

两种海杂波背景下的微弱匀加速运动目标检测方法

关 键^① 李 宝^{①②} 刘加能^① 张 建^①

^①(海军航空工程学院 烟台 264001)

^②(中国人民解放军 91079 部队 常州 213137)

摘 要: 该文研究了线性调频(LFM)信号和单频信号分数阶 Fourier 变换(FRFT)模函数的一些性质, 根据这些性质提出了两种基于 FRFT 模之差的海杂波背景下匀加速运动目标检测的新方法。一种方法利用接收信号与其延时信号的 FRFT 模之差, 另一种方法利用接收信号正旋转角的 FRFT 模与负对称旋转角 FRFT 模的镜像之差。两种方法能较有效地抑制海杂波, 对信杂比有一定的改善, 在低信杂比下具有较好的检测效果。对实测海杂波数据进行仿真, 证实了两种方法的有效性。

关键词: 动目标检测; 分数阶 Fourier 变换(FRFT); LFM 信号; 单频信号

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1898-05

Two Approaches of Detecting Weak Moving Target with Constant Acceleration in Sea Clutter

Guan Jian^① Li Bao^{①②} Liu Jia-neng^① Zhang Jian^①

^①(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

^②(Unit 91079 of PLA, Changzhou 213137, China)

Abstract: In this paper, the characteristic of FRFT modules about LFM signal and monochromatic signal is researched. Based on this characteristic, two new methods based on difference of FRFT modules for moving target detection are proposed. One is based on difference of FRFT modules of echo signal and its time-lapse signal. The other is based on difference of FRFT modules with two symmetry inverse rotation angles of echo signal, and one of the FRFT modules has been overturned. In these methods, sea clutter is suppressed effectively. SCR can be improved to some extent, and the detection performance is good in low SCR. Finally, simulation results show the effectivity of proposed methods.

Key words: Moving target detection; FRactional Fourier Transform(FRFT); LFM signal; Monochromatic signal

1 引言

1980 年, Namias 提出了分数阶 Fourier 变换(FRactional Fourier Transform, FRFT)的概念^[1], 用于微分方程求解。其后的十几年里由于缺乏有效的物理解释和快速算法, 使得 FRFT 在信号处理领域未得到应有的应用。直到 1993-1994 年间 Almeida 分析了这种变换并指出 FRFT 可以理解为时频平面的旋转^[2], 1996 年 Ozaktas 等提出了一种计算量与 FFT 相当的离散算法后^[3], FRFT 才慢慢得到信号处理领域学者的青睐。

海杂波背景下目标的有效检测是一个比较困难的问题。针对此类问题, 不少学者利用 CFAR, 分形等方法检测海杂波背景下的目标。然而, CFAR 方法需要海杂波的统计模型和模型参数; 采用分形

的方法不仅运算量大, 工程不易实现, 而且还无法获知目标的运动信息。若海面目标是匀加速运动的, 其回波可以近似为线性调频(LFM)信号。FRFT 很适合处理此类信号, 不仅不需要估计海杂波的模型参数, 且能估计出目标的运动参数, 从而获知目标的运动状态, 因此在 FRFT 域处理此类问题有很大的优势。本文为了在低信杂比下有效地检测出匀加速运动目标, 提出了两种 FRFT 域海杂波对消的匀加速运动目标检测方法。本文所提出的方法在最大程度保留目标信号能量的同时尽量地抑制海杂波, 以达到低信杂比下有效的检测出匀加速运动目标的效果。

2 LFM 信号与单频信号的 FRFT 模函数的时移特性

设单分量 LFM 信号:

$$s(t) = Ae^{j(m_1 t - m_2 t^2 / 2)}, \quad |t| \leq T \quad (1)$$

其中 A 、 m_1 和 m_2 分别为 LFM 信号的幅度、中心频

2008-08-26 收到, 2009-03-05 改回

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0912)和国家自然科学基金(60672140, 60802088)资助课题

率和调频率。则经过 τ 时延的 LFM 信号的 p 阶 FRFT 为

$$\begin{aligned} F_p[s(t-\tau)] &= \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} e^{\frac{ju^2\cot\alpha}{2}} \\ &\cdot \int_{-T}^T s(t-\tau) e^{j\left(\frac{1}{2}t^2\cot\alpha - ut\csc\alpha\right)} dt \\ &= A\sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} e^{\frac{ju^2\cot\alpha}{2}} e^{-j\left(m_1\tau + \frac{1}{2}m_2\tau^2\right)} \\ &\cdot \int_{-T}^T e^{j\left(\frac{\cot\alpha - m_2}{2}t^2 + j(m_1 + m_2\tau - u\csc\alpha)t\right)} dt \quad (2) \end{aligned}$$

$\alpha = \arctan(1/m_2)$ 时,

$$|F_p[s(t-\tau)]| = 2AT\sqrt{\frac{\csc\alpha}{2\pi}} |\text{sinc}[(m_1 + m_2\tau - u\csc\alpha)T]| \quad (3)$$

其中 $\alpha = p\pi/2$ 是旋转角度。由式(3)可见, $m_1 + m_2\tau = u\csc\alpha$ 时, $|F_p[s(t-\tau)]|$ 达到最大值, 且 $|F_p[s(t-\tau)]|$ 的峰值的大小与延时时间 τ 无关, 但峰值的位置和延时时间相关。所以, 对于 τ_1 和 τ_2 两个延时, $s(t-\tau)$ 的 FRFT 模函数 $|F_p[s(t-\tau)]|$ 出现最大值处分别用 u_1 和 u_2 表示, 则

$$u_1 - u_2 = m_2(\tau_1 - \tau_2)\sin\alpha = (\tau_1 - \tau_2)\cos\alpha \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可见, 延时后的 LFM 信号和原 LFM 信号的 FRFT 模函数最大值在同一个变换角度 α 实现, 与延时无关, 两者的最大值相等, 且峰值点位置之差与延时时长之差 $\tau_1 - \tau_2$ 以及旋转角度的余弦值成正比。 $\alpha = \arctan(1/m_2)$, 因此峰值点位置之差随着调频率 m_2 的增大而增大。对于单频信号, 即 $m_2=0$, 其延时信号的 FRFT 模函数为

$$|F_p[s(t-\tau)]| = A\sqrt{\frac{\csc\alpha}{2\pi}} \left| \int_{-T}^T e^{j\left(\frac{\cot\alpha}{2}t^2 + j(m_1 - u\csc\alpha)t\right)} dt \right| \quad (5)$$

由此可见, 单频信号的 FRFT 模函数与延时无关, 即延时单频信号与原单频信号的 FRFT 模函数相同。

从以上分析可见, LFM 信号与单频信号的 FRFT 模函数具有不同的时移特性。 LFM 信号及其延时信号的 FRFT 模函数的峰值在相同阶数的变换域中, 但峰值位置不相同; 单频信号与其延时信号的 FRFT 模函数在整个 FRFT 域均相同, 与延时和变换阶数均无关。这一特点可以用于后续海杂波背景下的匀加速目标检测。

3 LFM 信号与单频信号的正负对称旋转角的 FRFT 模函数

LFM 信号为式(1)所示模型。其变换角为 α_1 的 FRFT 模值为^[4]

$$|F_{p_1}[s(t)]| \approx \begin{cases} A/\sqrt{\sin|\alpha_0 - \alpha_1|}, & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

其中 α_0 是使得 LFM 信号能量聚集最佳的变换角度, $\alpha_0 \neq \pi/2$, $\alpha_1 = p_1\pi/2$, u_{\min} 和 u_{\max} 表征着在变换角为 α_1 的 FRFT 域的谱支撑区。本文后续分析中只考虑谱支撑区范围之内情况。则

$$|F_{-p_1}[s(t)]| \approx A/\sqrt{\sin|\alpha_0 + \alpha_1|} \quad (7)$$

对比式(6)和式(7)可见, LFM 信号在正负对称旋转角的 FRFT 域上能量分布差异很大。 $\alpha_1 = \alpha_0 = \pi/4$ 时, $|F_{p_1}[s(t)]|$ 达到最大值, $|F_{-p_1}[s(t)]|$ 的值最小, 两者差异最大。对于单频信号, 其能量聚集最佳的变换角度 $\alpha_0 = \pi/2$, 则单频信号的变换角为 α_1 的 FRFT 模值为

$$|F_{p_1}[s(t)]| \approx A/\sqrt{\sin|\alpha_0 - \alpha_1|} = A/\sqrt{\cos(\alpha_1)} \quad (8)$$

变换角为 $-\alpha_1$ 的 FRFT 模值为

$$\begin{aligned} |F_{-p_1}[s(t)]| &\approx A/\sqrt{\sin|\alpha_0 + \alpha_1|} = A/\sqrt{\cos(-\alpha_1)} \\ &\approx |F_{p_1}[s(t)]| \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可看出, 单频信号在正负对称旋转角度的 FRFT 模值大小近似相等。根据文献[4]中对于谱支撑区的定义可知, 单频信号的正负对称旋转角 FRFT 谱支撑区关于中心点对称。图 1 为单频信号和 LFM 信号正负对称旋转角 FRFT 域的能量分布示意图。一个有限长的 LFM 信号在时频平面上呈现为斜直线的背鳍形分布, 而单频信号在时频平面上为一垂直于时间轴的线段。从图 1 中可见, 单频信号的正负对称旋转角的 FRFT 模值大小相等, 谱支撑区关于中心点对称, 而 LFM 信号的正负对称旋转角的 FRFT 模值差异很大。文献[5]中利用对称旋转角的 FRFT 模之差检测 SAR 中动目标, 本文在此基础上, 增加了翻转操作, 用来抑制海杂波, 检测海面匀加速运动目标。

4 海杂波背景下 FRFT 域匀加速运动目标检测

文献[6]将海杂波看作是一些独立的且具有不同

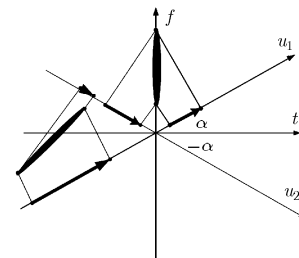


图 1 LFM 信号和单频信号在正负对称旋转角 FRFT 域的能量分布

速度的散射体回波的叠加，其数学模型为单频信号的叠加。文献[7]所提及的模型把海杂波回波看作是由一阶海杂波、二阶海杂波和大气噪声组成的。一阶海杂波是指高频无线电波在海面传播，与正弦形海浪只发生一次作用所引起的反射回波，其数学模型也为单频信号的叠加。这两类海杂波模型中均有类似于单频信号的成份，这是本文所感兴趣的。匀加速运动目标的建模已经比较成熟，很多文献都将其回波信号建模为LFM信号。LFM信号在特定的FRFT域上呈现能量的聚集，幅度出现明显的峰值，因此可利用FRFT检测海面匀加速运动目标。然而海杂波在FRFT域也存在部分能量聚集，其FRFT幅值将会严重干扰LFM信号的FRFT幅值，使得检测困难。于是，本文提出了两种FRFT域海杂波抑制的匀加速运动目标检测方法。设观测信号为 $w(t)$ 。

方法 1 采用相邻时间观测信号的 FRFT 模之差的极大值作为检测统计量。其系统框图如图 2 所示。

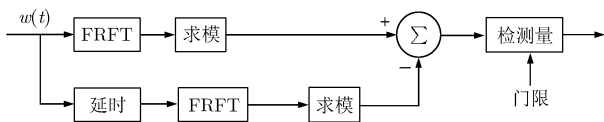


图 2 方法 1 系统框图

目标所对应的 LFM 信号与其延时信号的 FRFT 模函数的峰值点不同，而海杂波中的单频信号与其延时信号的 FRFT 模函数相同，两者之差使得 LFM 信号的能量得到了很好的保留，而海杂波中单频信号的能量被很好地抵消。检测统计量为

$$Y = \max\{|F_{p_1}[w(t_1)]| - |F_{p_1}[w(t_2)]|\} \quad (10)$$

其中 p_1 是变换阶数， $|t_1| \leq T$ ， $-T + \tau \leq t_2 \leq T + \tau$ 。

方法 2 采用接收信号正负对称旋转角 FRFT 模之差的极大值为检测统计量。其系统框图如图 3 所示。

两者之差可以很好地抑制海杂波中的单频分量，而较好地保留了目标所对应的 LFM 信号的能量。

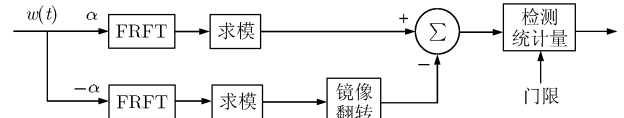


图 3 方法 2 系统框图

量。因此，在低信杂比下能较好的检测出匀加速运动目标。其检测统计量为

$$Y = \max\{|F_{p_1}[w(t_1)]| - |F_{-p_1}[w(t_1)]|\} \quad (11)$$

在整个 FRFT 域，以旋转角度为变量，以一定的步长作 FRFT，并计算检测统计量 Y 。若 Y 大于门限，则认为有目标，相反即认为不存在目标。检测到目标时，可通过变换阶数估计调频率，通过峰值点位置参数估计中心频率^[8]。

5 仿真与分析

目标的初速度为 0，加速度 $a = 0.5 \text{ m/s}^2$ ，信号接收时长为 1.101 s，采样频率为 1000 Hz。海杂波采用加拿大 McMaster 大学 X 波段的 IPIX 雷达海杂波数据，数据的详细说明可参考其网站^[9]。信杂比为 -11.6 dB。基于 FRFT 的仿真一般需要注意两个问题：第一，满足采样定理，即采样频率大于 Nyquist 采样率^[10]；第二，量纲归一化处理^[4]。

5.1 方法 1 的仿真结果

图 4 为 1 至 1001 采样点的 FRFT 幅值图，则 101 至 1101 采样点即可表示为经过 0.1 s 延时的信号，其 FRFT 幅值图如图 5 所示。变换阶数为 [0.5, 1.5]。由图 4 和图 5 可看出，未经杂波抑制时，目标受到海杂波严重的干扰，检测概率较低，而虚警概率较大；图 6 所示，经过抵消后，海杂波得到了较好的抑制，目标峰值比较突出。图 7，图 8 表明在适当的 FRFT 域，目标信号能量得到较好的聚集，但海杂波的峰值干扰依然比较严重，对检测性能影响较大。图 9 可以看出，两者相减后，海杂波得到较好的抑制，而目标能量基本没消弱，可以设定门限，较好地检测出目标。

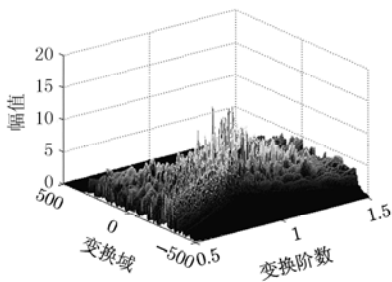


图 4 接收信号的 FRFT 幅值图

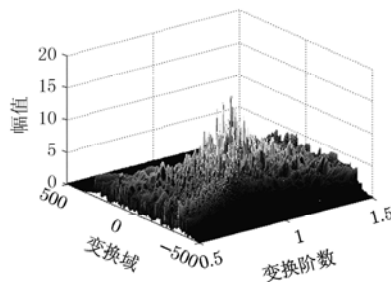


图 5 经过 0.1 s 延时的 FRFT 幅值图

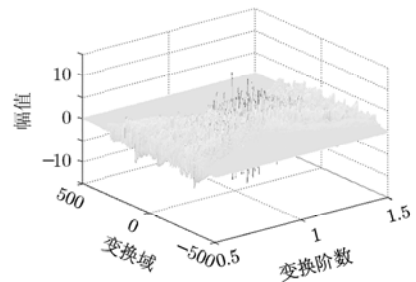


图 6 两者抵消后的 FRFT 域幅值图

5.2 方法 2 的仿真结果

变换阶数为[0.5,1.5], 则对称变换阶数为[-1.5, -0.5]。图 10 和图 11 分别为对称变换阶数的 FRFT 幅值图。经过对消后, 海杂波得到了较好的抑制, 而目标信号能量得到很好的保留。

从图 10, 图 11 和图 12 可看出, 对消后, 海杂波得到了较好的抑制, 目标更容易被检测。从图 13 和图 14 可看出目标信号的正负对称旋转角 FRFT 模函数的能量分布有很大的差异。图 15 可看出对消后, 杂波的对消效果较好, 而目标能量得到较好的保留。对比图 15 和图 9 可发现方法 2 的对消效果弱于方法 1, 下一小节将给出分析。

5.3 对比分析

两种方法对消结果并没有完全抑制海杂波, 这可以从杂波建模上进行解释。针对文献[6]所涉及的

海杂波模型, 其只是一种近似模型, 这种模型没有考虑到海杂波多普勒频率的时变性。再者, 这种模型将回波看作独立散射体的组合, 但实际上它们存在相关性。对于文献[7]中所提到的模型, 本文所提出的两种方法只能抑制一阶海杂波。而对于二阶海杂波和大气噪声, 其分布近似为高斯白噪声, 本文的方法对其抑制作用很小。因此两种方法并不能理想地完全对消海杂波, 但从表 1 可看出, 经对消后, 虽然目标的能量有所消弱, 但是对于海杂波的抑制作用总是大于对于目标的消弱作用。海杂波得到了较好的抑制, 目标信号更加突出, 更加易于检测, 这有助于提高检测概率而降低虚警概率。

从表 1 可见方法 1 优于方法 2, 其原因可解释为: 第 1 种方法中目标能量对消的是目标信号在最佳变换角度 FRFT 模峰值点周围的能量扩展, 这种

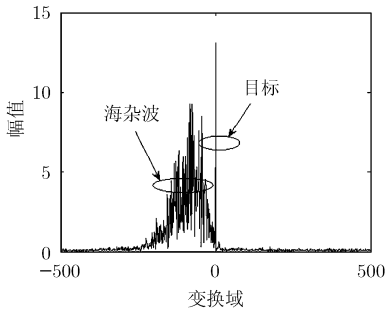


图 7 接收信号最佳旋转角 FRFT 幅值图

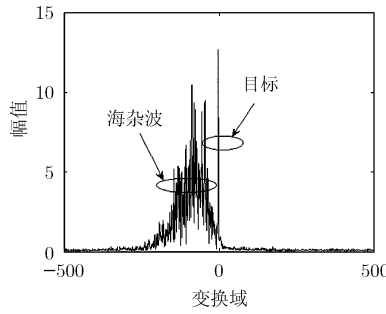


图 8 经过 0.1 s 延时的接收信号的最佳旋转角 FRFT 幅值图

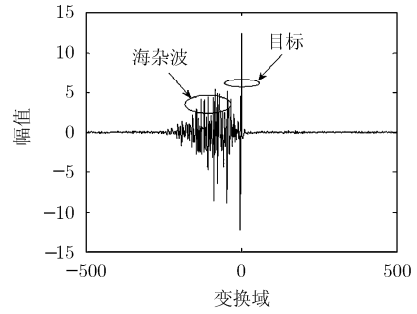


图 9 两者模值之差

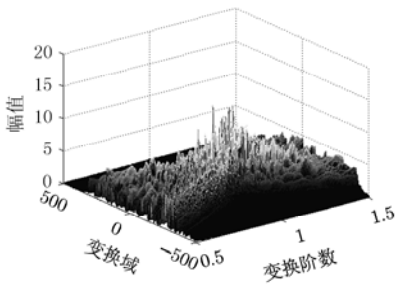


图 10 接收信号的 FRFT 幅值图

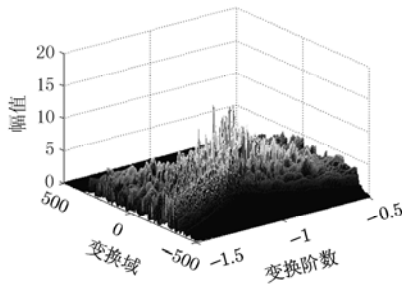


图 11 接收信号对称旋转角的 FRFT 幅值图

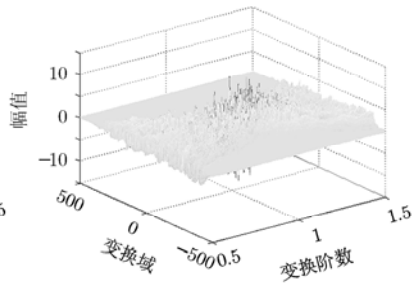


图 12 两者对消后的 FRFT 域幅值图

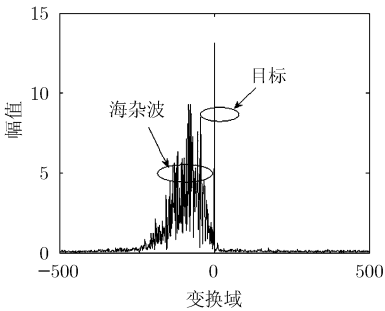


图 13 接收信号最佳旋转角 FRFT 幅值图

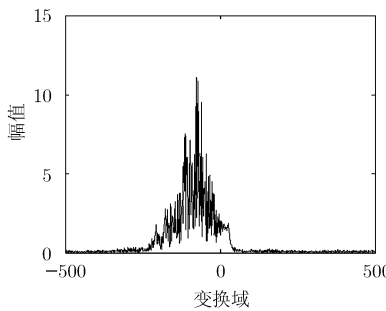


图 14 接收信号的负的最佳旋转角 FRFT 模函数的镜像图

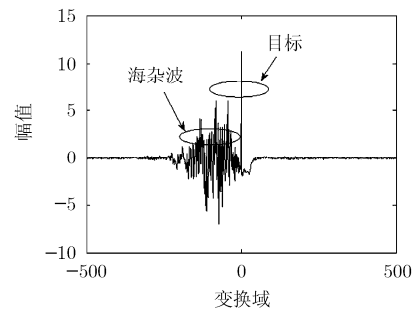


图 15 两者模值之差

表1 两种方法的对消性能比较

	对消前目标信号 FRFT 峰值	对消后目标信号 FRFT 峰值	对消前目标信号与杂波 FRFT 峰值差(图7, 图13)	对消后目标信号与杂波 FRFT 峰值差(图9, 图15)	对消后的 信杂比增益(dB)
方法1	13.1396	12.4340	3.8517	7.0603	6.998
方法2	13.1396	11.2127	3.8517	5.1584	5.208

能量扩展非常小, 其能量对消的很少; 而对于第2种方法, 目标信号能量对消的是对称变换角度的FRFT谱能量, 可由式(6)可计算其幅值。约为 $1/\sqrt{|\sin 2\alpha_0|} \geq 1$, 因此当使得目标信号能量聚集最佳时的变换角 $\alpha_0 = \pi/4$ 时, 方法2的性能达到最佳, 此时, 目标信号的FRFT谱能量对消的最少, 为1个单位。这是一种理想情况下的分析, 实际中可能还有非单频信号模型背景杂波的影响。显然, 方法2的目标能量对消程度比较大, 因此第2种方法使得目标信号的FRFT峰值减小的比第1种方法多, 使得性能变差。

上述分析中, 目标和海杂波在FRFT域是可分的, 仿真证实了两种方法均得到较好的效果, 而实际情况中还存在目标与海杂波在FRFT域不可分的情况, 后续研究发现, 本文的两种方法依然有效。

6 结束语

本文研究了LFM信号FRFT模函数的一些特性, 并利用这些特性提出了两种基于FRFT模之差的海杂波背景下匀加速运动目标检测新方法。两种方法在保证目标信号能量基本没有被弱化的前提下很好的抑制了海杂波, 因此在低信杂比下有着较好的检测性能。在信杂比为-11.6dB时检测出了目标信号, 证实了两种方法的有效性。通过对比发现: 两种方法对SCR均有一定的改善; 方法1的性能优于方法2。可以推断, 本文的两种方法均可应用于所有存在单频信号分量的杂波背景下的匀加速运动目标检测。

参考文献

- [1] Namias V. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics [J]. *Journal of Institute Applied Mathematics*, 1980, 25(3): 241-265.
- [2] Almeida L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(11): 3084-3091.
- [3] Ozaktas H M, O Kutay M A, and Bozdagi G. Digital

computation of the fractional Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(9): 2141-2150.

- [4] 邓兵, 陶然, 曲长文. 分数阶Fourier域中多分量chirp信号的遮蔽分析[J]. *电子学报*, 2007, 35(6): 1094-1098.
Deng Bing, Tao Ran, and Qu Chang-wen. Analysis of the shading between multicomponent chirp signals in the fractional Fourier domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1094-1098.
 - [5] 陈广东, 朱兆达, 朱岱寅. 分数阶傅立叶变换用于抑制SAR杂波背景检测慢速动目标[J]. *航空学报*, 2005, 26(6): 748-753.
 - [6] Chen Guang-dong, Zhu Zhao-da, and Zhu Dai-yin. Symmetry FrFT used to suppress the fixed background clutter to detect moving target in a SAR image[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(6): 748-753.
 - [7] Gini F and Greco M. Texture modeling and validation using recorded high resolution sea clutter data. *RADAR-2001*, Atlanta, Georgia, 2001: 378-391.
 - [8] 赵志信, 国磊, 李永新. 强海杂波背景条件下海上目标检测方法[J]. *应用科技*, 2006, 33(8): 30-33.
Zhao Zhi-xin, Guo Lei, and Li Yong-xin. The method to detect signal on the sea with strong sea clutter[J]. *Applied Science and Technology*, 2006, 33(8): 30-33.
 - [9] 李宝, 关键, 郭海燕. LFM信号的FRFT模函数对称特性及参数估计[J]. *雷达科学与技术*, 2008, 6(3): 210-214.
Li Bao, Guan Jian, and Guo Hai-yan. The symmetry characteristic and parameter estimation of LFM signal's FRFT modular function[J]. *Radar Science and Technology*, 2008, 6(3): 210-214.
 - [10] <http://soma.eee.mcmaster.ca/ipix>. 1993.
 - [11] 邓兵, 陶然, 杨曦. 分数阶Fourier域的采样及分辨率分析[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(5): 655-661.
Deng Bing, Tao Ran, and Yang Xi. Analysis of sampling and resolution in fractional Fourier domain[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(5): 655-661.
- 关键: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 从事雷达信号处理、侦察图像处理等方面的研究工作。
李宝: 男, 1982年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。