

基于压缩感知的雷达目标辨识

李寰驰 袁伟明 张锐

(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 针对弹道导弹中段飞行过程中产生的自旋和进动特征,首先建立了目标的微动和回波模型,分析了自旋和进动两种运动模式,详细推导了微动产生的微多普勒频率的数学公式,获得的二维时频图与理论上的一致,验证了模型的正确性。然后针对低脉冲重复频率(LPRF)可能产生的微多普勒模糊,利用压缩感知,重构了信号微多普勒,解决了模糊问题,由此减小了雷达处理信号压力。并在此基础上求取了不同运动方式下,自旋和进动的运动周期。实验结果表明,本方法获得了较好效果以及在目标识别运用上的有效性。

关键词: 微多普勒;脉冲重复频率;压缩感知;运动周期

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Radar target recognition based on compressed sensing

Li Huanchi Yuan Weiming Zhang Rui

(Nanjing Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: According to the spin and precession characteristics of ballistic missile midcourse flight, we established the model of micro-motion target and echoes, analyzed two motion modes of spin and precession. The mathematical formula of micro Doppler frequency produced by fretting is deduced. obtained two-dimensional time-frequency graph verifies the correctness of the model. In view of the small Doppler ambiguity which may be produced by the low Pulse repetition frequency, use the compressed sensing to reconstruct the signal micro Doppler, and solve the fuzzy problem. The radar signal pressure is reduced. And on this basis Obtained Spin and precession of periodic motion. Experimental results show the effectiveness of the proposed method in target recognition.

Keywords: micro-Doppler; pulse repetition frequency; compressed sensing; period of motion

0 引言

众所周知,许多国家已经有了弹道导弹。如果不采取相关措施,听之任之,国家本土安全将面临严重的威胁和影响。好在进攻和防御二者相依相随,有了弹道导弹的问世,就有反导技术的出现。其中最重要的就是目标识别系统,能有效的从复杂电磁环境下高概率的识别各种真假弹头。从而为后续工作提供保障。在识别领域中,目标的微动特性引起了许多关注。美国海军实验室 Chen^[1]率先命名了微多普勒,并指明微多普勒本质上是调频信号。国内一些学者也紧跟其后,分析微多普勒在雷达信号处理当中的运用^[2-5],利用联合时频分析(TFD)建立了诸如直升飞机,弹道导弹的微动模型。

文献[6]介绍了微多普勒模型,并未详细分析导弹的进动模型。文献[7]提出了基于压缩感知的多普勒解模糊处理办法,没有涉及微多普勒的方面。文献[8]提出了基于稀

疏表示的微动辨识框架,并基于此介绍了稀疏词典设计方法,与文献[9]的方法相比较,估计性能优于后者,但是雷达发射脉冲频率过高,没有减轻雷达发射和接收负担,挤占雷达资源,降低了雷达使用效率。

本文对弹道导弹的自旋,进动这两种运动形式建立了数学模型,利用数学方法推导出微多普勒频率的数学表达式并进行了分析和仿真。在此基础上,将压缩感知与弹道导弹进动识别相合,利用新的算法并在一定条件下,在保证效果的基础上,减少脉冲重复频率,减轻雷达发射和接收负担,达到与原来高脉冲重复频率相同或者近似的效果。并求取了不同运动方式下,自旋和进动的运动周期。实验结果表明了本方法在导弹识别运用上的有效性以及潜在实用性,为识别目标提供新的途径,也为后续工作提供了更多信息。

1 微动建模与回波模型

弹道导弹的飞行时间可分为3段,助推段、中段和再入

段。其中助推段和再入段时间较短,运动特征难以把握。而导弹中段飞行时间较长,这为防御方雷达识别目标提供了缓冲时间,由导弹知识^[10]可知,弹道导弹一般需要自旋来保持弹身稳定和满足再入要求。并且在弹体和弹头分离的时候,弹头会绕轴进行进动。若进动轴变化,则还有可能产生章动。不同的运动模式将对雷达波产生不同的调制。为方便起见,本文不考虑初始平动速度。下面将对不同运动模式进行建模分析。

1.1 目标自旋的数学模型

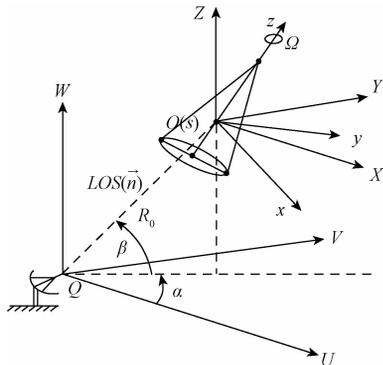


图 1 弹道导弹的自旋模型

如图 1 所示,雷达坐标系为 $Q-UVW$,其坐标原点是 Q ,也是雷达位置。目标坐标系 $o-xyz$,坐标原点 o 为目标质心。参考坐标系为 $S-XYZ$ 。与雷达坐标系平行。一般情况下,将自旋轴与锥旋轴交点为参考系的原点。 o 点与 S 点重合,目标坐标系与参考坐标系之间的数学关系由欧拉角 (Θ, Φ, Ψ) 决定,即初始时刻的旋转矩阵。即先绕 z 轴旋转,然后绕 x 轴旋转,最后再绕 z 轴自旋,自旋速度 Ω 。质心在雷达坐标系下的方位角和俯仰角分别为 α, β 。初始距离为 R 。为了方便分析,不妨假设存在一个散射点 P ,在本地坐标系下位置为 $r_p = (x_p, y_p, z_p)$ 。从本体坐标系到参考坐标系转换需要两个环节,初始转换 R_{mit} 和自旋转换 R_{spin} 。

$$r_s = R_{spin} \cdot R_{mit} \cdot r_p \tag{1}$$

由参考文献[8]可知

$$R_{mit} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & -\sin \Phi \\ 0 & \sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \cdot$$

$$\begin{pmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}。$$

在 t 时刻,自旋转换矩阵

$$R_{spin} = \begin{pmatrix} \cos \Omega t & -\sin \Omega t & 0 \\ \sin \Omega t & \cos \Omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}。$$

1.2 目标进动的数学模型

如图 2 所示,目标以 SN 为进动轴, SN 与 Z 轴的夹角为 θ ,进动角频率为 ω ,分析锥旋,目标绕 SN 锥旋,散射点 P 的运动轨迹为:

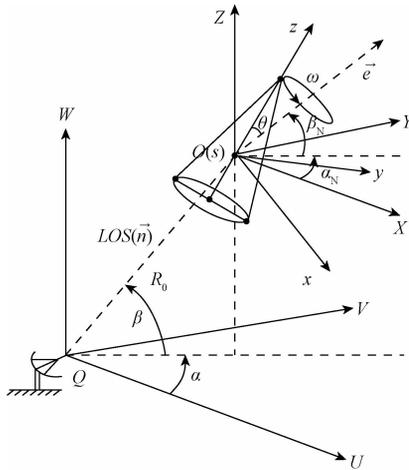


图 2 弹道导弹的进动模型

$$R_p = R_{conj} \cdot R_{spin} \cdot R_{mit} \cdot r_p \tag{2}$$

所以雷达坐标系下的 P 点位置变化轨迹为:

$$R(t) = R_0 + R_p = ba(1 + U^2) + A + B + C + D \tag{3}$$

式中: $A = ba(U \sin \Omega t - U^2 \cos \Omega t)$, $B = a(I + U^2)(c \sin \omega t - d \cos \omega t)$, $C = \frac{1}{2}(d + cU)Ua \sin(\omega + \Omega)t + \frac{1}{2}(c - dU)Ua \cos(\omega + \Omega)t$, $D = \frac{1}{2}(d - cU)Ua \sin(\omega - \Omega)t + \frac{1}{2}(c + dU)Ua \cos(\omega - \Omega)t$, $a = R_0$, $b = (I + e^2) \cdot R_{mit}$, $c = e \cdot R_{mit}$, $d = e^2 \cdot R_{mit}$ 。

1.3 单频下雷达回波模型

设雷达发射载频为 f_0 的单频信号,混频后多个散射点的基频回波为:

$$s(t) = \sum_{l=1}^L \sigma_l \exp(j\Phi_l) = \sum_{l=1}^L \sigma_l \exp\left(j2 \cdot \pi \cdot \frac{2R(t)}{c}\right) \tag{4}$$

易得微多普勒为:

$$f_{md}^l = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi_l}{dt} = \frac{2f_0}{c} \cdot \left(\frac{dR(t_l)}{dt}\right) \tag{5}$$

1.4 实验仿真

利用计算机仿真实验证模型,假设目标既自旋又锥旋(即进动),雷达发射频率 9.5 GHz 单频连续波,总的观测时间为 2 s,脉冲重复频率为 1 200 Hz。设置两个散射点,其中 1 个锥顶,1 个锥底。坐标分别为 $[0, 0, 1]$, $[-0.3, -0.4, -0.5]$ 。散射点强度均为 1。初始欧拉角为 $[30^\circ, 30^\circ, 45^\circ]$ 。初始距离坐标为 $[1000e3, 5000e3, 5000e3]$ 。方位角和俯仰角为 $[60^\circ, 45^\circ]$ 。自旋频率为 1 Hz,锥旋频率为 3 Hz。理论时频图如图 3 所示,实际时频图如图 4 所示。

分析可知,锥顶散射点只做锥旋运动,在时频图中显示为标准正弦曲线。周期为标准锥旋周期。锥底散射点既自旋又锥旋,在时频图显示为非标准正弦曲线,周期为自旋周期和锥旋周期的最小公倍数。脉冲重复频率较低导致微多普勒高频部分产生模糊,时频图发生折叠。无法准确识别提取运动周期。

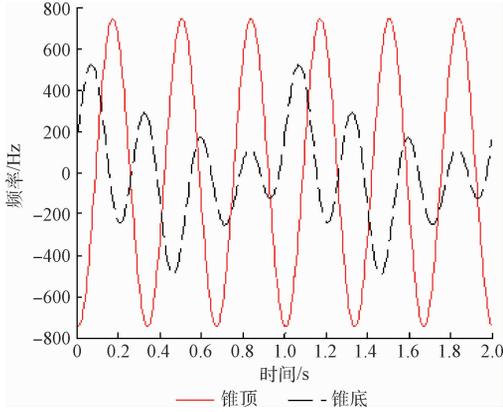


图3 理论上进动微多普勒时频图

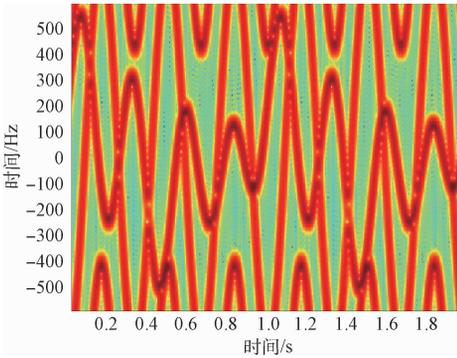


图4 实际上进动微多普勒时频图

2 压缩感知(CS)

如何在低脉冲重复频率情况下解决微多普勒模糊问题,成为了进动识别的一个难题。众所周知,将模拟信号转换为计算机能够处理的数字信号,必然要经过采样的过程,奈奎斯特指出采样频率为信号最高频率的2倍才能完整保留原始信号中的信息。但是雷达回波的高速采样使得硬件越来越难以满足奈奎斯特条件。压缩感知理论出现正好解决了这个问题。其基本理论为只要信号本身是可压缩的或者在某个变换域内稀疏,就可以用一个与变换基不相关的观测矩阵将所得高维信号投影到低维空间通过求解优化问题就可以从少量投影中高概率恢复原信号^[11]。理论主要包括3个方面:稀疏表示、编码测量和重构算法。

信号 \mathbf{X} 在某稀疏域表达为 $\boldsymbol{\Theta} = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{X}$,设计与稀疏基不相关的矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$,将 \mathbf{X} 投影到低维空间,得到观测数据:

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{X} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\Theta} \quad (6)$$

$\boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Psi}$ 称为感知矩阵。在满足“受限等容特性”(restricted isometry property, RIP)条件下,利用L1最小范数下最优化算法解决恢复时遇到的NP难题,就能恢复原信号。

$$\text{Min} \|\boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{X}\|, \text{ s. t. } \mathbf{Y} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{X} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\Theta} \quad (7)$$

常用算法包括贪婪算法,凸松弛算法和组合算法。贪婪算法作为经典的信号重构算法,计算速度快,算法复杂度小,但是结果并非十分准确。凸松弛算法虽然重构结果精确,但是计算负担很重。往往在数据较大时不作为最优算法。本文采取贪婪算法中的正交匹配追踪算法来恢复原始信号。

3 加窗压缩感知

由微动建模可知,回波信号微多普勒曲线是一系列调制正弦信号的叠加^[12],而正弦波信号在频域上稀疏。频域上稀疏性满足了压缩感知的基本条件。文献[13-15]指出,对雷达发射信号时间微调,对回波进行类似短时傅里叶变化的加窗处理,再对窗内信号进行压缩感知,获得低维观测数据,然后利用式(15)进行重构,将结果按照顺序排列,即可得到微多普勒结果。

文献[15]指出发射时间微调分为两步,第1步从高PRF中随机抽取一部分脉冲,达到降低PRF的效果。第2步再将抽取的脉冲进行抖动处理,等效扩大微多普勒识别范围。然而由于实际雷达发射脉冲无法做到随机抖动,因此本文采用参差重频方式替代解决随机抖动问题。而且微多普勒频率随时间变化,无法直接投影到感知矩阵上。但是在较短的时间内,可以认为是不变的。因此定义时间窗 t ,将窗内信号投影到感知矩阵上然后不断滑动时间窗,依次滑动投影分析信号频率。最终完整的分析出信号的频率。

对滑动窗内的信号进行分析,感知矩阵需要跟随时间变化而变化

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_0 t_0} & e^{j2\pi f_1 t_0} & \cdots & e^{j2\pi f_{N-1} t_0} \\ e^{j2\pi f_0 t_1} & e^{j2\pi f_1 t_1} & \cdots & e^{j2\pi f_{N-1} t_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi f_0 t_{M-1}} & e^{j2\pi f_1 t_{M-1}} & \cdots & e^{j2\pi f_{N-1} t_{M-1}} \end{bmatrix}$$

式中: $t_n (n = 0, 1, \dots, M-1)$ 为窗内信号对应时间, $f_n (n = 0, 1, \dots, N-1)$ 为扩大的多普勒频率。利用以上的感知矩阵,运用重构算法恢复原信号频率。同时利用Hough变换,将锥顶标准的微多普勒正弦曲线从时频图中剔除出来,使得时频图中只剩下锥底的非正弦的微多普勒曲线^[12]。分别对这两种频率曲线提取曲线本身频率,得到频率变化函数。再次利用压缩感知从频率变化函数得到目标的运动周期^[14]。整个算法流程如图5所示。

4 仿真实验

利用计算机仿真验证模型假设目标进动,锥旋频率为

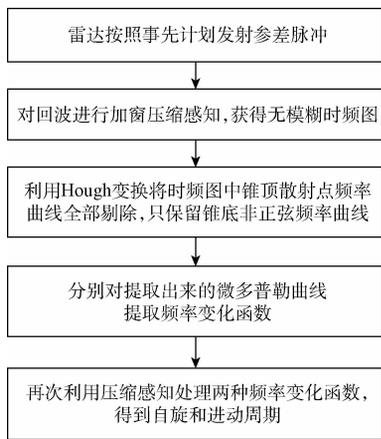


图 5 算法流程

3 Hz。由于加入了锥旋,此时要适当提高脉冲重复频率。因此选择脉冲重复频率为 850 Hz 和 1 025 Hz。设置两个散射点,其中一个锥顶,一个锥底。坐标分别为 $[0, 0, 1]$, $[0.3, 0.4, -0.5]$ 。散射点强度均为 1。初始欧拉角为 $[30^\circ, 30^\circ, 45^\circ]$ 。初始距离坐标为 $[1000e3, 5000e3, 5000e3]$ 。方位角和俯仰角为 $[60^\circ, 45^\circ]$ 。如图 6~9 所示。

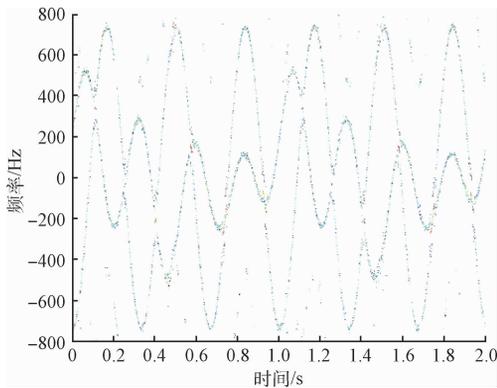


图 6 进动微多普勒时频图

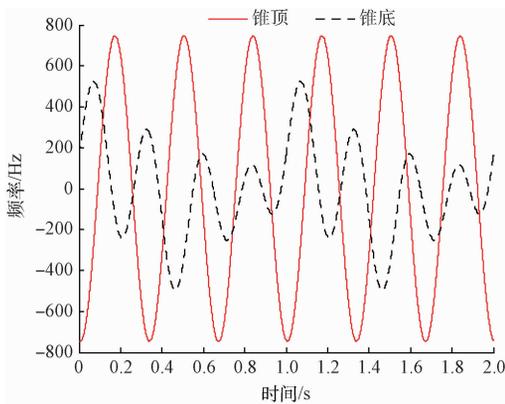


图 7 理论上进动微多普勒时频图

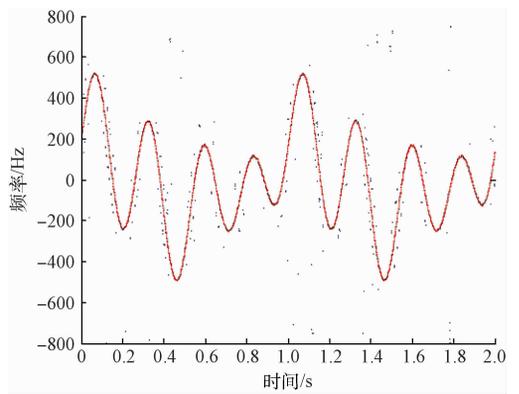


图 8 剔除正弦变化曲线后的时频图

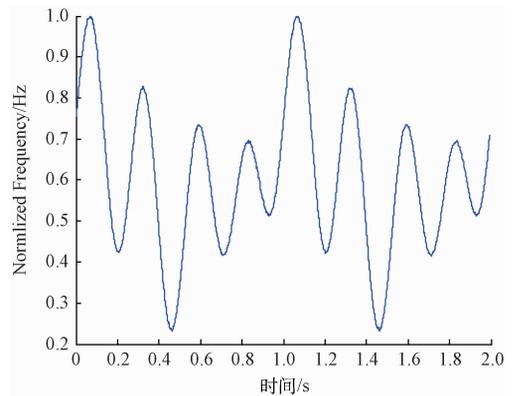


图 9 进动频率变化函数

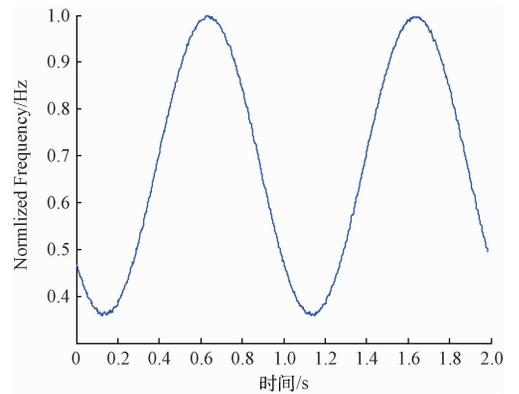


图 10 自旋频率变化函数

对于自旋目标,对时频图提取频率曲线的频率,得到频率变化函数如图 10 所示。从频率变化函数得到自旋的周期。从图中读出自旋周期为 1 Hz。

对于进动目标而言,由前面的式(3)同样可得相应的时频图与频率变化函数。

对比图 11 与图 12,可以看出,采用本文算法可以等效扩大微多普勒识别范围。与简单的自旋不同的是,文献[8]

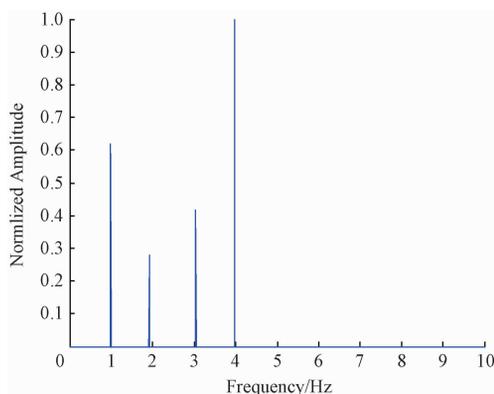


图 11 提取的进动周期

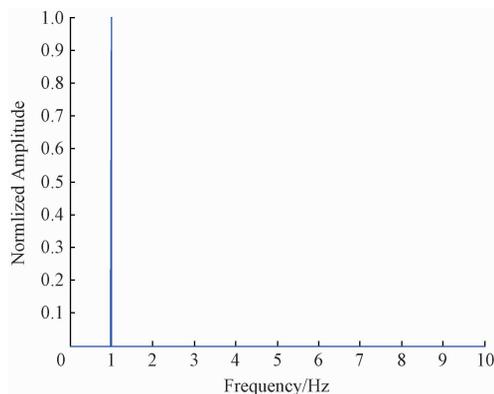


图 12 提取的自旋周期

指明:一个散射点进动,那么它的微多普勒应该含有 4 个分量。图中显示有 4 个分量,容易判断,自旋频率为 1 Hz,锥旋频率为 3 Hz。除以上两个分量还有一个分量为自旋频率与锥旋频率的和分量(图中的 4 Hz)。此外另有一个分量为自旋频率与锥旋频率的差分量(图中显示为 2 Hz)。

5 结 论

弹头的正确识别,关键是对其微多普勒信息的把握。本文通过研究弹头的运动模式,建立微动模型与回波模型。通过引入压缩感知,给出了压缩感知重构微多普勒的方法。解决在以往低脉冲重复频率下微多普勒模糊问题。减少了脉冲重复频率,提高了雷达信号利用效率。同时进一步提取了自旋和进动周期,为识别目标提供新的途径,也为后续工作提供了更多信息。

参考文献

[1] CHEN C C. 吴顺君,译. 雷达中的微多普勒效应[M]. 北京:电子工业出版社,2013.

- [2] 王兆云. 弹道中段目标微多普勒特征及目标参数估计[D]. 南京:南京大学,2014.
- [3] 屈文星,杨文革,张若禹. 应答式旋转目标的微多普勒研究[J]. 电子测量技术,2015,38(11):31-36.
- [4] 许会,任建,李邦宇,等. 应用于超宽带呼吸检测的压缩感知算法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(1):56-62.
- [5] 周辉,赵凤军,禹卫东. SAR 运动运动目标信号模型及微多普勒效应研究[J]. 电子测量技术,2015,38(11):135-142.
- [6] 魏迅,袁伟明,郭汝江. 基于 S-Method 分布的微多普勒特征分析[J]. 电子测量技术,2017,40(1):76-80.
- [7] 张玉玺,孙进平,张冰尘,等. 基于压缩感知理论的多普勒解模糊处理[J]. 电子与信息学报,2011,33(9):2103-2107.
- [8] 徐忆. 基于稀疏表示的进动辨识[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- [9] HAN J, WANG Q, QIN K Y. The time-frequency analysis of non-stationary signal based on FRFT and wigner-hough transform [J]. Automation Information, 2012(5):48-50.
- [10] 杨有春,童宁宁,冯存前,等. 基于齐次坐标的微动建模与微多普勒特征分析[J]. 现代防御技术,2011,39(4):174-178.
- [11] 孔舒亚,叶伟,劳国超. 基于压缩感知的 SAR 宽带干扰抑制方法[J]. 电子测量技术,2016,39(11):160-163.
- [12] LUO Y Z, FENG Y Q, LI S. Micro-Doppler curve separation and feature extraction based on the principle of the closest distance [J]. Science Technology and Engineering, 2014,14(30):186-191.
- [13] ZHUANG J B, DENG Z M, YE Y S. Micro-Doppler ambiguity resolution based on short-time compressed sensing [J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2015:1155-1162.
- [14] HAO Y S, YE Y S, DENG Z M. FEKO sparse micro-doppler modeling and CS reconstruction method [J]. Optics and Precision Engineering, 2016,24(6):1482-1490.
- [15] 叶淋美. 基于压缩感知的雷达信号处理应用研究[D]. 厦门:厦门大学,2014.

作者简介

李寰驰,1993 年出生,硕士研究生,主要研究方向为相控阵雷达技术。

E-mail: li4509549@163.com