9th European Radar Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2012: 246-249.
- [8] 刘上, 朱国富, 王玲, 等. LFM CW 雷达高精度测距相位差改进算法[J]. *雷达科学与技术*, 2021, 19(3): 287-291, 297.
- Liu S, Zhu G F, Wang L, et al. An improved algorithm of high precision ranging phase difference for LFM CW radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2021, 19(3): 287-291, 297.
- [9] Rife D, Boorstyn R. Single tone parameter estimation from discrete-time observations[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1974, 20(5): 591-598.
- [10] Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.
- [11] Therrien C W, El-Shaer H T. A direct algorithm for computing 2-D AR power spectrum estimates[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, 37(11): 1795-1798.
- [12] Luo J, Che Y T, Huang G M. Frequency estimation based on MLE-M-Rife algorithm[C]//*Proceedings of the 2020 12th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 64-67.
- [13] 崔英杰, 刘云学, 宋健强, 等. 基于 M-Rife 算法的梯形波 FMCW 雷达多目标检测技术研究[J]. *电子设计工程*, 2021, 29(24): 69-74, 79.
- Cui Y J, Liu Y X, Song J Q, et al. Research on multi-target detection technology of trapezoidal wave FMCW radar based on M-Rife algorithm[J]. *Electronic Design Engineering*, 2021, 29(24): 69-74, 79.
- [14] Quinn B G. Estimating frequency by interpolation using Fourier coefficients[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(5): 1264-1268.
- [15] MacLeod M D. Fast nearly ML estimation of the parameters of real or complex single tones or resolved multiple tones[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(1): 141-148.
- [16] Serbes A. Fast and efficient sinusoidal frequency estimation by using the DFT coefficients[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(3): 2333-2342.
- [17] Jacobsen E, Kootsookos P. Fast, accurate frequency estimators DSP tips & tricks[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(3): 123-125.
- [18] Hao Y, Song P, Wang X Q, et al. A spectrum correction algorithm based on beat signal of FMCW laser ranging system[J]. *Sensors*, 2021, 21(15): 5057.
- [19] Oruganti V S R V, Dhanikonda V S S S S, Paredes H K M, et al. Enhanced dual-spectrum line interpolated FFT with four-term minimal sidelobe cosine window for real-time harmonic estimation in synchrophasor smart-grid technology[J]. *Electronics*, 2019, 8(2): 191.
- [20] Wang M J, Wang Q J, Wen Y H, et al. A fast and accurate frequency estimator for complex single-tone signal based on DFT interpolation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 6501311.
- [21] Jia G Q, Cheng M L, Fang W D, et al. Frequency estimation algorithm for FMCW beat signal based on spectral refinement and phase angle interpolation[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(16): 7067.
- [22] Qi G Q. High accuracy range estimation of FMCW level radar based on the phase of the zero-padded FFT[C]//*Proceedings of the 7th International Conference on Signal Processing(ICSP 2004)*. Piscataway: IEEE Press, 2004: 2078-2081.
- [23] Rabiner L R, Schafer R W, Rader C M. The chirp z-transform algorithm and its application[J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, 48(5): 1249-1292.
- [24] Xu Z G, Qi S H, Zhang P. A coherent CZT-based algorithm for high-accuracy ranging with FMCW radar[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 8001511.
- [25] Meng Y F, Li Y. A high-precision range estimation method for FMCW radar[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE International*

Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-4.

- [26] Xu Y, Yi H Y, Zhang W X, et al. An improved CZT algorithm for high-precision frequency estimation[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1907.

[作者简介]



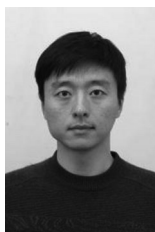
卢云峰 (1995-), 男, 中国计量大学机电工程学院硕士生, 主要研究方向为毫米波雷达信号处理。



陈邵靖 (2003-), 男, 中国计量大学机电工程学院硕士生, 主要研究方向为毫米波雷达信号处理。



郑超群 (2001-), 男, 中国计量大学机电工程学院硕士生, 主要研究方向为毫米波雷达信号处理。



张远辉 (1982-), 男, 博士, 中国计量大学机电工程学院副教授, 主要研究方向为毫米波雷达算法、图像处理技术。



黄志恒 (1995-), 男, 现就职于杭州岸达科技有限公司, 主要从事毫米波雷达信号处理方面工作。