

文章编号: 2095-4980(2016)02-0259-04

一种改进的毫米波引信分数阶频谱细化算法

武文飞, 李跃华, 张翼龙

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 毫米波线性调频系统普遍采用“差频-快速傅里叶变换(FFT)”进行信号处理, 但是当目标与雷达之间存在相对运动时, 差频信号包含了目标的距离和速度信息。利用传统的 FFT 变换进行速度距离解耦合操作, 效果并不理想。针对此问题, 介绍了分数阶 FFT 和基于这一变换的调频信号检测原理, 提出一种改进的分数阶傅里叶域局部频谱细化方法。仿真结果表明, 该频谱细化算法在相同的 FFT 变换点数下, 能够获得更高的频谱分辨率, 而频谱分辨率相同时, 该算法的计算量更少。

关键词: 毫米波线性调频; 速度距离解耦合; 分数阶傅里叶变换; 局部频谱细化

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0259

An improved FRFT domain zooming algorithm in MMW LFMCW fuse

WU Wenfei, LI Yuehua, ZHANG Yilong

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: "Beat-FFT" is usually used in the Millimeter Wave(MMW) Linear Frequency Modulated Continuous Wave(LFMCW) system. The beat signal contains velocity and range information when there is relative motion between target and radar. The effect of decoupling by FFT transform is not ideal. In order to solve this problem, Fractional Fourier Transform(FRFT) is introduced as well as the principle of LFM signal detection based on FRFT. An improved local FRFT spectrum refinement method is put forward. Simulation results show that the frequency spectrum refinement algorithm can obtain higher spectral resolution under the same points of FFT transform; and it would take less calculation to get the same spectral resolution.

Key words: Millimeter Wave Linear Frequency Modulated Continuous Wave; decoupling between range and velocity; Fractional Fourier Transform; local spectrum refinement

毫米波线性调频雷达具有体积小, 重量轻, 成本低, 受天气和环境因素影响小, 分辨力高, 无距离盲区等独特优点^[1], 然而在探测运动目标时, 目标的差频信号是线性调频信号, 距离速度产生模糊, 经典的傅里叶变换不能对时变信号进行正确的频谱估计。

传统的线性调频连续波(LFMCW)雷达常使用三角波调制信号来解耦速度和距离信息^[2], 该方法利用上下扫频段差频信号的对称特性进行对消, 得到正确的参数估计值。但是该方法在多目标环境下, 会产生虚假目标。为了剔除虚假目标, 分别提出了频域配对法^[3]、动目标检测(Moving Targets Detection, MTD)-频域配对法^[4]进行改进, 但是这些方法存在计算复杂、配对紊乱等缺点。此外为了实现解耦合, 有学者提出利用发射变周期的 LFMCW 信号来进行正确的参数估计^[5], 该算法简单, 利用真实目标在不同周期发射信号下计算得到的距离速度组合相等, 而虚假目标的组合参数不同的特点来检测多目标。但是该方法只有在理想环境下才非常有效, 在杂波干扰比较强的环境中, 算法性能大大下降。

由于运动目标的差频信号是初始频率和调频率未知的 LFMCW 信号, 而 LFMCW 信号在特定阶数的 FRFT 域中呈现能量聚集特性, 因此本文利用 FRFT 来估计运动目标的运动参数, 同时研究改进算法, 并在最优阶次的 FRFT 域内进行选频细化, 提高 FRFT 域内的频谱分辨率和调频系统的测距精确度。

1 分数阶傅里叶变换

1.1 分数阶傅里叶变换的基本定义

p 阶 FRFT 的基本定义^[6], 即时间函数 $x(t)$ 到 p 阶傅里叶域 $x(u)$ 的变换公式:

$$X_p(u) = \begin{cases} \sqrt{1 - j \cot \alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[j\pi(u^2 \cot \alpha - 2ut \csc \alpha + t^2 \cot \alpha)] x(t) dt, & \alpha \neq n\pi \\ x(u), & \alpha = 2n\pi \\ x(-u), & \alpha = (2n+1)\pi \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\alpha = p\pi/2$ 是分数阶傅里叶变换的旋转角度。由于在数字信号处理的应用中必须采用离散形式的 FRFT, 使得离散 FRFT 及其快速算法的研究尤为重要。在目前已有的各种离散 FRFT 算法中, Ozaktas 等人提出的算法根据 FRFT 的表达式将 FRFT 分解为信号的卷积形式^[7], 从而利用 FFT 计算 FRFT, 因此计算精确度高, 负担小, 是目前的主流算法, 本文也是基于此算法进行数据仿真。

1.2 线性调频信号的分数阶傅里叶变换检测原理

假设 LFM CW 信号 $x(t) = e^{j2\pi(\frac{1}{2}k_0 t^2 + f_0 t)}$, 将该信号代入式(1)得到信号的 p 阶 FRFT 变换结果, 见式(2):

$$X_p(u) = \sqrt{1 - j \cot \alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\pi[u^2 \cot \alpha - 2ut \csc \alpha + 2f_0 t + (\cot \alpha + k_0)t^2]} dt \quad (2)$$

当 $\alpha = \text{arccot}(-k_0)$ 时, 式(2)整理得:

$$X_p(u) = \sqrt{1 - j \cot \alpha} e^{j\pi u^2 \cot \alpha} \delta[2\pi(u \csc \alpha - f_0)] \quad (3)$$

取式(3)的模值得:

$$|X_p(u)| = \delta[2\pi(u \csc \alpha - f_0)] \quad (4)$$

由式(4)不难看出, LFM CW 信号能够在某一特定阶次下的分数阶域中形成能量聚集, 且根据在该域中搜索得到的峰值可以求 LFM CW 信号的初始频率。

根据式(4), 可以总结出 LFM CW 信号的 FRFT 检测原理:

$$k_0 = -\cot \alpha_0 \quad (5)$$

$$f_0 = u_0 \csc \alpha_0 \quad (6)$$

1.3 运动目标在线性调频雷达下的差频信号形式

以锯齿波调制为例, 线性调频雷达的发射信号 $V(t) = V_0 \cos[2\pi(f_0 t + \mu t^2/2) + \phi_0]$, 其中 V_0 为幅度, μ 为调频斜率, ϕ_0 为初始相位。假设指向雷达方向的速度为正, 点目标速度为 v_0 , 距离为 R_0 。则由相关结论^[8]知, 除去每个调制周期差频信号的固定相位项后, 第 k 个周期的差频信号见式(7)。

$$V_i(t) = \cos\{2\pi[(f_r - f_d)t - 2v_0 \mu t^2/c]\} \quad (7)$$

式中: c 为光速; $f_r = 2R_0 \mu/c$ 为静止目标的回波频率; $f_d = 2v_0/\lambda$ 为目标的多普勒频率, λ 为雷达波长, 此外幅度已做归一化处理。由式(7)不难看出, 运动目标的差频信号是初始频率为 $f_r - f_d$ 、调频率为 $-4v_0 \mu/c$ 的 LFM CW 信号。结合上一节的分析可知, 运动目标的差频信号参数可以通过 FRFT 进行估计。

2 改进的 FRFT 域选频细化算法

2.1 选频细化算法的基本原理

为方便描述, 记算法为 Zoom FRFT, 简记为 ZFRFT。ZFRFT 的基本思想是将经典的复调制 Zoom-FFT 细化思想应用在最优阶次的 FRFT 域内, 对感兴趣的 FRFT 频谱进行局部的细化, 提高局部频谱分辨率。其基本原理见图 1, 图中输入信号为 $x(n)$, 对应的 p 阶 FRFT 域信号为 $X_p(u)$, 中心频率为 u_d , 经复调制后信号为 $y(n)$, 对应的 p 阶 FRFT 域信号为 $Y_p(u)$, 抽取后信号为 $y_M(n)$, 对应的 p 阶 FRFT 域信号为 $y_{Mp}(u)$, M 为细化倍数, 它们的对应关系为:

$$y(n) = e^{\frac{j2\pi n \rho}{f_s}} x(n) \quad (8)$$

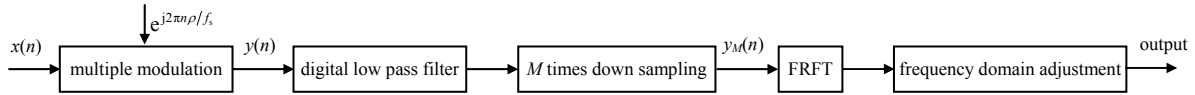


Fig.1 Block diagram of ZFRFT algorithm

图 1 ZFRFT 算法实现框图

$$Y_p(u) = e^{j\pi\rho^2 \sin \alpha \cos \alpha} e^{-j2\pi u \rho \cos \alpha} X_p(u - \rho \sin \alpha) \quad (9)$$

当满足 $\rho = -u_d \csc \alpha$ 时, 经复调制后, 信号的频谱幅值不变, 幅角线性变化, 且其在 p 阶分数阶傅里叶域内的频谱中心被移至零频附近。

抽取后信号和复调制后信号之间的关系为:

$$y_M(n) = y(nM) \quad (10)$$

进行 p 阶 DTFRFT 为:

$$Y_{Mp}(w) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} e^{j\cos \alpha \frac{2k\pi(w-k\pi \sin \alpha)}{(M\Delta t)^2}} X_p\left(\frac{w-k\pi \sin \alpha}{M}\right) \quad (11)$$

式中: $w = \mu\Delta t$; Δt 为信号在时域的采样周期。由式(11)可以看出, 信号经 M 倍抽取后, 其频谱的幅值变为原来的 $1/M$, 带宽扩展了 M 倍, 并作 k 倍的分数阶傅里叶域数字频率周期移位后进行叠加, 由于系统中包含了抗混叠滤波器, 因此高频成分被滤除, 所以式(11)中只存在 $k=0$ 的情况, 故经 FRFT 后输出的频谱如下:

$$Y_{Mp}(w) = \frac{1}{M} X_p\left(\frac{w}{M}\right) \quad (12)$$

原始信号分数阶傅里叶域频率 u 和抽取后信号频率 u_d' 之间的关系为:

$$u = \frac{u_d'}{M} + u_d \quad (13)$$

等式两边同时乘以 $\csc \frac{p}{2}\pi$, 则得到 LFMCW 信号初始频率的关系式:

$$f = \frac{f'}{M} + f_d \quad (14)$$

2.2 ZFRFT 算法的计算量

Ozaktas 提出的离散 FRFT 算法通过 FFT 进行快速计算, 因此可以通过 FFT 变换的运算量来比较 ZFRFT 节省的运算量。

以需求的复数乘法次数为例, N 点 FFT 需要 $N \log_2 N \log_2^N / 2$ 次复数相乘, MN 点 FFT 需要 $MN \log_2^{MN} / 2$ 次复数相乘, 那么 ZFRFT 算法节省的计算量占原来复乘计算的百分比见式(15):

$$\text{compute reduction} = 1 - \frac{N \log_2^N / 2}{MN \log_2^{MN} / 2} = 1 - \frac{\log_2^N}{M \log_2^{MN}} \quad (15)$$

比如当细化倍数 $M=4, N=256$ 时, ZFRFT 算法节省了 80% 的复乘运算。

2.3 仿真实验

仿真中雷达以锯齿波调制为例, 系统参数为载频 35 GHz, 信号带宽为 300 MHz, 调制周期为 50 ms, 调频斜率为 6×10^9 Hz/s。速度为 150 m/s, 仿真时添加 -3 dB 的高斯白噪声。通过该目标与雷达之间的距离来验证算法的有效性, 目标的差频信号如式(7)所示, 仿真结果见表 1。从表 1 可知, 在使用 Ozaktas 等提出的快速算法计算信号离散样本的 FRFT 时, 与相同点数的 FFT 变换相比, ZFRFT 算法的估计误差明显减少, 最大估计绝对误差由 6.5 m 减少到 1.3 m, 最大相对误差由 0.65% 降低到 0.13%, 估计误差均方由 5.214 2 m 降低到 0.997 5 m。可见 ZFRFT 算法提高了特定阶次下 FRFT 域的频谱分辨率, 提高了系统的测距精确度。此外, ZFRFT 算法中的细化倍数为 4, FFT 变换点数为 256 点, 由上一小节的分析知, ZFRFT 算法可节省 80% 的复乘运算。

3 结论

当目标与线性调频雷达之间存在相对运动时, 差频信号是参数未知的 LFMCW 信号。本文利用 LFMCW 信号在特定阶数 FRFT 域中的能量聚集特性分别估计目标的速度和距离参数, 来完成速度距离解耦, 得到目标的准

确运动参数,并在毫米波线性调频雷达背景下,把经典的 Zoom FFT 思想应用在特定阶次的 FRFT 域进行选频细化。仿真结果显示,与相同点数的 FFT 变换相比,ZFRFT 的分数阶频谱分辨率更高,系统的测距精确度更高;而分数阶频谱分辨率相同时,ZFRFT 的运算量则更少。因此本文提出的 ZFRFT 算法具有一定的工程实用意义。

表 1 ZFRFT 仿真结果
Table 1 Simulation results of ZFRFT algorithm

range/m	initial frequency/Hz	FRFT estimates		ZFRFT estimates	
		frequency/error/(Hz)	range/error/(m)	frequency/error/(Hz)	range/error/(m)
950	500	320/180	945.5/4.5	530/30	950.7/0.7
1 000	2 500	2 760/260	1 006.5/6.5	2 550/50	1 001.3/1.3
1 050	4 500	4 680/180	1 054.5/5.5	4 476/24	1 049.4/0.6
1 100	6 500	6 340/160	1 096/4	6 548/48	1 101.2/1.2

参考文献:

- [1] 李兴国,李跃华. 毫米波近感技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2009. (LI Xingguo, LI Yuehua. Millimeter Wave Near Sensing Technology Foundation[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.)
- [2] 史林,张琳. 调频连续波雷达频谱配对信号处理方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2003,30(4):534-538. (SHI Lin, ZHANG Lin. LFMCW Radar Spectrum Matching Signal Processing Method[J]. Journal of Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2003,30(4):534-538.)
- [3] 凌太兵. LFMCW 雷达运动目标检测与距离速度去耦合[D]. 成都:电子科技大学, 2003. (LING Taibing. Range-velocity decoupling of moving targets of LFMCW radar[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology, 2003.)
- [4] 杨建宇,凌太兵,贺俊. LFMCW 雷达运动目标检测与距离速度去耦合[J]. 电子与信息学报, 2004,26(2):169-173. (YANG Jianyu, LING Taibing, HE Jun. Range-velocity decoupling of moving targets of LFMCW radar[J]. Journal of Electronics and Information, 2004,26(2):169-173.)
- [5] 徐涛,金昶明,孙晓玮,等. 一种采用变周期调频连续波雷达的多目标识别办法[J]. 电子学报, 2002,30(6):861-863. (XU Tao, JIN Changming, SUN Xiaowei, et al. Multi-targets recognition method in LFMCW radar with variable cycle[J]. Acta Electronica Sinica, 2002,30(6):861-863.)
- [6] 张碧雄. 基于 FrFT 空间目标探测与高精度频率估计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(6):749-753. (ZHANG Bixiong. Space target detection and accurate frequency estimation using FrFT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(6):749-753.)
- [7] HALDUN M Ozaktas, ORHAN Ankan, ALPER Kutay M, et al. Digital computation of the Fractional Fourier Transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996,40(9):2141-2150.
- [8] 吴礼. 近程毫米波 LFMCW 雷达多目标信号分析与处理方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2008. (WU Li. Research of multi-target signal analysis and processing methods for short-range millimeter wave LFMCW radar[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2008.)

作者简介:



武文飞(1989-), 男, 江苏省沭阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波 LFMCW 雷达实时信号处理.email:warlordy@qq.com.

李跃华(1959-), 男, 南京市人, 博士, 教授, 主要研究方向为毫米波亚毫米波近程探测系统设计、精确探测、成像与目标识别、信号处理与智能化技术.

张翼龙(1989-), 男, 安徽省天长市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为稀疏信号感知与处理、被动毫米波合成孔径成像.