

DOI: 10.12086/oe.2018.170702

快速高分辨稀疏 FRFT 雷达机动目标检测方法

于晓涵, 陈小龙*, 陈宝欣, 黄勇, 关键

海军航空大学, 山东 烟台 264001

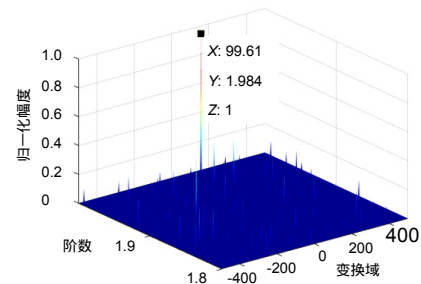
摘要: 数据量的增加及新体制雷达的发展, 对雷达探测技术提出了更高的要求。经典检测方法具有其优势, 但同时也存在很多局限性, 迫切需要创新雷达机动目标检测方法以提升复杂背景和有限雷达资源条件下的雷达目标探测性能。该文介绍了稀疏傅里叶变换(SFT)的基本概念, 在其基础上对稀疏分数阶傅里叶变换(SFRFT)的实现方法进行了系统描述。然后将 SFRFT 算法应用于雷达信号处理中, 提出了基于快速高分辨稀疏 FRFT 的雷达机动目标检测算法, 为雷达机动目标探测能力的提高提供了新的思路。

关键词: 雷达信号处理; 机动目标检测; 稀疏傅里叶变换; 稀疏分数阶傅里叶变换; 稀疏时频分析

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

引用格式: 于晓涵, 陈小龙, 陈宝欣, 等. 快速高分辨稀疏 FRFT 雷达机动目标检测方法[J]. 光电工程, 2018, 45(6): 170702



Radar maneuvering target detection method based on fast and high resolution sparse fractional Fourier transform

Yu Xiaohan, Chen Xiaolong*, Chen Baoxin, Huang Yong, Guan Jian

Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract: With the increase of data volume and the rapid development of modern radar, more requirements are put forward for radar target detection technology. There are both advantages and limitations of classical radar detection methods. Innovative methods are urgently needed to improve the radar target detection performance under complex background and limited radar resources. The main purpose of this paper is to illustrate the implementation of sparse fractional Fourier transform (SFRFT), which is developed on the basis of sparse Fourier transform (SFT). Besides, the SFRFT algorithm is applied to radar signal processing and a SFRFT-based fast and high resolution detection method is proposed to improve the detection performance of radar maneuvering target. It is expected that the method can provide a new way for radar moving target detection.

Keywords: radar signal processing; maneuvering target detection; sparse Fourier transform; sparse fractional Fourier transform; sparse time-frequency analysis

收稿日期: 2017-12-20; 收到修改稿日期: 2018-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(61501487, U1633122, 61471382, 61531020); 国防科技基金项目(2102024); 山东省高校科研发展计划(J17KB139); “泰山学者”和中国科协“青年人才托举工程”(YESS20160115)专项经费资助

作者简介: 于晓涵(1991-), 女, 博士研究生, 主要从事雷达机动目标检测、海杂波抑制等方面的研究。E-mail: yxhyx0803@163.com

通信作者: 陈小龙(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事雷达机动目标检测、海杂波抑制、雷达信号精细化处理等方面的研究。E-mail: cxlxl1209@163.com

Citation: Yu X H, Chen X L, Chen B X, *et al.* Radar maneuvering target detection method based on fast and high resolution sparse fractional Fourier transform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(6): 170702

1 引言

复杂环境下运动目标的快速有效检测一直是雷达信号处理领域的难题,在军事和民用方面都具有重要意义和很高的研究价值^[1]。受强杂波背景、低雷达分辨率、远距离以及其他因素的影响,无论是在时域或频域,回波的信噪/杂比(signal-to-noise/clutter ratio, SNR/SCR)都很低,导致检测性能严重下降^[2]。目前,常用的目标检测方法大致可以分为基于统计的检测方法^[3]、非线性分析方法^[4]、时频分析类方法等。传统的基于统计建模的检测方法以杂波统计分布模型为基础,在复杂环境下由于模型失配可能达不到预期的检测效果。非线性分析方法采用特征参数来区分杂波和目标,在低 SNR 条件下,往往难以实现运动目标的可靠检测。

通常,雷达回波信号是一种非平稳信号,其频率随时间不断变化,采用时频分析类方法可有效提升对非平稳信号的检测性能。在某些场景下,匀加速机动目标的雷达回波可以建模为线性频率调制(linear frequency modulation, LFM)信号^[5]。作为 Fourier 变换(Fourier transform, FT)的一般形式,分数阶 Fourier 变换(fractional Fourier transform, FRFT)^[6-8]对 LFM 信号具有很好的能量聚集性,在低 SCR 情况下,采用 FRFT 进行动目标检测(moving target detection, MTD)和参数估计,具有较高的可靠性^[9-10]。但是,由于雷达观测范围广,回波数据量大,新体制雷达在提高信号采样质量的同时进一步增加了数据量,对算法的实时处理提出了极高的要求,亟需创新分数域雷达动目标检测技术,研究高时频分辨率、大数据量高效的分数域信号分析方法,提高复杂背景条件下的雷达动目标探测性能^[11]。

近年来,麻省理工学院的四位学者提出了稀疏 Fourier 变换(sparse Fourier transform, SFT)^[12-13]的概念。SFT 是一种稀疏信号离散 Fourier 变换新算法,比传统快速 Fourier 变换(fast Fourier transform, FFT)更加高效,对于一个频谱稀疏的 N 点大尺寸输入信号, SFT 可将 FFT 的计算复杂度降低至 $O(K \log_2 N)$,其中 K 为频域大值系数的数量^[14]。在各类离散 FRFT 方法中, Pei 提出的方法^[15]计算复杂度最低,其性能可采用 SFT

进行进一步优化。假设某 LFM 信号在分数域具有稀疏特性,为提高其时频分析速度,北京理工大学陶然教授等人结合 SFT 的优势对 Pei 的方法进行重新设计,研究了一种新的快速算法—稀疏 FRFT(sparse fractional Fourier transform, SFRFT)^[16-17],进一步降低了离散 FRFT 的复杂度。SFRFT 是在 FRFT 的理论基础上设计实现的,而且雷达目标回波可看作少数强散射中心的叠加,回波具有稀疏特性^[18],所以 SFRFT 同样适用于雷达机动目标检测。如同 FFT 促进了傅里叶变换的应用,通过引入 SFRFT 可以提升 FRFT 方法的检测性能。文献[8]利用动目标回波信号具有稀疏性的特点,将稀疏分解的局部优化思想引入时频分析,建立了稀疏时频分布(sparse time-frequency distribution, STFD)目标特性分析方法的理论框架,本文在此基础上,将 SFRFT 算法应用于雷达信号处理,获得目标回波的稀疏分数域高分辨表示,在稀疏分数域进行雷达机动目标检测,其检测性能远好于传统的动目标检测,相比 FRFT 检测方法,也可达到运算效率、时频分辨力和参数估计精度的有效提高。仿真实验验证了算法的有效性。

2 SFRFT 原理及实现

由于 SFRFT 算法是在 SFT 算法的基础上设计的,在具体介绍其原理之前,本节首先对 SFT 的相关概念进行介绍。

2.1 SFT

在实际应用中,很多信号的频谱具有稀疏特性,也就是说除少数大值点外大多数频域系数都为零或几乎可忽略不计。SFT 的核心思想是对信号频域系数进行“分筐”,由于信号在频域是稀疏的,每个筐中很可能只包含一个大值系数^[12],通过“分筐”操作将 N 点长序列转化成 B 点短序列并作离散 FT, B 为筐的数量。然后将不包含大值系数的筐忽略,并根据“分筐”规则设计相应的重构算法来重建原始信号。SFT 的理论框架主要包括频谱重排,窗函数滤波,降采样 FFT 等关键技术。

1) 频谱重排。为避免多个频域大值系数出现在同一个筐中,需对信号频谱随机重排,使大值点分散开。假设输入信号 $x(n)$,通过重置时域信号来实现重排,

即：

$$r(n) = x((\sigma \cdot n) \bmod N), n \in [1, N] \quad (1)$$

其中： $\sigma \in [1, N]$ 为随机奇数(若为偶数，则无法遍历所有单元)， \bmod 表示取余数运算，设 $X(m)$ 和 $R(m)$ 分别为 $x(n)$ 和 $r(n)$ 的频域表示形式，通过证明可以得到二者的关系为

$$R(m) = X((\sigma^{-1} \cdot m) \bmod N), m \in [1, N] \quad (2)$$

其中： σ^{-1} 表示关于模 N 的数论倒数，当 σ 与 N 互质时，存在整数 σ^{-1} 使得 $(\sigma\sigma^{-1}) \bmod N = 1$ 。

2) 窗函数滤波。SFT 中的“分筐”操作是通过以带宽为 N/B 的滤波器 f 对频段进行划分实现的。为提高算法运算效率，要求该滤波器的时域和频域都具备良好的聚集性，即时域有效长度仅为一小部分，频域除通带外均可忽略不计。平坦窗函数滤波器^[12]很好地满足了上述性能，其频域表示为

$$F(m) \in \begin{cases} \text{supp}(f) \subseteq [-\omega/2, \omega/2] \\ [1-\delta, 1+\delta], m \in [-\varepsilon'N, \varepsilon'N] \\ [0, \delta], m \notin [-\varepsilon'N, \varepsilon'N] \end{cases} \quad (3)$$

其中： ω 为窗函数长度， ε' 和 ε 分别表示通带截断因子和阻带截断因子， δ 表示震荡波纹。

3) 降采样 FFT。对滤波后的信号进行采样来获得极大值点，定义信号 $s(n) = r(n) \cdot f(n)$ ， $n \in [1, N]$ ，假设 N 可以被整数 B 整除，则：

$$\begin{aligned} Y(m) &= \text{FFT}\{y(n)\} \\ &= \text{FFT}\left\{\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{\omega}{B} \rfloor - 1} s(n+iB)\right\}, n \in [1, B] \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整运算， $Y(m)$ 为 $y(n)$ 的频域表达形式，通过证明可得

$$Y(m) = S(m \cdot N/B), m \in [1, B] \quad (5)$$

因此，通过时域混叠可实现间隔 N/B 的降采样。

2.2 SFRFT

根据 Pei 采样类离散分数阶 Fourier 变换(discrete fractional Fourier transform, DFRFT)方法，如果 $\alpha \neq Q\pi$ (α 表示旋转角度， Q 为整数)，离散 FRFT 可分解为一次 FFT 运算加两次 Chirp 乘法运算^[15]，因此 SFRFT 的基本思想是将离散 FRFT 的 FFT 阶段用 SFT 替换。假设 $z(n)$ 为原始输入信号，则 2.1 小节中的 $x(n)$ 可以表示为

$$x(n) = z(n) \cdot e^{\frac{j}{2} \cot \alpha n^2 \Delta t^2}, n \in [1, N] \quad (6)$$

其中 Δt 为时域采样间隔。

信号经过频谱重排，窗函数滤波以及频域降采样后，由 B 点 FFT 结果确定各大值点的值及所在筐的位置，然后根据分筐规则设计相应的重构方法得到各大值点在原频谱中的坐标，进而估计出较为精确的近似值。哈希映射^[12]是一种有效的重构方法，定义一个哈希函数

$$h_\sigma(m) = \lfloor \sigma \cdot m \cdot B/N \rfloor \quad (7)$$

其中 $h_\sigma(m)$ 代表“分筐”规则，由频谱重排和滤波窗函数共同决定。通过定位循环找到频域大值系数位置坐标，将 $Y(m)$ 中 dK 个极大值对应的坐标 m 归入集合 J 中，其中 K 为信号稀疏度，需根据具体应用场景预先进行设置， d 为稀疏度增益(可调参数，参考值为 2)，通过哈希反映射得到 J 的原像：

$$I_r = \{m \in [1, N] | h_\sigma(m) \in J\} \quad (8)$$

对于每个 $m \in I_r$ ，用式(9)估计各个极大值的频域系数：

$$\hat{X}(m) = \begin{cases} \frac{Y(h_\sigma(m)) e^{-j\pi o_\sigma(m)\omega/N}}{F(o_\sigma(m))}, m \in I_r \\ 0, m \in [1, N] \cap \bar{I} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $o_\sigma(m) = \sigma \cdot m - h_\sigma(m) \cdot N/B$ 表示偏移量，取估值循环的中值作为 $\hat{X}(m)$ 的估计值，即：

$$\begin{aligned} X_{\text{med}}(m) &= \text{median}_{l_{\text{est}}} \left\{ \text{Re} \left\{ \hat{X}(m) \right\} \right\} \\ &\quad + j \cdot \text{median}_{l_{\text{est}}} \left\{ \text{Im} \left\{ \hat{X}(m) \right\} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 l_{est} 为估值循环次数。最后，将 $X_{\text{med}}(m)$ 与另一个 Chirp 函数相乘，得到 SFRFT 算法的最终输出 $\hat{Z}_p(m)$ ， p 为阶数。

3 基于 SFRFT 的机动目标检测

在雷达发射单频信号或 LFM 信号的情况下，雷达回波可以近似为 LFM 信号^[10]。假设雷达工作于跟踪模式，海面上有一目标正朝向雷达运动，其加速度和初始速度分别为 a 和 v_0 ，在观测时间 T 内，对海杂波中单个运动目标的雷达回波可以建立如下模型：

$$\begin{aligned} z(t) &= S_i(t) + c(t) \\ &= A(t) \exp[j2\pi f_0 t + j\pi \mu_0 t^2] + c(t), |t| \leq T \end{aligned} \quad (11)$$

其中： $S_i(t)$ 表示目标信号， $A(t)$ 为信号幅度， $\mu_0 = 2a/\lambda$ 为调频率， λ 表示雷达发射信号中心频率的波长， $f_0 = 2v_0/\lambda$ 为与目标速度相对应的中心频率， $c(t)$ 表示海杂波。

基于 SFRFT 的动目标检测和参数估计方法主要包括以下四个步骤，如图 1 所示。

1) 雷达回波解调和脉冲压缩，以实现距离维高分辨力，并选取待检测距离单元。

2) SFRFT 运算，主要包括频谱重排、窗函数滤波、FFT 降采样、频谱重构和两次 Chirp 信号乘积等过程。需要指出的是，因为 SFRFT 算法是基于 Pei 采样类 DFRFT 算法提出的，在 Pei 的算法中， $\sin \alpha < 0$ 时，需将算法中的 FFT 用逆 FFT 替换；同样，SFRFT 算法也要进行此操作，即：如果 $\sin \alpha < 0$ ，需将式(4)中的 FFT 运算用逆 FFT 替代。

3) 遍历所有距离搜索单元，在 SFRFT 域进行目标检测，通过将 SFRFT 输出结果与自适应检测阈值相比较确定目标有无，并通过峰值点的二维搜索确定最佳变换角度。

4) 运动目标参数估计，根据 SFRFT 域目标检测后剩余峰值点对应坐标估计调频率和中心频率，如式(12)和式(13)所示，进而通过前文中描述的调频率、中心频率与目标加速度、初始速度的对应关系得到其估计值 \hat{a} 和 \hat{v}_0 。

$$\{p_0, m_0\} = \arg \max_{p, m} |\hat{Z}_p(m)|, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \hat{\mu}_0 = -\cot(p_0\pi/2) \\ \hat{f}_0 = m_0 \\ \hat{A}(t) = \text{Re} \left[z(t) \exp \left(-2j\pi\hat{f}_0 t + j\pi\hat{\mu}_0 t^2 \right) \right] \end{cases}, \quad (13)$$

其中： \hat{f}_0 ， $\hat{\mu}_0$ 和 $\hat{A}(t)$ 分别为中心频率、调频率和幅度估计值， $\text{Re}\{\cdot\}$ 表示复杂信号的实部。

4 实验结果与分析

通过仿真实验，将 SFRFT 域机动目标检测方法与 Pei 采样类 DFRFT 检测方法以及 MTD 的检测结果进行对比，进而对所提方法的检测性能进行分析与验证。假设雷达为相参体制，其工作波长为 3 cm，在复高斯噪声背景下，目标初始径向速度 $v_0=1.5$ m/s，机动加速度 $a=0.6$ m/s²，回波信号经过匹配滤波，得到混频后的零中频数据，回波模型为式(11)，采样点数 $N=8192$ ，采样频率 $f_s=1000$ Hz，仿真满足采样定理，因目标数量为 1，将稀疏度 K 设置为 1。表 1 列出了具体的仿真参数，通过计算可得，观测时长 $T=8.192$ s，回波信号中心频率 $f_0=100$ Hz，调频率 $\mu_0=40$ Hz/s。

分别采用 SFRFT 检测器、DFRFT 检测器以及 MTD 方法对仿真信号进行处理，变换阶数 p 的步长为 0.001，变换范围为 [1.8, 2.0]，在高斯杂波背景下对算法的检测性能进行分析。图 2 给出了 SNR=-3 dB 时三种方法的

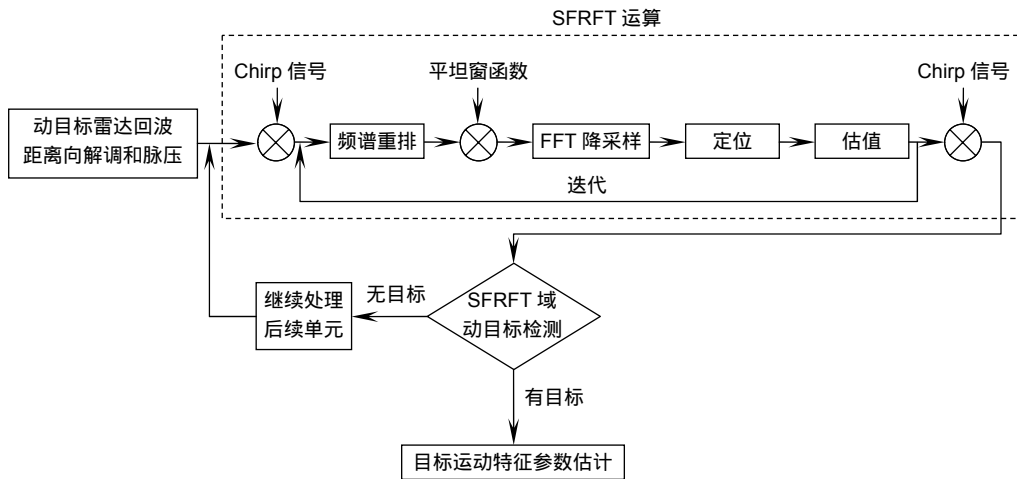


图 1 基于 SFRFT 动目标检测方法流程

Fig. 1 Flowchart of SFRFT-based moving target detection method

表 1 仿真参数说明

Table 1 Description of the simulation parameters

观测时长/s	采样频率/Hz	工作波长/m	f_0 /Hz	μ_0 /(Hz/s)	大值个数 K
8.192	1000	0.03	100	40	1

处理结果对比,其中图 2(a)和图 2(b)分别为仿真信号的 DFRFT 域和 SFRFT 域处理结果,图 2(c)和图 2(d)分别为二者的最佳变换域($p=1.984$)结果,图 2(e)为 MTD 结果。从图中可以看出,经 MTD 处理后,目标淹没在噪声中,能量分布较为分散,集聚效果不理想,最大峰值点坐标为(110.5 Hz, 1),与 f_0 相差甚远;相较于 MTD,DFRFT 和 SFRFT 算法对于目标信号都具有较好的能量聚集性,但 SFRFT 方法能够获得更高的时频分辨力,对杂波具有更好的抑制效果。图 3 为 SNR=-5 dB 时三种方法的处理结果对比,从中可以看出,SNR 降低时,分析 MTD 处理结果,目标完全淹没在噪声中,无法进行进一步的参数估计,SFRFT 方

法的检测性能虽然也有所下降,但仍能在 -5 dB 左右很好地检测出目标。

进一步对 SFRFT 算法的检测性能进行定量分析,分别计算三种检测方法的中心频率、调频率估计值与真实值的绝对误差 Δf_0 、 $\Delta \mu_0$ ($\Delta f_0 = |f_0 - \hat{f}_0|$, $\Delta \mu_0 = |\mu_0 - \hat{\mu}_0|$),并统计计算时间。表 2 列出了具体的比较结果(SNR=-3 dB),通过对比可知:在较低 SNR 下,MTD 方法对于目标中心频率的估计误差非常大,且无法对调频率进行估计;两种分数域处理方法都能有效检测出目标,但 SFRFT 方法的杂波抑制能力更强,参数估计性能优于经典的 Pei 采样类 DFRFT 方法;此外,SFRFT 方法的运算量低于 DFRFT,可采用 SFRFT

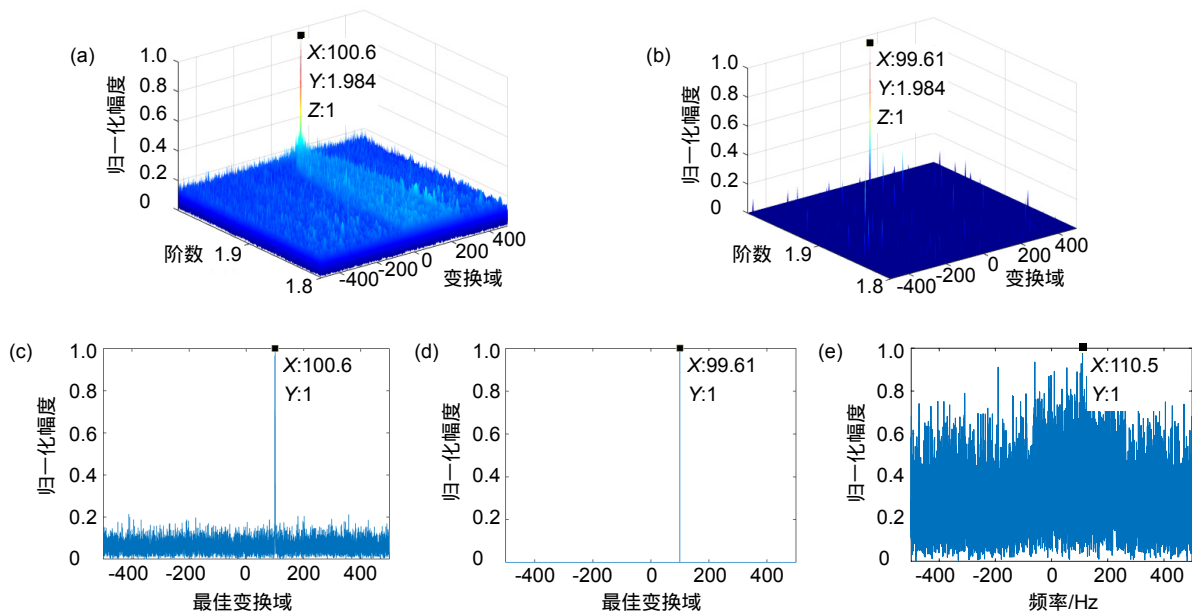


图 2 DFRFT、SFRFT、MTD 处理结果对比(SNR=-3 dB)。(a) DFRFT 处理结果; (b) SFRFT 处理结果; (c) DFRFT 最佳变换域($p=1.984$); (d) SFRFT 最佳变换域($p=1.984$); (e) MTD 结果

Fig. 2 Comparison of DFRFT, SFRFT and MTD results (SNR=-3 dB). (a) Result of DFRFT; (b) Result of SFRFT; (c) The optimal transformation of DFRFT ($p=1.984$); (d) The optimal transformation of SFRFT ($p=1.984$); (e) Result of MTD

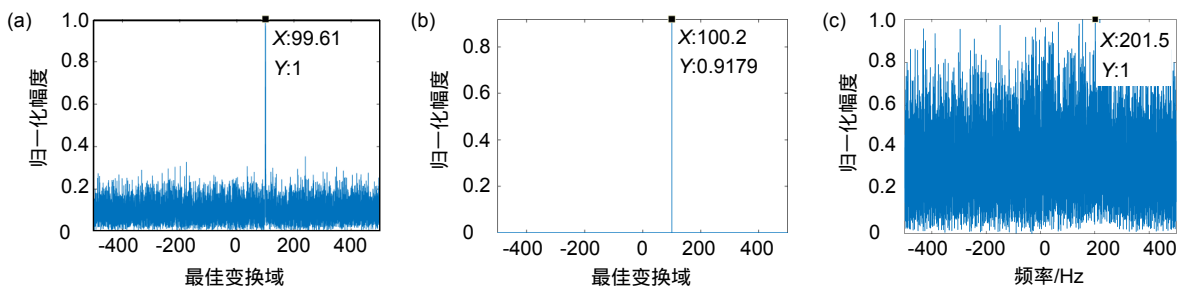


图 3 DFRFT、SFRFT、MTD 处理结果对比(SNR=-5 dB)。(a) DFRFT 最佳变换域($p=1.984$); (b) SFRFT 最佳变换域($p=1.984$); (c) MTD 结果

Fig. 3 Comparison of DFRFT, SFRFT and MTD results (SNR=-5 dB). (a) The optimal transformation of DFRFT ($p=1.984$); (b) The optimal transformation of SFRFT ($p=1.984$); (c) Result of MTD

表 2 SFRFT、DFRFT、MTD 检测性能比较(SNR=-3 dB)

Table 2 Detection performance comparison of SFRFT, DFRFT and MTD (SNR=-3 dB)

	目标峰值	\hat{f}_0 /Hz	$\hat{\mu}_0$ /(Hz/s)	Δf_0 /Hz	$\Delta \mu_0$ /(Hz/s)	计算时间*/ms
SFRFT	1	99.61	39.7804	0.39	0.2196	49.5
DFRFT	1	100.6	39.7804	0.6	0.2196	62.8
MTD	1	110.5	—	10.5	—	29.4

*计算机配置：Intel Core i7-4790 3.6G Hz CPU；16G RAM；Matlab R2016a，计算时间为算法一次运算时间

方法提高其运算效率。综合上述分析可知，将 SFRFT 应用于雷达目标检测可有效提升机动目标检测性能，但是，由于 SFRFT 处理结果受大值系数估计方法、滤波窗函数选择等诸多因素的影响，算法的稳健性有待进一步提高。

5 结 论

稀疏时频分析方法具有运算效率高、时频分辨力好、抗杂波等优势，为雷达动目标检测提供了新的思路。本文在介绍 SFT 算法关键技术的基础上，对 SFRFT 算法的实现过程进行了系统描述，然后将其应用于雷达信号处理中，研究了高分辨稀疏分数域雷达机动目标检测方法。仿真实验结果表明，相比传统 FRFT 域动目标检测方法和 MTD 方法，算法的检测性能和杂波抑制能力得到了有效改善。后续将考虑结合经典雷达目标检测方法，对算法的稳健性进行进一步提高。同时，把该方法与目标识别算法结合起来并逐步应用于实际的雷达系统，也是下一步要努力的方向。

参考文献

[1] Zuo L, Li M, Zhang X W, et al. An efficient method for detecting slow-moving weak targets in sea clutter based on time-frequency iteration decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(6): 3659–3672.

[2] Chen X L, Liu N B, Wang G Q, et al. Gaussian short-time fractional Fourier transform based detection algorithm of target with micro-motion at sea[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, **42**(5): 971–977.
陈小龙, 刘宁波, 王国庆, 等. 基于高斯短时分数阶 Fourier 变换的海面微动目标检测方法[J]. *电子学报*, 2014, **42**(5): 971–977.

[3] Greco M, Stinco P, Gini F, et al. Impact of sea clutter nonstationarity on disturbance covariance matrix estimation and CFAR detector performance[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, **46**(3): 1502–1513.

[4] Luo F, Zhang D T, Zhang B. The fractal properties of sea clutter and their applications in maritime target detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, **10**(6): 1295–1299.

[5] Chen X L, Song J, Guan J, et al. Moving target detection at sea based on fractal characters in FRFT domain[C]//*Proceedings of 2011 IEEE Radar Conference*, 2011: 1–5.

[6] Lu M F, Ni G Q, Bai T Z, et al. A novel method for suppressing

the quantization noise based on fractional Fourier transform[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, **35**(12): 1285–1290.

鲁滨峰, 倪国强, 白廷柱, 等. 基于分数阶傅里叶变换的量化噪声抑制方法[J]. *北京理工大学学报*, 2015, **35**(12): 1285–1290.

[7] Wu J M, Lu M F, Tao R, et al. Improved FRFT-based method for estimating the physical parameters from Newton's rings[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, **91**: 178–186.

[8] Liu N, Tao R, Wang R, et al. Signal reconstruction from recurrent samples in fractional Fourier domain and its application in multichannel SAR[J]. *Signal Processing*, 2017, **131**: 288–299.

[9] Namias V. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics[J]. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 1980, **25**(2): 241–265.

[10] Guan J, Chen X L, Huang Y, et al. Adaptive fractional Fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, **6**(5): 389–401.

[11] Chen X L, Guan J, Yu X H, et al. Radar micro-Doppler signature extraction and detection via short-time sparse time-frequency distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, **39**(5): 1017–1023.
陈小龙, 关键, 于晓涵, 等. 基于短时稀疏时频分布的雷达目标微动特征提取及检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, **39**(5): 1017–1023.

[12] Hassanieh H, Indyk P, Katabi D, et al. Simple and practical algorithm for sparse Fourier transform[C]//*Proceedings of the 23rd Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 2012: 1183–1194.

[13] Gilbert A C, Indyk P, Iwen M, et al. Recent developments in the sparse Fourier transform: A compressed Fourier transform for big data[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, **31**(5): 91–100.

[14] Hassanieh H, Indyk P, Katabi D, et al. Nearly optimal sparse Fourier transform[C]//*Proceedings of the 44th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 2012: 563–577.

[15] Pei S C, Ding J J. Closed-form discrete fractional and affine Fourier transforms[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, **48**(5): 1338–1353.

[16] Liu S H, Shan T, Tao R, et al. Sparse discrete fractional Fourier transform and its applications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, **62**(24): 6582–6595.

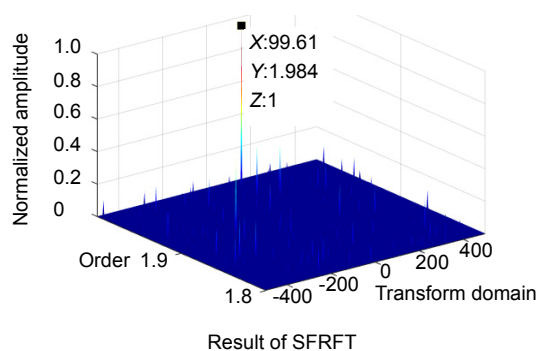
[17] Liu S H, Shan T, Zhang Y D, et al. A fast algorithm for multi-component LFM signal analysis exploiting segmented DPT and SDFrFT[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Radar Conference*, 2015: 1139–1143.

[18] Chen X L, Guan J, Dong Y L, et al. Sea clutter suppression and micromotion target detection in sparse domain [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, **44**(4): 860–867.
陈小龙, 关键, 董云龙, 等. 稀疏域海杂波抑制与微动目标检测方法[J]. *电子学报*, 2016, **44**(4): 860–867.

Radar maneuvering target detection method based on fast and high resolution sparse fractional Fourier transform

Yu Xiaohan, Chen Xiaolong*, Chen Baoxin, Huang Yong, Guan Jian

Naval Aeronautical University, Yantai, Shandong 264001, China



Overview: Fast and effective detection of moving targets within a complex environment is always a challenging subject in the field of radar signal processing, which is also important in both military and civil fields. What they have in common is that due to the strong background, low radar resolution, far range and other factors, the signal-to-noise/clutter ratio (SNR/SCR) is so low in both time and frequency domains that detection performance is seriously descended. In general, radar signals can be classified as a kind of nonstationary signals and their frequencies are changing over time, so time-frequency analysis methods are studied to improve the detection performance of nonstationary signals. Radar echo of moving target with constant acceleration can be modeled as a linear frequency modulation (LFM) signal in some circumstances. The fractional Fourier transform (FRFT), which is the generalised formula for the Fourier transform (FT), has a good energy concentration property of LFM signal and it is feasible to the moving target detection and parameter estimation in low SCR environment. However, due to the wide observation range of radar and large amount of echo data caused by the new system radar, more requirements are put forward for radar target detection technology. It is urgent to study the valid signal analysis methods with high time-frequency resolution and suitable for large data volumes. Hence, more effective and higher efficiency FRFT-based methods for moving target detection are desired to improve the radar moving target detection performance under complex background. Recently, a novel sub-linear algorithm for discrete Fourier transform (DFT) named sparse Fourier transform (SFT) was developed by Hassanieh et al. SFT is a new discrete Fourier transform algorithm for sparse signals, which is more efficient than the traditional fast Fourier transform (FFT). Assuming that a LFM signal has a sparse characteristic in the fractional domain, in order to improve the time-frequency analysis speed, professor Tao of Beijing Institute of Technology redesigned Pei's discrete FRFT (DFRFT) method on the basis of SFT and studied a new fast algorithm, namely sparse FRFT (SFRFT). So the complexity of DFRFT is further reduced. The radar echo of target can be regarded as a superposition of a few strong scattering center echoes, which has a property of sparsity. This paper illustrates the implementation of SFRFT, then the SFRFT algorithm is applied to radar signal processing and a SFRFT-based fast and high resolution maneuvering target detection method is proposed. The effectiveness of the detection method is validated by simulation results. It is proved that the SFRFT-based detection method can achieve low computational complexity with good clutter suppression and parameter estimation ability.

Citation: Yu X H, Chen X L, Chen B X, *et al.* Radar maneuvering target detection method based on fast and high resolution sparse fractional Fourier transform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(6): 170702

Supported by National Natural Science Foundation of China (61501487, U1633122, 61471382, 61531020), the National Defense Technology Fund (2102024), University Scientific Research Development Plan of Shandong Province (J17KB139), and the Special Funds of Taishan Scholars of Shandong and Young Talents Program of CAST (YESS20160115)

* E-mail: cxlx1209@163.com