2020年10月

文章编号: 2095-4980(2020)05-0813-07

基于实测数据的雷达动目标多变换域积累仿真

孙艳丽,张 海,陈小龙*

(海军航空大学,山东 烟台 264001)

摘 要:针对传统的相参积累方法对匀加速目标能量积累效果不理想的缺点,选取4种典型的 相参积累方法进行仿真,研究不同变换积累方法对匀加速目标线性调频信号积累的特点,并通过 实测S波段对海观测雷达数据比较脉冲数对不同时频分析方法能量积累的差异。结果表明:4种变 化中分数阶Fourier变换(FRFT)的相参积累性能最好,能够有效抑制噪声,估计加速度,具有良好的 时频聚集性,并且在一定范围内随处理脉冲数的增加,相参积累性能进一步提高。

关键词: 雷达动目标; 时频分析; 相参积累

中图分类号:TN957.52 文献标志码:A

doi: 10.11805/TKYDA2019208

Multi-transform domain method for moving target of sea radar based on real radar data

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

Abstract: Aiming at the disadvantage of the conventional phase-coherent accumulation method for uniform acceleration of target energy accumulation, four typical phase-coherent accumulation methods are selected and simulated. The characteristics of different transformation accumulation methods for uniform acceleration target Linear Frequency Modulated(LFM) signal are studied, as well as the differences of energy accumulation in different time-frequency analysis methods by pulse number. The result shows Fractional Fourier Transform(FRFT) can suppress noise effectively, estimate acceleration directly, and has good performance in the time-frequency clustering. The performance of coherent integration is improved further with increase of pulse number within limits.

Keywords: radar moving target; time-frequency analysis; coherent integration

杂波抑制和运动目标检测是雷达信号处理的重要组成部分。对较强杂波背景下一些低速小目标进行检测,由 于目标回波的多普勒频移较小,杂波谱宽较大,采用经典频域技术已很难进行分辨^[1]。若海上目标是匀速或匀加 速度运动,回波可以近似为线性调频信号(LFM)^[2],因此研究 LFM 信号的检测和参数估计对于检测运动目标具有 较大的意义。利用 Wigner-Ville 分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)变换能够很好地实现 LFM 信号的时频域 能量聚集^[3],但此方法运算量大且存在交叉项的干扰。虽然通过时域和频域的加窗平滑伪维格纳-威利分布 (Smoothed Pseudo WVD, SPWVD)可以较好地抑制交叉项,但 SPWVD 又面临分辨力下降和计算量大的问题^[4]。 短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)算法不存在交叉项^[5],但其时频域分辨力受谱窗限制导致检 测性能降低。分数阶 Fourier 变换(FRFT)对 LFM 信号具有良好的能量聚集性,它具有时频旋转性,具备比较完善 的快速离散算法,在进行复杂背景下的动目标检测时,可以比较精确地估计出目标的速度、频率、加速度等参数。 本文对 STFT,WVD,SPWVD 和 FRFT 4 种变换进行仿真分析并采用实测数据进行验证。结果表明分数阶变换域 FRFT 能很好地解决传统时频分析方法的问题,精确获取目标的时频特性,直接估计目标的加速度,具有良好的 相参积累性能。

收稿日期: 2019-06-09; 修回日期: 2019-07-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1933135,61931021);山东省重点研发计划资助项目(2019GSF111004)

作者简介: 孙艳丽(1982-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为信号处理。email:sunyanli195710@163.com

*通信作者: 陈小龙 email:cxlcxl1209@163.com

4 种变换方式原理及仿真分析 1

1.1 STFT 仿真分析

STFT 的表达式为^[6]:

 $STFT_{x}(t,f) = \int x(\tau)g^{*}(\tau-t)e^{-j2\pi f\tau}d\tau$ (1)式中: $x(\tau)$ 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。以 LFM 信号进 行仿真分析, LFM 信号相关参数设置如下:初 始频率 f_0 =200 Hz, 调频率 μ =500, 波长 λ =0.03 m, 采样频率 f_e=800 Hz, 脉冲数 N=256, 设置的噪 声为加性高斯白噪声, 信噪比 R_{sn}=3, 图 1 为该 信号进行短时傅里叶变换的结果。图 1(a)经过



STFT 处理后信号,图1(b)为时频平面的投影,目标相对雷达作匀加速运动,线条明显较粗且比较模糊,其时频 分辨力较低。计算得到目标的加速度为 7.06 m/s², 而加速度的理论值为 7.50 m/s², 这种差异一方面与所取的脉 冲数有关,另一方面是信号加窗限制了其时频分辨力。

1.2 WVD 的仿真分析

维格纳分布定义式为[7]:

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

信号的 WVD 等于以信号自身反向为窗,并对时间和频率进行 2 倍压缩的 STFT。设 LFM 信号为:

250

200 amplitude/V

150

100

50

400

f/Hz

200

$$s(t) = \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}mt^2\right)\right]$$
(3)

250

200

150

100

50

Fig.2 Processing result of WVD

图 2 WVD 相参积累处理结果

0.2

t/s

6/Hz 200

50

100

150

250

300

350

400 0

0.1

0.2

t/s

03

由式(2)得

$$WVD_{s}(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^{*}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi \tau (f_{0} + mt)\tau} e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \delta\left[f - \left(f_{0} + mt\right)\right]$$
(4)

WVD 处理结果见图 2, 图 2(b)为信号经过 WVD 处理后在时频平面的投影图,目标相对 雷达作匀加速运动,线条中间部分非常细,两 边较模糊,中间的时频分辨力较高。在 t=0.08 s 时,信号的频率为 238.43 Hz,对应的瞬时速 度为 3.58 m/s, 信号的中心频率为 277.77 Hz, 估计瞬时速度为 4.16 m/s, 计算得到目标的加 速度为 7.25 m/s^2 。可见 WVD 的时频分辨性能 要远远优于 STFT, WVD 在处理信噪比较高的 单分量 LFM 信号时,具有良好的处理效果。

1.3 SPWVD 的仿真分析

SPWVD 是对 WVD 的进一步处理,采取 平滑和加窗的形式^[8],其定义式为:

$$SPWVD_{x}(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(u)h(\tau)x\left(t-u+\frac{\tau}{2}\right)x^{*}\left(t-u-\frac{\tau}{2}\right)e^{-j2\pi f \tau} du d\tau$$
(5)

0

式中: g(u)和 $h(\tau)$ 为对信号所加的窗函数; x(t)为待处理的信号。

进行SPWVD的结果见图3。由于其采取了平滑加窗处理,相比WVD其峰值平缓了很多,与STFT有一定的相 似度。可以看出信号与噪声的空间分布情况,噪声幅度已被压制。右图可以看出目标相对雷达作匀加速运动,时 频分辨力相对STFT较高。在t=0.08 s时,信号的频率为238.43 Hz,对应的瞬时速度为3.58 m/s,中间时刻t=0.16 s 时,信号的频率为277.65 Hz,对应的瞬时速度为4.16 m/s,可以计算得到目标的加速度为7.35 m/s²。

第5期

1.4 FRFT 的仿真分析

FRFT 是一种广义的傅里叶变换形式,基本 定义式为:

$$X_{\alpha}(u) = F^{P}[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)K_{\alpha}(t,u)dt$$
 (6)
式中: F^{P} 为 FRFT 算子; p 为 FRFT 变换的阶数;
 $K_{\alpha}(t,u)$ 为核函数; $\alpha = p\pi/2$ 为旋转角度。 p 的取
值不同,旋转角度也不同,相应的 FRFT 的性质
也会随之而变。将信号的时间轴 t 和频率轴 ω 绕
原点逆时针旋转 α 角,得到分数阶傅里叶变换域
的 u 轴和 p 轴^[9-10]。实际上,它是一种由时域到
频域的连续时频分析方法,展现了信号从时域到
频域的所有变化信息,可以更充分、更准确地进
行参数估计和信号分析。

进行 FRFT 的结果见图 4。图 4(a)为 LFM 信 号经过 FRFT 处理后得到的阶数 p,u 和幅度的三 维图。从图中可以非常明显地看出峰值对应的阶 数 $p_0=1.123$, $u_0=3.984$ 。根据式(7)~式(8)可以对 目标的初始频率 f_0 和调频率 μ 进行估计:

$$f_0 = \frac{u_0 \csc\left(p_0 \times \frac{\pi}{2}\right)}{S}$$
(7)
$$\mu = -\frac{\cot\left(p_0 \times \frac{\pi}{2}\right)}{S^2}$$
(8)



式中 S 为归一化因子。

由此可以得到目标的初始频率估计为 f_0 =202.99 Hz, 调频率 μ 估计为 489.12。进一步求得目标的初始速度 v_0 =3.04 m/s, 加速度 a=7.34 m/s²。原始信号初始频率的理论值为 200 Hz, 初始速度的理论值为 3 m/s, 调频率的 理论值为 500。通过比较, FRFT 参数估计的结果与理论值存在较小的误差,这种误差主要与信号积累的时间有 关,在其他条件不变的情况下,信号长度越长,积累时间越长,处理结果的精确性越高。另外,这种误差还与阶 数步进参数的设置有关,步进参数设置越小,处理结果越精确,但同时也会导致运算量成倍增加。从图 4(b)二维 平面图中看到信号集聚于一点,可以直接估读出信号的加速度、中心频率等参数。总体上看,FRFT 对于处理 LFM 信号具有非常高的适用性,相比其他时频变换方法,它的优势是时频聚集性较高,噪声抑制性能较好并且可以直接估计信号的中心频率、调频率、加速度等参数,是一种良好的时频分析工具。

2 实测数据的仿真与验证分析

本文采用 S 波段对海观测雷达,该雷达为全相参脉冲体制,采用岸基固定架设方式,HH 极化天线波束宽度 <5°,距离分辨力为 60 m。针对雷达海上实测数据进行回波信号的预处理操作和 STFT,WVD,SPWVD,FRFT。首先对回波信号进行动目标显示(Moving Target Indication, MTI)处理,在 MTI 基础上,对回波信号进行 MTD 处理,得到目标在距离单元为 80 时,对应的多普勒频率为 61.96 Hz,进而求出目标的速度约为 3.098 0 m/s。

对回波信号进行时频域的仿真分析,提取目标所在的距离单元的数据,分别进行 STFT,WVD,SPWVD 和 FRFT 4 种变换,脉冲数区间为[22 500,22 755]得到的处理结果见图 5~图 8。

图 5~图 8 分别为实测数据经过 4 种变换处理后,得到的三维图、时频二维图、中间时刻的瞬时频谱图,可以直观地看到目标和海杂波的分布情况,目标的多普勒频移在 60 Hz 左右,海杂波的多普勒频移主要在 0~50 Hz 之间。时频图中目标信号斜率较小,加速度较小。

LFM 信号经过 FRFT 处理后,目标具有一定的峰值宽度,对应的尖峰宽度定义为:

$$D = \frac{2\pi}{T} \sin \alpha_0 \tag{9}$$

式中 T 为观测信号的时长。对于 STFT,WVD 和 SPWVD,本质上属于傅里叶变换,对应的分数阶阶数为 1,故 $\alpha_0 = 90^\circ$;对于 FRFT, α_0 为能量集聚的最佳变换角。

$$R_{\rm SN,out} = 10 \lg \frac{\frac{1}{2d} \left| \sum_{i=m-d}^{m+d} y(i) \right|^2}{\frac{1}{N-2d} \left[\sum_{i=1}^{m-d} \left| y(i) \right|^2 + \sum_{i=m+d}^{N} \left| y(i) \right|^2 \right]}$$
(10)

式中: *m* 为目标峰值所在的位置; *d* 为峰值宽度的一半; *y*(*i*)为经过处理后的信号; *N* 为信号的长度。考虑到 WVD 处理的时频聚集性较高, 它的尖峰宽度近似取 FRFT 尖峰宽度。



Fig.7 Processing result of SPWVD at pulse number interval [22 500,22 755] 图 7 脉冲数区间为[22 500,22 755]SPWVD 处理结果



g.8 Processing result of SPWVD at pulse number interval [22 500,22 75] 图 8 脉冲数区间为[22 500,22 755]FRFT 处理结果

具体参数的估计结果如表 1 所示,整体参数估计的误差都比较小, SPWVD 和 FRFT 的杂波抑制性能比 STFT 和 WVD 要好, STFT 和 SPWVD 的时频分辨力较低, FRFT 的输出信杂比最高。

Table1 Processing results of measured data at pulse number interval [22500,22755]											
	central frequency estimation/Hz	transient velocity estimation/(m s ⁻¹)	target peak	clutter peak	peak value difference	output SNR/dB	running time/s				
STFT	61.96	3.098 0	1	0.46	0.54	15.48	0.38				
WVD	62.35	3.117 7	1	0.76	0.24	14.33	0.43				
SPWVD	61.57	3.078 4	1	0.29	0.71	18.62	0.89				
FRFT	61.96	3.098 1	1	0.25	0.75	20.73	0.93				

表 1 脉冲数区间为[22 500,22 755]时, 实测数据的处理结果 e1 Processing results of measured data at pulse number interval [22500,2275

将数据量从 256 增加到 512,选取脉冲数区间为[22 400,22 911],进行变换的结果见图 9~图 12。 将 2 次的处理结果进行比较,4 种变换在脉冲数区间为[22 400,22 911]时的处理效果明显要比脉冲数区间为

[22 500,22 755]时的好,杂波抑制能力明显提高,且 STFT 和 SPWVD 的时频分辨力也有较大的提高。

表 2 为相关参数估计的结果,与表 1 对比,海杂波的峰值幅度明显下降,目标与海杂波的峰值差增加,输出 信杂比也有一定的提高。可见,增加脉冲数,可以增加信号处理的数据量,延长信号相参积累的时间,能够有效 提高信号的相参积累性能。

表2 脉冲数区间为[22 400,22 911]时,实测数据的处理结果

Table2 Processing results of measured data at pulse number interval [22 400,22 911]										
	central frequency estimation/Hz	transient velocity estimation($m \cdot s^{-1}$)	target peak	clutter peak	peak value difference	output SNR/dB				
STFT	62.23	3.111 5	1	0.38	0.62	20.23				
WVD	61.64	3.082 2	1	0.47	0.53	18.94				
SPWVD	61.64	3.082 2	1	0.14	0.86	19.39				
FRFT	61.45	3.072 5	1	0.10	0.90	23.33				



Fig.9 Processing result of STFT at pulse number interval [22 400,22 911] 图 9 脉冲数区间为[22 400,22 911]STFT 处理结果图



3 结论

从原理分析及仿真可以得到 FRFT 对于处理 LFM 信号具有非常高的适用性,相比其他时频变换方法,它的 优势是时频聚集性较高,噪声抑制性能较好,并且可以直接估计信号的中心频率、调频率、加速度等参数,是一 种良好的时频分析工具。从实测数据的处理结果看,4种变换中 FRFT 的相参积累性能最好,并且增加信号处理 的脉冲数,可以有效提高相参积累性能。而实际应用中目标信息随时间在变化,积累脉冲数不宜太大,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^[10]。

参考文献:

- [1] 陶然,邓兵,王越. 分数阶傅里叶变换及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009. (TAO Ran, DENG Bing, WANG Yue. Fractional Fourier Transform and Its Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.)
- [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] SUN Hongbo,LIU Guosui,GU Hong. Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002,38(4):1416-1424.
- [4] LYU Xiaolei,XING Mengdao,ZHANG Shouhong, et al. Keystone transformation of the Wigner-ville distribution for analysis of multicomponent LFM signals[J]. Signal Processing(Elsevier), 2009,89(5):791-806.
- [5] 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.
- [6] DURAK L, ARIKAN O. Short-time Fourier transform two fundamental properties and an optimal implementation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003,51(5):1231-1242.
- [7] 陈小龙,关键,于晓涵,等. 雷达动目标短时稀疏分数阶傅里叶变换域检测方法[J]. 电子学报, 2017,45(12):3030-3036. (CHEN Xiaolong,GUAN Jian,YU Xiaohan,et al. Radar detection for moving target in short-time sparse fractional Fourier transform domain[J]. ACTA Electronica Sinica, 2017,45(12):3030-3036.)
- [8] 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.)
- [9] LI Xiaolong, CUI Guolong, YI Wei, et al. Radar maneuvering target detection and motion parameter estimation based on TRT-SGRFT[J]. Signal Processing, 2016(133):107-116.
- [10] 孙艳丽,陈小龙,柳叶. 雷达动目标变换域相参积累检测及性能分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(3):
 293-298. (SUN Yanli,CHEN Xiaolong,LIU Ye. Detection and performance analysis of radar coherent integration for moving target in transform domain[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(3):
 293-298.)

(上接第 812 页)

- [4] 常新亚,张立华,陶成华. 三星时差定位系统的目标定位精度分析[J]. 航天器工程, 2007,16(4):121-126. (CHANG Xinya,ZHANG Lihua,TAO Chenghua. Analysis of location accuracy based on tri-satellite time-difference location system[J]. Spacecraft Engineering, 2007,16(4):121-126.)
- [5] 陈永光,孙仲康. 基于距离差和方位角信息的运动辐射源跟踪算法[J]. 电子学报, 1995,23(1):99-102. (CHEN Yongguang, SUN Zhongkang. A tracking algorithm of moving emitter based on distance difference and azimuth information[J]. Acta Electronica Sinica, 1995,23(1):99-102.)
- [6] 陈思剑,张旻,罗争.基于几何精度衰减因子的单站无源定位精度分析方法[J]. 探测与控制学报, 2011,33(6):27-32. (CHEN Sijian,ZHANG Min,LUO Zheng. A precision analysis method of the fixed single observer passive location based on geometric dilution of precision[J]. Journal of Detection & Control, 2011,33(6):27-32.)
- [7] 张政超,童力.四站时差无源定位精度分析[J].中国电子科学研究院学报,2010,5(6):582-585. (ZHANG Zhengchao, TONG Li. Precision analysis of passive location of 4-stations based on TDOA[J]. Journal of China Acadewy of Electronics and Information Technology, 2010,5(6):582-585.)
- [8] 任源博.四星时差定位精度分析[J]. 电子科技, 2015,28(6):24-27. (REN Yuanbo. Precision analysis of 4-satellite location based on TDOA[J]. Electronic Science and Technology, 2015,28(6):24-27.)
- [9] 王卓群,李亚军,李雁斌,等.考虑电离层对 GEOSAR 影响的改进 CS 成像算法[J]. 上海航天, 2018,35(6):98-102.
 (WANG Zhuoqun,LI Yajun,LI Yanbin, et al. CS imaging method for geosynchronous SAR considering to ionospheric effects[J]. Aerospace Shanghai, 2018,35(6):98-102.)
- [10] WANG Zhuoqun,LI Yajun,SHAO Sheng, et al. Effect of atmosphere on GEOSAR focusing performance[C]// IET International Radar Conference. Nanjing, China: IET, 2018:1-5.