文章编号: 2095-4980(2019)03-0457-05

雷达动目标变换域相参积累检测及性能分析

孙艳丽,陈小龙*,柳 叶

(海军航空大学,山东 烟台 264001)

摘 要:从雷达动目标信号变换实现相参积累的角度出发,选取4种典型的相参积累方法:短时傅里叶变换(STFT)、维格纳-威利分布(WVD)、平滑伪维格纳-威利分布(SPWVD)及分数阶傅里叶变换(FRFT),并将其应用于雷达动目标检测。重点研究了采样频率、脉冲数、输入信噪比(SNR)对相参积累性能以及动目标检测性能的影响。结果表明,FRFT运算速度相对较慢但适用范围最广, 尤其在处理噪声背景较强的信号时,能够有效抑制噪声,且参数估计精确度较高,具有良好的时频聚集性,为雷达相参积累检测的工程化应用提供理论支撑。

Detection and performance analysis of radar coherent integration for moving target in transform domain

SUN Yanli, CHEN Xiaolong^{*}, LIU Ye (Naval Aviation University, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: Four typical coherent integration methods are selected and applied to radar moving target detection according to the transformation of radar moving target signal to realize coherent integration, which are Short Time Fourier Transform(STFT), Wigner-Ville Distribution(WVD), Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution(SPWVD) and Fractional Fourier Transform(FRFT). The effects of sampling frequency, pulse number, input Signal-to-Noise Ratio(SNR) on coherent integration performance and moving target detection performance are emphatically studied. The result shows that the FRFT is relatively slow but has a wider application range, and it can effectively suppress noise when dealing with signals with strong background noise. It has high parameter estimation accuracy and good time-frequency clustering, which provides theoretical support for engineering application of radar coherent integration detection.

Keywords: radar moving target detection; coherent integration; transform domain; time-frequency analysis; parameter estimation

在较强杂波背景下对一些低速小目标进行检测,当目标运动状态比较复杂时,其雷达回波是一种非平稳信号, 具有局部性和方向性的特点。这种信号已经不满足传统频域信号处理中对平稳性的要求。时频分析方法有线性和 非线性时频表示两类。对于线性时频表示,应用最早的分析方法为短时傅里叶变换方法(STFT),只能够粗略地描 述信号的时频分布^[1-2]。对于非线性时频表示,文献[3]提出了海洋环境中基于维格纳-威利分布(WVD)的线性调 频(Linear Frequency Modulated, LFM)信号检测方法,对非平稳信号具有良好的能量聚集性和非常高的时频分辨 力,但在处理较为复杂的多分量信号时会产生交叉项,增加了信号检测的难度。平滑伪维格纳-威利分布(SPWVD) 是在 WVD 的基础上进行时域和频域的加窗平滑处理,能够较好地抑制 WVD 的交叉项,但时间分辨力和频率分 辨力明显下降,且算法的运算效率较低^[4]。1993 年 Almeida 分析了分数阶傅里叶变换(FRFT)与 WVD 的联系^[5],

收稿日期: 2017-12-12; 修回日期: 2018-04-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61871391;U1633122; 61501487);国防科技基金资助项目(2102024);山东省高校科研发展计划资助项 目(J17KB139);中国科协"青年人才托举工程"专项经费资助(YESS20160115)

^{*}通信作者: 陈小龙 email:cxlcxl1209@163.com

FRFT 适于分析处理非平稳信号,当其旋转角度与信号匹配时,能量聚集性最强,积累效果最好^[6]。本文综合考虑不同变换积累方法的优缺点,选取4种典型的相参积累方法,即STFT,WVD,SPWVD和FRFT,结合仿真分析,定性、定量地分析采样频率、脉冲数、输入信噪比对4种变换相参积累性能的影响。

1 4种相参积累方法原理

1.1 STFT 的基本原理

STFT 的基本思想是选取一个合适的时间窗,对信号进行加窗处理,将窗内的非平稳信号近视为平稳信号, 然后对窗内信号进行傅里叶变换,让窗函数在信号时间轴上滑动,最终得到信号在不同时刻的频谱。

STFT 的表达式为^[7]:

$$STFT_{x}(t,f) = \int x(\tau)g^{*}(\tau-t)e^{-j2\pi f\tau}d\tau$$
⁽¹⁾

式中: x(t)为进行处理的信号; $g^*(\tau-t)$ 为窗函数的时域形式; τ 为延时时间。

1.2 WVD 的基本原理

维格纳分布定义式为[8]:

$$WVD(t,f)_{x} = \int_{-\infty}^{\infty} x \left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^{*} \left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$
⁽²⁾

式中 x(t)表示待处理的信号。

实际上,它可以看作一种特殊的 STFT,下面进行简单的公式推导:令 $t'=t+\frac{\tau}{2}$,则 $\tau=2(t'-t)$, d $\tau=2dt'$,将其代入式(2)得:

$$WVD_{x}(t,f) = \int x(t')x^{*}(2t-t')e^{-j2\pi f \times 2(t'-t)} \times 2dt' = 2e^{j4\pi f t} \int x(t')x^{*} \left[-(t'-2t) \right] e^{-j2\pi \times 2f t'} dt' = 2e^{j4\pi f t} STFT_{x}^{x(-t)}(2t,2f)$$
(3)

1.3 SPWVD 的基本原理

SPWVD 的基本思想就是在时频二维平面上分别在时间和频率方向用 2 个独立的滤波器对交叉项进行滤波, 它是对 WVD 的进一步处理,采取平滑和加窗的形式^[9],其定义式为:

$$SPWVD_{x}(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(u)h(\tau)x\left(t-u+\frac{\tau}{2}\right)x^{*}\left(t-u-\frac{\tau}{2}\right)e^{-j2\pi f\tau}dud\tau$$
(4)

式中g(u)和 $h(\tau)$ 表示对信号所加的窗函数。

1.4 FRFT 的基本原理

FRFT 是一种广义的傅里叶变换形式,基本定义式为:

$$X_{\alpha}(u) = F^{P}[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) K_{\alpha}(t, u) dt$$

$$K_{\alpha}(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1 - j\cot\alpha}{2\pi}} \exp\left(j\frac{t^{2} + u^{2}}{2}\cot\alpha - tu\csc\alpha\right), & \alpha \neq n\pi \end{cases}$$

$$K_{\alpha}(t, u) = \begin{cases} \delta(t - u), \alpha = 2n\pi \end{cases}$$
(6)

$$\delta(t+u), \alpha = (2n\pm 1)\pi$$

式中: F^{P} 为 FRFT 算子; $K_{\alpha}(t,u)$ 为核函数; $\alpha = p\pi/2$ 为旋转角度^[10], p为 FRFT 变换的阶数。

2 变换域相参积累性能比较分析

LFM 信号的基本参数设置如下:初始频率 f_0 为 200 Hz,调频率 μ 为 500,波长 λ 为 0.03 m,采样频率 f_s 为 800 Hz,脉冲数 N 为 256,设置的噪声为加性高斯白噪声,信噪比 SNR 为 0。

2.1 采样频率 fs 对相参积累性能的影响

将采样频率 f, 分别设置为 1 000 Hz 和 1 200 Hz, 分别进行 STFT, WVD, SPWVD 和 FRFT 4 种变换, 对仿真结

果进行纵向和横向的比较分析。

纵向对比:采样频率为 1 000 Hz 时, FRFT 的抗噪声性能最好。比较 4 种变换的处理时间, STFT 和 WVD 运算时间较短, SPWVD 和 FRFT 相对较长, 主要是由于 SPWVD 和 FRFT 的算法相对复杂。

横向对比:比较表 1 和表 2 参数估计的结果,采样频率为 1 200 Hz 的处理结果更接近理论值。可见,在脉冲数一定时,改变采样频率,会使原始信号发生改变,进而在一定程度上改变信号的相参积累性能。

表1 采样频率为1000 Hz 时 STFT,WVD,SPWVD,FRFT 的处理结果

	central frequency estimation/Hz	transient velocity estimation/(m·s ⁻¹)	acceleration estimation $/(m \cdot s^{-2})$	noise peak	peak difference	running time/s	
STFT	262.75	3.94	8.27	0.58	0.42	0.31	
WVD	262.75	3.94	8.73	0.62	0.38	0.30	
SPWVD	262.75	3.94	7.81	0.41	0.59	0.41	
FRFT	263.02	3.95	7.71	0.32	0.68	0.54	
theoretical value	263.50	3.95	7.50	_	—	—	

表 2 采样频率为 1 200 Hz 时 STFT, WVD, SPWVD, FRFT 的处理结果

Table2 Processing results of STFT,WVD,SPWVD,FRFT at 1 200 Hz sampling frequency

	central frequency estimation/Hz	transient velocity estimation/ $(m \cdot s^{-1})$	acceleration estimation $/(m \cdot s^{-2})$	noise peak	peak difference	running time/s
STFT	249.41	3.74	7.94	0.48	0.52	0.31
WVD	251.76	3.78	7.28	0.62	0.38	0.30
SPWVD	251.76	3.78	7.94	0.28	0.72	0.41
FRFT	252.74	3.79	7.47	0.21	0.79	0.55
theoretical value	252.90	3.79	7.50	_	—	—

2.2 脉冲数对相参积累性能的影响

纵向分析:表 3 和表 4 分别为 N=128 和 N=512 的数据处理结果。可以得出,当积累的数据点数较多时,由 速度相对误差数据可知 WVD 和 FRFT 具有较高的参数估计精确度;由噪声峰值差可得 FRFT 和 SPWVD 抗噪声 性能较好。

横向分析: 以 SPWVD 处理结果为例分析, 当 N=128 时,信号中心频率的峰值宽度约为 25 Hz;当 N=512 时,信号中心频率的峰值宽度约为 15 Hz。这种差异最终会体现在信号的相关参数估计中,处理的脉冲数越多,峰值宽度越窄,信号处理的精确度越高。以 WVD 处理结果为例分析,当 N=128 时,噪声幅值最大为 0.82,平均幅值约为 0.4;当 N=512 时,噪声幅值最大为 0.6,平均幅值约为 0.2,可见增加信号处理的脉冲数 N 能够有效抑制噪声,改善抗噪声性能。在增加脉冲数后,运算量加大,运算时间明显增加。

		表 3 N=128 时 ST	FT,WVD,SPWVD,FRF	T 的处理结果				
	Table	e3 Processing results	of STFT,WVD,SPWV	D,FRFT when N=128	3			
	central frequency estimation/Hz	transient velocity estimation/ $(m \cdot s^{-1})$	acceleration estimation $/(m \cdot s^{-2})$	speed relative error	peak difference	running time/s		
STFT	220.47	3.31	11.07	0.046 1	0.38	0.28		
WVD	228.35	3.43	12.91	0.011 5	0.18	0.27		
SPWVD	228.35	3.43	9.23	0.011 5	0.42	0.30		
FRFT	232.74	3.49	7.62	0.005 8	0.78	0.39		
theoretical value	231.50	3.47	7.50	—	—			
		表 4 <i>N</i> =512 时 ST	FT,WVD,SPWVD,FRF	T 的处理结果				
Table4 Processing results of STFT, WVD, SPWVD, FRFT when N=512								
	central frequency estimation/Hz	transient velocity estimation/ $(m \cdot s^{-1})$	acceleration estimation $/(m \cdot s^{-2})$	speed relative error	peak difference	running time/s		
STFT	330.72	4.96	7.80	0.009 8	0.52	0.42		
WVD	326.81	4.90	7.45	0.002 1	0.40	0.41		
SPWVD	329.75	4.95	7.68	0.006 9	0.79	0.86		

4.92

4.91

2.3 输入信噪比对相参积累性能的影响

328.32

327.50

FRFT

theoretical value

纵向对比:从表 5 可以看出, R_{SN}=-3 dB 时, WVD 对中心频率、瞬时速度、加速度估计与理论值相差非常

7.54

7.50

0.002 5

0.82

0.84

大,经过 WVD 处理后目标已经被噪声完全湮没,所以参数估计的结果并不是目标的,而是噪声的,这时研究速度的相对误差也就失去意义。比较加速度估计的结果,显然 FRFT 估计的结果更接近理论值,其次是 SPWVD 和 STFT; FRFT 的输出信噪比最大,WVD 的输出信噪比最小。可见在信噪比较低的条件下,FRFT 具有较好的相参积累性能,WVD 不适合处理低信噪比的信号。如表 6 所示,在信噪比较高时,WVD,SPWVD 和 FRFT 的加速度估计与理论值相差较小,且输出信噪比较高,STFT则相对较低。

表 5 *R*_{SN}=-3 dB 时, STFT,WVD,SPWVD,FRFT 的处理结果 Table5 Processing results of STFT,WVD,SPWVD,FRFT when *R*_{SN}=-3 dB

	central frequency estimation/Hz	transient velocity estimation/(m s ⁻¹)	acceleration estimation $/(m \cdot s^{-2})$	speed relative error	output SNR/dB
STFT	272.94	4.09	6.47	0.023 9	6.79
WVD	206.67	3.10	0.29	0.260 1	1.42
SPWVD	277.65	4.16	7.06	0.007 1	8.62
FRFT	280.24	4.20	7.73	0.002 4	11.40
theoretical value	279.40	4.19	7.50	—	—

		0	· · · ·	5.1		
	central frequency estimation/Hz	transient velocity estimation/ $(m \cdot s^{-1})$	acceleration estimation $/(m \cdot s^{-2})$	speed relative error	output SNR/dB	
STFT	276.08	4.14	7.06	0.011 9	15.72	
WVD	279.22	4.19	7.65	0.000 4	19.32	
SPWVD	277.65	4.16	7.35	0.007 1	19.56	
FRFT	280.15	4.20	7.67	0.002 4	22.51	
theoretical value	279.40	4.19	7.50	—	—	

横向对比: 信噪比从-3 dB 到 3 dB, 提高信噪比后, 信号的处理效果明显变好。取输入信噪比的区间为[-3:1:3], 做进一步处理。对每个测量点循环测量 1 000 次, 计算速度相对误差。从图 1 中可以看出,速度相对误差随输入信噪比的增加而逐渐减小;在低信噪比条件下, FRFT 具有良好的参数估计性能,而其他 3 种变换参数估计精确度都不高,WVD 精确度最低;在高信噪比条件下, FRFT,WVD, SPWVD 相对于 STFT 都具有较好的参数估计性能。

对目标位置的输出信噪比估计时,对每一个输入信噪 比对应目标点的输出信噪比循环测量1000次,取平均值, 得到4种变换输出信噪比随输入信噪比变化的关系,见图2。 信号的输出信噪比随输入信噪比的增加而增加,其中 WVD 曲线斜率最大,其他3种变换上升趋势较平缓。可推出在 输入信噪比较高的条件下,WVD 具有较好的相参积累性 能。但在实际应用中,更倾向于输入信噪比较低时具有良 好相参积累性能的信号处理方法,因此 FRFT 和 SPWVD 的 应用更广泛。

图 3 比较了几种相参积累方法的检测概率随信噪比的 变换关系, 虚警概率为 10⁻³。可以看出, 对于任何一种变换, 目标检测概率都随输入信噪比的增加而增加, 且 FRFT 的上 升速率最快, STFT 的速率最慢。在低输入信噪比条件下, FRFT 的目标检测概率最高, 即使在 *R*_{SN}=-5 dB 的条件下, 也能较好地检测出目标(检测概率为 90%以上); SPWVD 的 目标检测概率相比 WVD 有一定的提高, WVD 的目标检测 概率最低。随着信号输入信噪比的增加, FRFT 的检测概率



 Fig.1 Relationship between relative error of speed and input SNR

 图 1 速度相对误差与输入信噪比的关系



图 2 输出信噪比与输入信噪比的关系

达到 100%, WVD 的目标检测概率迅速提高,并超过 SPWVD,达到 100%。原因在于,在高信噪比条件下,噪声影响较小,由于 SPWVD 有平滑处理,其能量聚集性和频率分辨力较 WVD 差。由上述分析可知,每种相参积

累处理方式的相参积累性能不同,能量聚集程度越高,噪 声抑制能力越强,目标检测概率越高。

3 结论

通过仿真研究采样频率、脉冲数和输入信噪比对 STFT, WVD,SPWVD 和 FRFT 4 种信号处理相参积累性能的影响。根据相关参数估计的结果及所得的速度相对误差、输 出信噪比、目标检测概率与输入信噪比的关系曲线,得到 以下结论: a) 脉冲数决定信号相参积累的时间,在相同采 样条件下,所取的脉冲数越多,相参积累性能越好; b) 在 低信噪比条件下,相参积累性能 FRFT>SPWVD>STFT> WVD;在高信噪比条件下,它们相参积累性能差距不大,



Fig.3 Relationship between detection probability and input SNR 图 3 检测概率与输入信噪比的关系

但受时频分辨力的限制,STFT和 SPWVD 稍有劣势。而实际应用中目标信息随时间在变化,积累脉冲数和时长 不宜太长,要综合考虑雷达波束性能和目标背景、距离、运动、速度等特征,在波形设计、脉冲积累数和积累时 长上权衡,达到最优设计。

参考文献:

- [1] 赵彤璐,廖桂生,杨志伟.基于短时迭代自适应-逆Radon 变换的微多普勒提取方法[J].电子学报, 2016,44(3):505-513.
 (ZHAO Tonglu,LIAO Guisheng,YANG Zhiwei. Micro-Doppler extraction based on short-time iterative adaptive approach and inverse radon transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2016,44(3):505-513.)
- [2] ELGAMEL S A, SORAGHAN J. Enhanced monopulse tracking radar using optimum fractional Fourier transform[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2011,5(1):74-82.
- [3] 袁俊泉,皇甫堪,王展. 海洋环境中基于 WVD 的 LFM 信号检测方法[J]. 国防科技大学学报, 2002,24(4):73-76. (YUAN Junquan,HUANGFU Kan,WANG Zhan. A new approach with Wigner-Ville Distribution based on LFM signal detection in the ocean[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2002,24(4):73-76.)
- [4] 席有猷,程乃平,郝建华. 一种 SP & WVD 组合时频分布改进算法[J]. 装备学院学报, 2014,25(4):101-105. (XI Youyou, CHENG Naiping, HAO Jianhua. An improved time-frequency algorithm based on SP & WVD combination distribution[J]. Journal of Equipment Academy, 2014,25(4):101-105.)
- [5] ALMEIDA L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994,42(11):3084-3091.
- [6] 陈小龙,刘宁波,宋杰,等. 海杂波 FRFT 域分形特征判别及动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2011,33(4):823-830.
 (CHEN Xiaolong,LIU Ningbo,SONG Jie, et al. Fractal feature discriminant of sea clutter in FRFT domain and moving target detection algorithm[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011,33(4):823-830.)
- [7] 王美玲,杨承志,吴宏超. 基于 STFT 与 WVD 的雷达信号分析检测方法[J]. 雷达与对抗, 2014,34(4):36-38. (WANG Meiling,YANG Chengzhi,WU Hongchao. Radar signal analysis and detection method based on STFT and WVD[J]. Radar & ECM, 2014,34(4):36-38.)
- [8] YI W. A novel method for sorting unknown radar emitter[J]. Microcomputer Information, 2010,4(1):85-86.
- [9] 武文飞,李跃华,张翼龙. 一种改进的毫米波引信分数阶频谱细化算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):
 259-262. (WU Wenfei,LI Yuehua,ZHANG Yilong. An improved FRFT domain zooming algorithm in MMW LFMCW fuse[J].
 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):259-262.)
- [10] CHEN Xiaolong, GUAN Jian, LIU Ningbo, et al. Maneuvering target detection via Radon-fractional Fourier transform based long-time coherent integration[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2014,62(4):939-953.

作者简介:



孙艳丽(1982-), 女,山东省莱阳市人,硕 士,副教授,研究方向为信号处理.email:sunyan li195710@163.com. **陈小龙**(1985-),男,山东省烟台市人,博士, 副教授,研究方向为雷达动目标检测、海杂波抑制、雷达信号精细化处理等.

柳 叶(1982-),女,山东省烟台市人,硕 士,讲师,研究方向为激光多光谱电离质谱.