

一种宽带距离像互相关测速的改进方法

柴许杨^{1,2} 张健³ 刘野³
CHAI Xuyang ZHANG Jian LIU Ye

摘要

距离像互相关作为宽带测速领域的有效方法之一,能够精准地实现测速功能。然而,其对于测速精度有着严苛要求,必须依托大点数快速傅里叶变换技术予以支撑,方能达成预期的高精度测速目标,基于此,文章提出了一种基于线性调频Z变换算法的宽带距离像互相关测速方法,首先建立宽带去斜回波模型;然后推导相邻脉冲的距离像互相关算法原理以及峰值点位置和速度的映射关系;最后利用雷达预测速度的先验信息,在小速度区间内进行速度测量,仿真和实测结果验证了该方法不仅降低了快速傅里叶变换点数,同时也改善了测速精度。

关键词

测速;去斜处理;距离互相关;线性调频Z变换;FFT

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.01.022

0 引言

随着雷达技术的迅猛发展,信号带宽也随之拓展,为雷达系统性能的提升注入强大动力,同时对精确测量也提出了更高要求^[1]。因此,如何提高雷达测速精度是掌握目标运动特性的关键因素之一^[2]。

文献[3]利用最小波形熵算法对速度进行最优搜索,然

而,由于其计算过程繁杂、工作量巨大,并且在低信噪比的恶劣条件下,进行全局寻优时极易遭遇困境,往往难以达成预期目标,最终导致失败结局。文献[4]分析了时域下互包络互相关和复包络互相关算法的区别以及影响测速性能的因素,得出增加FFT点数可以提高测速精度。文献[5]创新性地提出了针对正弦波频率估计的修改Rife算法。这一算法在理论层面展现出了极高精度优势,其均方根误差能够极为接近克拉美-罗限,为高精度的频率估计提供了有力支撑,但其运算量颇为庞大。文献[6]和[7]对比了频域、时域互相关算法。频域互相关精度高,适慢速目标,但其无模糊速度范

1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所 安徽合肥 230088
2. 孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室 安徽合肥 230088
3. 中国人民解放军 63726 部队 宁夏银川 750000

- 翻译方法研究[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2024, 33(1): 20-27.
- [7] 唐超超, 拥措, 仁青卓玛. 不同子词处理方法对机器翻译的影响研究[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(12): 4-7+11.
- [8] 桑杰端珠. 基于深度学习的藏汉(汉藏)机器翻译关键技术研究[D]. 青海: 青海师范大学, 2023.
- [9] 汪超. 基于数据增强技术的藏汉机器翻译方法研究[D]. 西藏: 西藏大学, 2023.
- [10] 刘丁. 基于迁移学习的低资源神经机器翻译方法研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2021.
- [11] 郑鑫, 陈海龙, 马玉群, 等. 融合依存句法和LSTM的神经机器翻译模型[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2023, 28(3): 20-27.
- [12] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need [C]//NIPS'17: Proceedings of the 31st Interna-

tional Conference on Neural Information Processing Systems. New York: CAI, 2017: 6000-6010.

- [13] 明日科技. Python+Kivy (App 开发) 从入门到实践[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2020.
- [14] 赞拉公, 安见才让. 基于Python+Kivy的汉英词典实现[J]. 电脑编程技巧与维护, 2023(8): 29-31.
- [15] 刘凌霄, 郝宁波, 吴海涛. 21 天学通 Python[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.

【作者简介】

赞拉公(1997—), 男, 青海海南州人, 硕士, 研究方向: 藏文信息处理及应用。

安见才让(1969—), 男, 青海西宁人, 硕士, 教授, 研究方向: 藏文信息处理和分布式网络。

(收稿日期: 2024-10-13)

围小；时域互相关无模糊速度大，但提高精度会使计算量增大。

基于上述分析，本文提出了一种基于 CZT 算法的距离像互相关测速方法，经互相关处理后，利用所有散射点的能量全部集中在某一频率上的特性，借助 CZT 算法在该频率值附近完成最大幅值的等效搜索，降低计算量的同时，提高了测速精度^[8-9]。

1 距离像互相关原理

雷达的发射信号表达式为^[10]：

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(j2\pi t + j\pi\gamma t^2) \quad (1)$$

式中： $\text{rect}(t) = 1, |t| \leq \frac{T}{2}, \text{rect}(t) = 0, |t| > \frac{T}{2}$ ； T 为脉冲宽度； B 为信号带宽； $\gamma = B/T$ 为线性调频信号的调频率； f_0 为载频。

目标背站速度为正，记 v ；目标在 t_0 时刻的距离为 R_0 ，目标此时远离雷达，则目标相对雷达的距离和速度的关系为

$$R(t) = R_0 + vt \quad (2)$$

雷达接收回波表达式为：

$$s_r(t) = \sigma \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \exp(j2\pi f_0(t-\tau)) \cdot \exp(j\pi\gamma(t-\tau)^2) + n(t) \quad (3)$$

式中： $\tau = 2R(t)/c = 2(R_0 + vt)/c$ 为目标时延； $n(t)$ 为噪声； c 为光速。

去斜参考信号表达式为：

$$s_r(t) = \exp(j2\pi f_0(t-\tau_r) + j\pi\gamma(t-\tau_r)^2) \quad (4)$$

式中： R_{ref} 为参考距离； $\tau_r = 2R_{\text{ref}}/c$ 为参考时延。

去斜处理后回波表达式为：

$$s_{\text{stretch}}(t) = s_{\text{rec}} \cdot s_{\text{ref}}' = \sigma \cdot \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \cdot \exp(j2\pi\phi(R) + j2\pi f_v t) \quad (5)$$

式中： $f_v = \gamma \frac{2}{c}(R_{\text{ref}} - R(t))$ ， $\phi(R) = f_0 \frac{2(R_{\text{ref}} - R(t))}{c} + \frac{2\gamma}{c^2}(R^2(t) - R_{\text{ref}}^2)$ 。

在式(5)中的二次相位项 $4\pi\gamma/c^2 \cdot R^2(t)$ 进行补偿后，对其做傅里叶变换即可得到高分辨一维距离像表达式：

$$S(f) = \text{FFT}[s_{\text{stretch}}(t)] \quad (6)$$

式中： $\text{FFT}[\cdot]$ 为快速傅里叶变换。

距离像互相关充分利用一维距离像中各个散射点的信息，以及目标回波相关系数大，噪声和杂波相关系数小的特点，对相邻两幅距离像的复包络进行互相关运算，公式为：

$$R_{k,k+1}(t) = \int S_{k+1}(f) \cdot S_k^*(t-f) df \quad (7)$$

由相关定理可知，两信号的时域相关求和等效为对应的频响共轭点乘，然后再做逆傅里叶变换处理，表达式为：

$$R_{k,k+1}(t) = \text{IFFT}(\text{FFT}(S_{k+1}(f)) \cdot \text{FFT}(S_k^*(f))) \quad (8)$$

式中： $\text{IFFT}[\cdot]$ 为逆快速傅里叶变换。

由傅里叶变换和逆傅里叶变换的对偶性质可得：

$$R_{k,k+1}(t) = \text{FFT}(s_{k+1}(t) \cdot s_k^*(t)) \quad (9)$$

式中： $\cdot$ 为点乘。

式(5)代入式(9)得互相关结果为：

$$R_{k,k+1}(t) = \text{sinc}(t - \gamma \frac{2}{c} v \cdot \text{PRI}) \cdot \exp(-j2\pi f_0 \frac{2}{c} v \cdot \text{PRI}) \quad (10)$$

式中： PRI 为脉冲重复周期。

从式(10)可得，距离像互相关的包络为辛格形状，包络峰值位置和对应的相位都与目标速度有关。本文利用包络的峰值位置信息进行速度估计。

由式(10)得，不模糊速度表达式为：

$$v_{\text{max}} = \frac{f_s \cdot c}{2 \cdot \gamma \cdot \text{PRI}} \quad (11)$$

式中： f_s 为去斜处理后的采样率。

例如，某宽带雷达采样率 $f_s = 40 \text{ MHz}$ ，脉冲重复周期 $\text{PRI} = 0.02 \text{ s}$ ，带宽 $B = 3 \text{ GHz}$ ，脉宽 $B = 0.0005 \text{ s}$ ，则最大不模糊速度 $v_{\text{max}} = 50000 \text{ m/s}$ ，所以该测速方法不存在速度模糊的情况。速度分辨率 $\Delta v = v_{\text{max}}/N$ ， N 为式(9)中的FFT的点数，因此要提高测速精度，需增大FFT的点数。

2 基于 CZT 算法的测速改进方法

FFT算法等效于在 Z 平面的整个单位圆上进行等间隔采样，而CZT算法则是在 Z 平面上进行螺旋采样，即CZT算法可在 Z 平面上以任意半径进行任意区间的采样，比FFT算法更为灵活。

有限长的离散序列 $x(n)$ ($0 \leq n \leq N-1$)，其 Z 平面上的采样点为：

$$\begin{aligned} Z_k &= AW^{-k}, k=0, \dots, K-1 \\ A &= A_0 \exp(j\theta_0) \\ W &= W_0 \exp(j\varphi_0) \end{aligned} \quad (12)$$

式中： K 为 Z 平面上的采样点数； A_0 表示起始采样点的半径大小； θ_0 表示起始采样点的相位； W_0 表示螺旋采样的伸展率； φ_0 表示相邻两个采样点之间的等分角。

由此，序列 $x(n)$ 的 Z 变换公式为：

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) Z_k^{-n} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{nk} \quad (13)$$

因 $nk = \frac{n^2 + k^2 - (n-k)^2}{2}$ 并代入式(13)得：

$$X(k) = W^{\frac{k^2}{2}} \left[\sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{\frac{n^2}{2}} \right] W^{\frac{(n-k)^2}{2}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{令: } g(n) &= x(n) A^{-n} W^{\frac{n^2}{2}}, n=0, \dots, N-1 \\ h(n) &= W^{\frac{k^2}{2}} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{则: } X(k) = W^{\frac{k^2}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} g(n)h(k-n) = W^{\frac{k^2}{2}} [g(n) \otimes h(n)] \quad (16)$$

式中: $k = 0, 1, \dots, K-1$, 上式可通过两个序列的线性卷积实现。虽然 $h(n)$ 是无限长序列, 但只对 $L=N+K-1$ 段感兴趣, 将 $g(n)$ 序列补 0 置 L 点, 则上式可通过圆周卷积实现, 进而再利用 FFT 算法实现 CZT 算法, 其流程如图 1 所示。

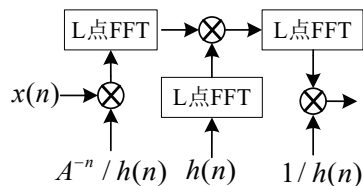


图 1 FFT 实现 CZT 算法的流程图

因此, 本文算法思路即是利用 CZT 算法对目标预测速度对应的频率值附近进行局部峰值搜索代替 FFT 全局搜索。算法流程如图 2 所示。

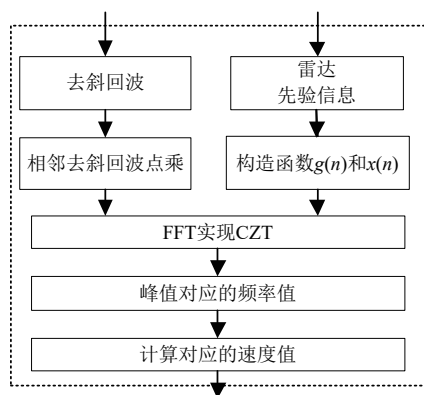


图 2 基于 CZT 算法的测速流程图

具体步骤如下:

- (1) 首先根据雷达的先验信息 (速度 v_p), 计算出对应的频率值 $f_p = v_p \cdot 2 \cdot \gamma \cdot \text{PRI} / c$;
- (2) 根据预测速度 v_p 的误差范围, 设定对应速度范围 v_{win} , 然后计算出频率起始点位置 f_{p_st} 和频率结束点位置 f_{p_end} , 结合 CZT 的采样点数 K , 计算出频率分辨率 φ_0 和起始相位 θ_0 (其中 A_0 和 W_0 均设置为 1);
- (3) 利用 A_0 、 θ_0 、 W_0 和 φ_0 构造函数 $g(n)$ 和函数 $h(n)$;
- (4) 根据图 2 实现方法, 完成峰值搜索, 找出峰值对应的频率值 f_{val} ;
- (5) 根据 $v_{\text{val}} = f_{\text{val}} \cdot c / (2 \cdot \gamma \cdot \text{PRI})$ 计算出目标速度。

3 计算量与仿真分析

根据式 (9) 可知, 去斜回波点乘之后, 若直接进行一次 N 点 FFT 处理, 在所有复数指数全部算好的前提下, 需要 $\frac{N}{2} \log_2^N$ 次复数乘法和 $N \log_2^N$ 次复数加法。

使用 CZT 算法处理, 构造函数 $h(n)$ 需要 M 次复数乘法,

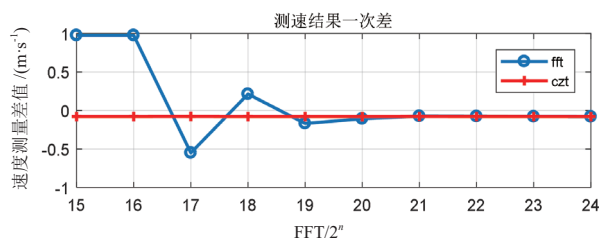
M 为去斜回波点乘后的序列长度, 构造函数 $g(n)$ 需要 $2M$ 次复乘, 构造 $A^n/h(n)$ 需要 M 次复数除法, 三次 $L=M+K-1$ 点 FFT 处理需要 $\frac{L}{2} \log_2^L$ 次复乘和 $L \log_2^L$ 次复加, K 是 CZT 的采样点数, 两次序列点乘需要 $2L$ 次复乘。两种算法的计算量如表 1 所示。

表 1 两种算法的计算量

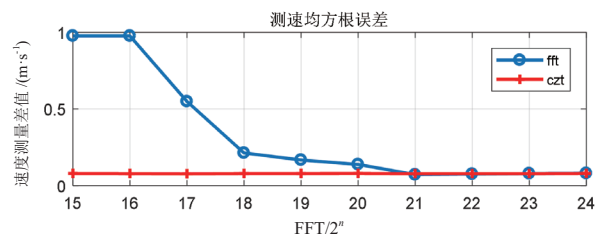
算法	FFT	CZT
复乘次数	$\frac{N}{2} \log_2^N$	$\frac{11}{2}M + \frac{L}{2} \log_2^L + 2L$
复加次数	$N \log_2^N$	$L \log_2^L$

仿真参数设置如下: 线性调频带宽 1 GHz, 去斜后采样率 26.67 MHz, 脉宽 100 μs , 目标信噪比 25 dB, 速度 $v=1000$ m/s, FFT 的点数从 $2^{14} \sim 2^{24}$ 依次变化, CZT 的点数为 2^{10} , 蒙特卡洛仿真次数为 100。

图 3 是 FFT 点数增大对应的测速精度变化图; 可见宽带距离像互相关测速算法的精度跟 FFT 点数 (即速度分辨率) 由直接关系, 速度分辨率越高, 需要的 FFT 点数越大。



(a) 随 FFT 点数变化的测速结果一次差



(b) 随 FFT 点数变化的测速均方根误差结果

图 3 FFT 点数增大对应的测速精度

然后固定 FFT 和 CZT 的点数, 改变速度 v 从 -8000 m/s 到 8000 m/s, 蒙特卡洛仿真次数为 100。

图 4 是 FFT 和 CZT 算法的测速均方根误差图; 去斜回波采样点数是 8192 点, FFT 的点数是 $2^{22} = 4\,194\,304$, 速度分辨率是 0.049 5 m/s, CZT 的点数是 $2^{12} = 4096$, 速度分辨率是 0.039 m/s, 两者测速精度基本一致; MATLAB 运行结果, FFT 平均处理时间为 0.235 161 s, CZT 平均处理时间为 0.009 912 6 s。可见在不影响测速精度的情况下, CZT 的计算量要小很多。

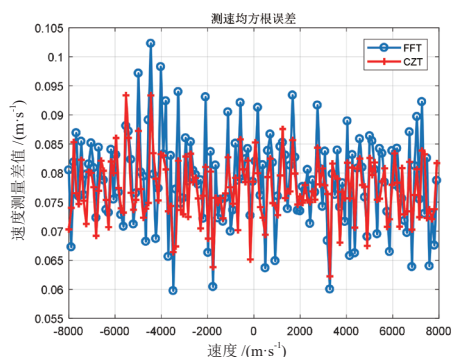


图4 FFT和CZT算法的测速结果图

利用本文方法对某波段雷达实际工作时采集的一段空间目标的回波数据进行处理分析。

图5为某空间目标回波中波位号为121081的相邻两脉冲的去斜脉压结果。图6为一段连续跟踪某空间目标的宽带数据的测速结果,FFT测速均方根误差为0.053417 m/s, CZT测速均方根误差为0.028927 m/s;去斜回波采样点数65536点, MATLAB运行时间结果:FFT方法平均处理时间为0.25713 s, CZT方法平均处理时间为0.077426 s。可见CZT算法不仅降低计算量,同时对测速精度也有改善。

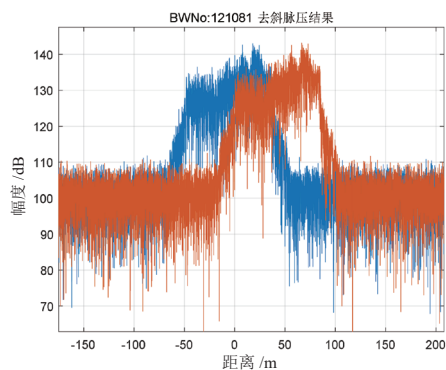
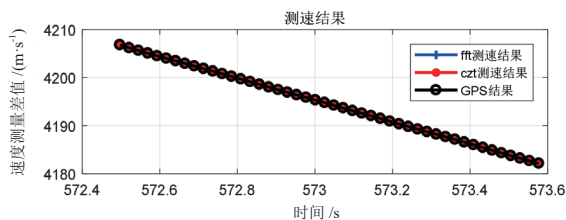
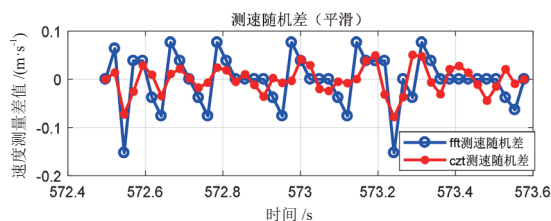


图5 波位号121081的去斜脉压结果



(a) FFT和CZT两种算法的速度测量值



(b) FFT和CZT两种算法的测速结果一次差

图6 FFT和CZT算法宽带测速结果

4 结语

本文针对宽带距离像互相关测速方法在应用中计算量大的问题,从互相关测速基本原理和实现过程进行分析,在此基础上提出了基于CZT算法的宽带距离像互相关测速方法,不仅降低了计算量,同时测速精度也得到了一定程度的提升。此方法虽然减少了计算量并对测速精度有一定的提升,但这需借助上一帧预测速度信息,因此如何能够在预测信息未稳定时快速收敛,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] LONG T, LIANG Z N, LIU Q H. Advanced technology of high-resolution radar: target detection, tracking, imaging, and recognition[J/OL]. Science china information science, 2019[2024-03-21]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11432-018-9811-0>.
- [2] 李文吉, 任丽香, 张康, 等. 低信噪比条件下基于距离像互相关的相推测速方法[J]. 信号处理, 2021, 37(7):1125-1132.
- [3] 刘静, 李兴国. 毫米波高分辨率雷达运动补偿研究[J]. 现代雷达, 2004(7):21-23+30.
- [4] 包云霞, 毛二可, 何佩琨. 基于一维高分辨距离像的相关测速补偿算法[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(2):160-163.
- [5] 邓振森, 刘渝, 王志忠. 正弦波频率估计的修正Rife算法[J]. 数据采集与处理, 2006, 21(4):473-477.
- [6] TRAN S T. Computer processing of high resolution radar data at naval ocean systems center[C/OL]. 1990 IEEE International Conference on Systems Engineering. Piscataway: IEEE, 1990[2024-04-11]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5725731>.
- [7] 蒋楠稚, 王毛路, 李少洪, 等. 频率步进脉冲距离高分辨一维成像速度补偿分析[J]. 电子与信息学报, 1999, 21(5):665-670.
- [8] 许榕榕. 窄带雷达高精度测距测速技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [9] 魏少鹏. 雷达宽带测量与高分辨成像技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [10] 欧海. 基于相邻互相关的宽带雷达测速算法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2020.

【作者简介】

柴许杨(1986—),男,安徽怀远人,硕士,高级工程师,研究方向:雷达信号处理。

(收稿日期:2024-10-08)