

水下声探测系统载体振动干扰分析及抑制方法*

唐波, 谭思炜, 张静远

(海军工程大学兵器工程学院, 湖北武汉 430033)

摘要:针对水下探测系统载体振动对目标回波信号的微多普勒特征谱产生干扰的问题,从干扰产生的基本原理出发,推导了干扰的近似乘性表达式。在获取振动干扰数据的条件下,提出了针对乘性干扰的干扰抑制算法,并针对推导干扰乘性表达式时的近似条件,分析了近似算法带来的误差。仿真结果表明,该方法可有效抑制水下探测系统平台振动对目标回波信号的微多普勒特征谱产生的干扰,并且在绝大多数情况下,由算法带来的误差可以忽略不计。

关键词:微多普勒; 振动干扰; 干扰抑制; 水声探测; 乘性干扰

中图分类号: TJ630.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1001-2486(2022)06-089-06



听语音
与作者互动
聊科研

Vibration interference analysis of underwater acoustic detection system and its suppressing method

TANG Bo, TAN Siwei, ZHANG Jingyuan

(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the problem that the carrier vibration of underwater detection system interferes with the micro-Doppler spectrum of target echo signal, the approximate multiplicative expression of interference was derived from the basic principle of interference generation. With obtaining vibration interference data, an interference suppression algorithm for multiplicative interference was proposed. Meanwhile, the error caused by the approximate algorithm was analyzed according to the approximate conditions when the multiplicative expression of interference was derived. Simulation results show that the proposed method can effectively suppress the interference which is derived from vibration of underwater acoustic detection system and imposed on the micro-Doppler spectrum, and the algorithm error can be ignored generally.

Keywords: micro Doppler; vibration interference; interference suppression; acoustic detection; multiplicative interference

微多普勒技术在水声探测领域的研究和应用,为水下目标的检测和识别提供了新的途径和方法^[1-2]。通过分析目标微动部件的回波信号,提取微多普勒特征,可以获得目标微动部件的物理以及运动特征,可以此进行目标检测、特征识别和分类^[3-5]。

受水流以及自身运动机构的影响,除了预期的运动之外,水声探测系统随着载体的无规律振动会作为一种干扰信号叠加在回波信号当中,导致回波信号微多普勒特征谱偏差。因此,抑制载体振动干扰是水下目标微多普勒特征提取中必须考虑的问题^[6]。

关于微多普勒效应的文献中,一部分研究目标微多普勒特征提取^[7-12],一部分研究特征参数解算方法^[13-19],一部分研究在目标探测识别中的

应用^[20-22]。只有文献[23]中分析了平台振动对微多普勒谱的影响,然而文献中只进行了分析和数值仿真,并未给出抑制方法。

针对该问题,文中提出一种针对目标微多普勒特征谱的抑制探测系统平台振动干扰的方法,该方法首先在数学上从复杂的信号加干扰的表达式中分离出干扰成分,然后乘以干扰共轭信号来消除该干扰。

1 水下载体振动干扰分析

假设声探测设备发射频率为 f_c 的单频连续波信号^[24],则发射信号可表示为

$$s_t(t) = \exp(-j2\pi f_c t) \quad (1)$$

考虑水下目标的典型微运动——螺旋桨的旋转运动,水下声探测设备与螺旋桨的空间位置关

* 收稿日期:2021-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41976177)

作者简介:唐波(1980—),男,陕西西安人,讲师,博士,E-mail:39023784@qq.com;

谭思炜(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:tsw_0_0_0@163.com

系如图 1 所示。

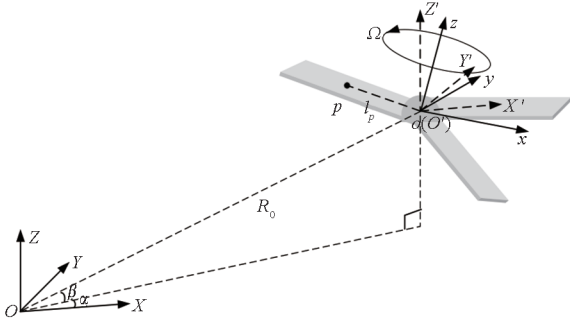


图 1 声探测设备与螺旋桨的空间几何关系

Fig. 1 Spatial relationship of acoustic detection equipment and propeller

以声探测设备为原点建立空间固定坐标系 $OXYZ$, 以螺旋桨的旋转轴中心为原点建立目标坐标系 $oxyz$, 以目标坐标系 $oxyz$ 原点为原点建立参考坐标系 $O'X'Y'Z'$, 参考坐标系平行于空间固定坐标系, 假设目标坐标系 $oxyz$ 变换到参考坐标系 $O'X'Y'Z'$ 的欧拉角为 $\vartheta, \ell, \varepsilon$, 旋转序列为 $x-y-z$, 螺旋桨以角速率 Ω 绕 z 轴旋转, 假设螺旋桨叶片上的声散射点 p 在目标坐标系 $oxyz$ 中位于 $(x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 0)$, 在 $t = 0$ 时刻初始旋转角为 φ_0 , 则 t 时刻的旋转角变为 $\varphi_t = \varphi_0 + \Omega t$, 从图 1 中的几何关系可知, 此时声探测设备到散射点 p 之间的距离为

$$r_p(t) = \|\mathbf{R} + \mathbf{v}t + \mathbf{M}_r \mathbf{L}_p\| \quad (2)$$

其中: $\mathbf{R} = (R_0 \cos\beta \cos\alpha, R_0 \cos\beta \sin\alpha, R_0 \sin\beta)$ 为声探测设备指向参考坐标系原点的向量, $R_0 = \|\mathbf{R}\|$ 为声探测设备到参考坐标系原点之间的距离, $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ 为螺旋桨相对于探测设备的平动速度向量, $\mathbf{L}_p = (l_p \cos\varphi_t, l_p \sin\varphi_t, 0)$ 为散射点 p 在目标坐标系 $oxyz$ 中的向量, $l_p = \|\mathbf{L}_p\|$ 为声散射点 p 到目标坐标系原点的距离, \mathbf{M}_r 为目标坐标系 $oxyz$ 到参考坐标系 $O'X'Y'Z'$ 的旋转矩阵, 并且有

$$\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} m_{11} = \cos\ell \cos\varepsilon \\ m_{12} = \sin\delta \sin\ell \cos\varepsilon + \cos\delta \sin\varepsilon \\ m_{13} = -\cos\delta \sin\ell \cos\varepsilon + \sin\delta \sin\varepsilon \\ m_{21} = -\cos\ell \sin\varepsilon \\ m_{22} = -\sin\delta \sin\ell \sin\varepsilon + \cos\delta \cos\varepsilon \\ m_{23} = \cos\delta \sin\ell \sin\varepsilon + \sin\delta \cos\varepsilon \\ m_{31} = \sin\ell \\ m_{32} = -\sin\delta \cos\ell \\ m_{33} = \cos\delta \cos\ell \end{cases} \quad (4)$$

假设仅存在螺旋桨回波, 并且不考虑混响、多径干扰等影响^[25], 则声探测设备接收到的旋转螺旋桨的回波信号为

$$s_r(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sigma_k \int_0^l \exp\left\{-j2\pi f_c \left[t - \frac{2r_p(t)}{c}\right] + \varphi_k\right\} dl_p \quad (5)$$

其中: N 为螺旋桨叶片数; σ_k 为每个叶片的目标散射强度; φ_k 为叶片初始相位; l 为叶片长度。

则螺旋桨回波的基带信号为

$$s_B(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sigma_k \int_0^l \exp\left[j2\pi f_c \frac{2r_p(t)}{c} + \varphi_k\right] dl_p \quad (6)$$

则第 k 个叶片的散射点 p 的回波相位函数为:

$$\Phi_k(t) = 2\pi f_c \frac{2r_p(t)}{c} + \varphi_k \quad (7)$$

对相位函数求导可得第 k 个叶片的散射点 p 的微多普勒频率为

$$f_{d_k}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\Phi_k(t)]}{dt} = \frac{2}{\lambda_c} \frac{d[r_p(t)]}{dt} \quad (8)$$

其中, λ_c 为发射信号波长。

当探测系统载体伴有振动 $n(t) = (a \cos\theta \cos\Theta, a \cos\theta \sin\Theta, a \sin\theta)$, 如图 2 所示, a 为振动 $n(t)$ 的幅度, 振动 $n(t)$ 在 XOY 面的投影与 X 轴的夹角为 Θ , 振动 $n(t)$ 与其在 XOY 面的投影的夹角为 θ ^[26]。

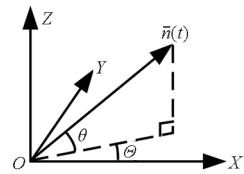


图 2 探测系统振动示意图

Fig. 2 Vibration figure of detection equipment

则此时声探测设备到散射点 p 之间的距离为

$$r_{p,n}(t) = \|\mathbf{R} + \mathbf{n}(t) + \mathbf{v}t + \mathbf{M}_r \mathbf{L}_p\| \quad (9)$$

此时螺旋桨回波的基带信号为

$$s_{B,n}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sigma_k \int_0^l \exp\left[j2\pi f_c \frac{2r_{p,n}(t)}{c} + \varphi_k\right] dl_p \quad (10)$$

相应地, 第 k 个叶片散射点 p 的微多普勒频率为

$$f_{d,k,n}(t) = \frac{2}{\lambda_c} \frac{d[r_{p,n}(t)]}{dt} \quad (11)$$

假设螺旋桨为三叶片, 声探测设备发射频率为 100 kHz 单频连续波信号, 声探测设备距离目标坐标系原点 $R_0 = 100$ m, 并且 $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$, 目

标坐标系 $oxyz$ 变换到参考坐标系 $O'X'Y'Z'$ 的欧拉角为 $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$, 叶片长度 $l = 2$ m, 旋转速度 $r = 4$ r/s, 取 $\sigma_k = 1$, $t = 0$ 时刻各叶片的初始旋转角分别为 $\varphi_0 = 0^\circ, \varphi_0 = 120^\circ$ 和 $\varphi_0 = 240^\circ$, 则螺旋桨回波信号微多普勒特征谱如图 3 所示, 其中颜色越深表示幅度越大。

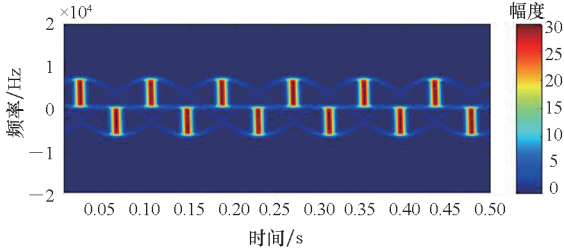


图3 螺旋桨回波信号微多普勒特征谱

Fig 3 Micro-Doppler characteristic of propeller echo signal

当探测系统随载体发生幅度 $a = 0.2$ m、 $\Theta = 30^\circ$ 、 $\theta = 60^\circ$ 、频率为 100 Hz 的简谐振动时, 回波信号微多普勒特征谱如图 4 所示。

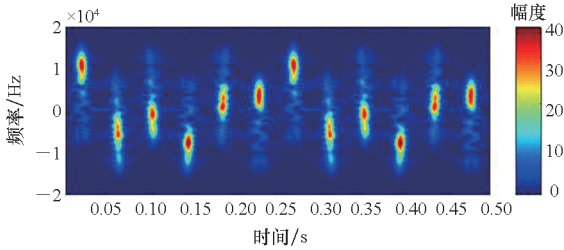


图4 探测系统振动时螺旋桨回波信号微多普勒特征谱

Fig 4 Micro-Doppler characteristic of propeller echo signal with vibration of detection equipment

从图 4 中可以看出, 当水下探测系统随载体产生振动时, 会严重影响回波信号微多普勒特征谱, 从而无法完成微多普勒特征参数的提取以及目标的识别和分类, 因此必须对载体振动干扰进行抑制。

2 干扰抑制方法分析

若不考虑平动, 式(9)可展开为

$$r_{p,n}(t) = \sqrt{R_0^2 + l_p^2 D + 2R_0(l_p E + aF) + a^2 + 2al_p G} \quad (12)$$

其中: $D = A^2 + B^2 + C^2$, $A = \cos\varphi_i \cos l \cos \varepsilon + \sin\varphi_i (\sin \delta \sin l \cos \varepsilon + \cos \delta \sin \varepsilon)$, $B = -\cos\varphi_i \cos l \sin \varepsilon + \sin\varphi_i (\sin \delta \sin l \sin \varepsilon + \cos \delta \cos \varepsilon)$, $C = \cos\varphi_i \sin l - \sin\varphi_i \sin \delta \cos l$, $E = A \cos \beta \cos \alpha + B \cos \beta \sin \alpha + C \sin \beta$, $F = \cos \beta \cos \alpha \cos \theta \cos \Theta + \cos \beta \sin \alpha \cos \theta \sin \Theta + \sin \beta \sin \theta$, $G = A \cos \theta \cos \Theta + B \cos \theta \sin \Theta + C \sin \theta$ 。

通常, 可认为 $a \ll R_0$ 、 $l \ll R_0$, 则有

$$\frac{a^2}{R_0^2} \rightarrow 0 \quad (13)$$

$$\frac{l_p^2}{R_0^2} \rightarrow 0 \quad (14)$$

$$\frac{al_p}{R_0^2} \rightarrow 0 \quad (15)$$

则对式(12)表达式进行变换, 并忽略式(13)~(15)中的无穷小量, 可得

$$r_{p,n}(t) \approx R_0 \sqrt{1 + \frac{2(l_p E + aF)}{R_0}} \quad (16)$$

对式(15)进行麦克劳林展开, 并忽略二次项以上的无穷小量, 可得

$$r_{p,n}(t) \approx R_0 + l_p E + aF \quad (17)$$

将式(17)代入式(10)可得

$$\begin{aligned} s_{B,n}(t) &= \sum_{k=0}^{N-1} \sigma_k \int_0^l \exp \left[j2\pi f_c \frac{2r_{p,n}(t)}{c} + \varphi_k \right] dl_p \\ &\approx \exp \left(j4\pi f_c \frac{aF}{c} \right) \sum_{k=0}^{N-1} \sigma_k \int_0^l \exp \left(j4\pi f_c \frac{R_0 + l_p E}{c} + \varphi_k \right) dl_p \end{aligned} \quad (18)$$

由式(18)可知, 干扰为叠加在目标信号上的乘性干扰, 其中 $aF = a (\cos \beta \cos \alpha \cos \theta \cos \Theta + \cos \beta \sin \alpha \cos \theta \sin \Theta + \sin \beta \sin \theta) = n(t) \frac{R}{\|R\|}$, 即

$n(t)$ 在探测系统视线方向上的分量。因此在获取干扰 $n(t)$ 的基础上, 计算干扰在探测系统视线方向上的分量, 然后通过回波信号上乘以干扰分量的共轭进行抑制, 可得到干扰抑制后的信号为

$$\hat{s}_{B,n}(t) = s_{B,n}(t) \exp \left(-j4\pi f_c \frac{aF}{c} \right) \quad (19)$$

对图 4 的仿真做式(19)的运算, 可得干扰抑制后的信号微多普勒特征谱如图 5 所示。

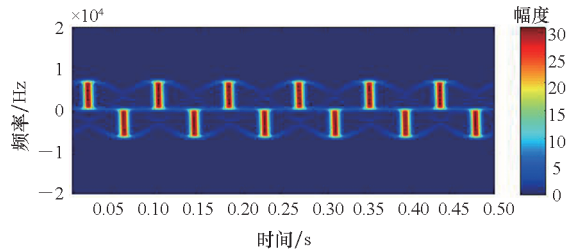


图5 干扰抑制后的螺旋桨回波信号微多普勒特征谱

Fig. 5 Micro-Doppler characteristic of propeller echo signal with interference suppression

从图 5 中可以看出, 谱线清晰可辨, 探测系统载体振动干扰得到了较好的抑制。

3 误差分析

由第 2 节的分析可知, 所得结论是基于假设 $l \ll R_0$ 和 $a \ll R_0$, 当该假设条件不满足时会产生较

大误差。

假设螺旋桨为三叶片,声探测设备发射频率为 100 kHz 单频连续波信号,声探测设备距离目标参考坐标系原点 $R_0 = 8\text{ m}$, 并且 $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$, 参考坐标系和目标坐标系无旋转,叶片长度 $l = 5\text{ m}$, 旋转速度 $r = 4\text{ r/s}$, 取 $\sigma_k = 1$, $t = 0$ 时刻各叶片的初始旋转角分别为 $\varphi_0 = 0^\circ, \varphi_0 = 120^\circ$ 和 $\varphi_0 = 240^\circ$, 探测系统随载体发生幅度 $a = 0.2\text{ m}$ 、 $\Theta = 30^\circ, \theta = 60^\circ$ 、频率为 100 Hz 的简谐振动,采用式(19)方法进行干扰抑制,螺旋桨回波信号微多普勒特征谱如图 6 所示。

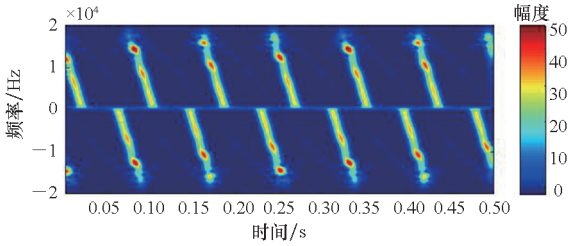


图 6 $R_0 = 8\text{ m}, l = 5\text{ m}$ 时螺旋桨回波微多普勒特征

Fig. 6 Micro-Doppler characteristic of propeller echo signal with $R_0 = 8\text{ m}, l = 5\text{ m}$

可以看出,当 l 的值接近 R_0 时,采用式(19)方法进行干扰抑制所得的回波信号仍保留有大量误差。

图 7 为 $R_0 = 10\text{ m}$ 时,采用式(19)运算后,信号频率的误差均值随螺旋桨叶片长度 l 的变化规律。

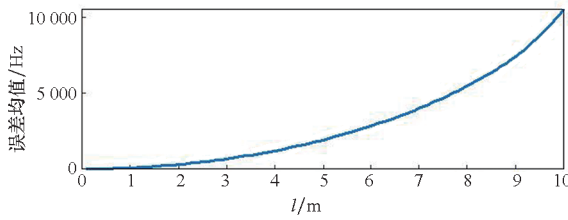


图 7 $R_0 = 10\text{ m}$ 时信号频率误差随 l 的变化规律

Fig. 7 Frequency error according to l with $R_0 = 10\text{ m}$

从图 7 中可以看出,随着 l 逐渐接近 R_0 , 频率误差也在逐渐增大,通常情况下螺旋桨叶片长度不可能太大,而探测设备大都处于较远距离,因此 $l \ll R_0$ 通常是符合实际情况的。

假设螺旋桨为三叶片,声探测设备发射频率为 100 kHz 单频连续波信号,声探测设备距离目标参考坐标系原点 $R_0 = 8\text{ m}$, 并且 $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$, 参考坐标系和目标坐标系无旋转,叶片长度 $l = 0.8\text{ m}$, 旋转速度 $r = 4\text{ r/s}$, 取 $\sigma_k = 1$, $t = 0$ 时刻各叶片的初始旋转角分别为 $\varphi_0 = 0^\circ, \varphi_0 = 120^\circ$ 和 $\varphi_0 = 240^\circ$, 探测系统随载体发生幅度 $a = 5\text{ m}$ 、 $\Theta =$

$30^\circ, \theta = 60^\circ$ 、频率为 100 Hz 的简谐振动,采用式(19)方法进行干扰抑制,螺旋桨回波信号微多普勒特征谱如图 8 所示。

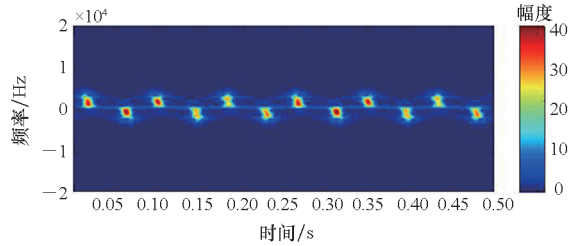


图 8 $R_0 = 8\text{ m}, a = 5\text{ m}$ 时螺旋桨回波微多普勒特征

Fig. 8 Micro-Doppler characteristic of propeller echo signal with $R_0 = 8\text{ m}, a = 5\text{ m}$

由图 8 可以看出,随着探测系统振动幅度的增大,采用式(19)运算得到的回波信号微多普勒特征谱出现了明显的干扰。

图 9 为 $R_0 = 10\text{ m}$ 时,采用式(19)运算后,信号频率的误差均值随探测系统振动幅度 a 的变化规律。

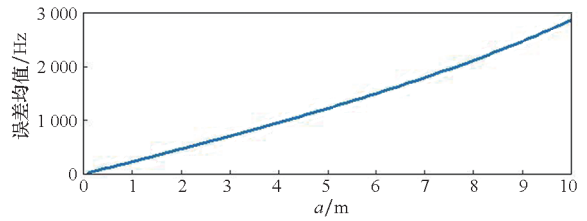


图 9 $R_0 = 10\text{ m}$ 时信号频率误差随 a 的变化规律

Fig. 9 Frequency error according to a with $R_0 = 10\text{ m}$

从图 9 可以看出,随着 a 逐渐接近 R_0 , 频率误差也在逐渐增大,通常情况探测系统振动幅度不可能太大或者变化较为缓慢,而探测设备大都处于较远距离,因此 $a \ll R_0$ 通常是符合实际情况的。

从以上分析可知,通常情况下,探测系统与目标的距离远大于螺旋桨叶片长度和探测系统振动幅度,因此采用式(19)的方法可以有效抑制探测系统平台振动干扰。

4 结论

本文针对基于微多普勒效应的水下目标探测系统载体振动干扰问题,采用麦克劳林级数展开,推导出了干扰信号的乘性表达式,并建立了载体振动干扰抑制算法,主要结论为如下:

1) 当 $l \ll R_0$ 和 $a \ll R_0$ 时,基于微多普勒效应的水下探测系统载体振动干扰可以简化为目标回波信号的乘性干扰,在准确获取干扰信号的情况下,采用文中的干扰抑制方程可有效抑制载体振

动干扰。

2) 当 $l \ll R_0$ 和 $a \ll R_0$ 条件不满足时,随着 l 和 a 逐渐接近 R_0 ,微多普勒特征谱误差逐渐增大,此时应采取其他干扰抑制方法。然而对于绝大多数应用来说,文中假设条件总能满足,因此文中方法可有效抑制基于微多普勒效应的水下探测系统载体振动干扰。

本文理论公式的推导思路和方法可推广到其他探测系统载体振动干扰抑制的研究中。

参考文献 (References)

- [1] TAHMOUSH D. Review of micro-Doppler signatures[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(9): 1140–1146.
- [2] 陈小龙,关键,何友. 微多普勒理论在海面目标检测中的应用及展望[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 123–134.
CHEN X L, GUAN J, HE Y. Applications and prospect of micro-motion theory in the detection of sea surface target[J]. Journal of Radars, 2013, 2(1): 123–134. (in Chinese)
- [3] CHEN V C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions[J]. IET Signal Processing, 2008, 2(3): 291.
- [4] 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.
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. (in Chinese)
- [5] 张群,何其芳,罗迎. 基于贝塞尔函数基信号分解的微动群目标特征提取方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3056–3062.
ZHANG Q, HE Q F, LUO Y. Micro-Doppler feature extraction of group targets using signal decomposition based on Bessel function basis [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(12): 3056–3062. (in Chinese)
- [6] 林新党,肖龙. 微多普勒特征提取方法研究[J]. 雷达与对抗, 2016, 36(3): 41–43, 61.
LIN X D, XIAO L. A method of micro-Doppler feature extraction[J]. Radar & ECM, 2016, 36(3): 41–43, 61. (in Chinese)
- [7] 马梁,刘进,王涛,等. 旋转对称目标滑动型散射中心的微 Doppler 特性[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(5): 605–616.
MA L, LIU J, WANG T, et al. Micro-Doppler characteristics of sliding-type scattering center on rotationally symmetric target [J]. SCIENCE CHINA Information Sciences, 2011, 41(5): 605–616. (in Chinese)
- [8] CHEN V C. The micro-Doppler effect in radar[M]. London: Artech House, 2011: 35–78.
- [9] THAYAPARAN T, STANKOVIĆ L, DJUROVIĆ I. Micro-Doppler-based target detection and feature extraction in indoor and outdoor environments [J]. Journal of the Franklin Institute, 2008, 345(6): 700–722.
- [10] 马梁,王涛,冯德军,等. 旋转目标距离像长度特性及微运动特征提取[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2273–2279.
MA L, WANG T, FENG D J, et al. The characteristic of range profile and micro-motion feature extraction for rotary target[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2273–2279. (in Chinese)
- [11] 何其芳,张群,罗迎,等. 正弦调频 Fourier-Bessel 变换及其在微动目标特征提取中的应用[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 593–601.
HE Q F, ZHANG Q, LUO Y, et al. A sinusoidal frequency modulation Fourier-Bessel transform and its application to micro-Doppler feature extraction [J]. Journal of Radars, 2018, 7(5): 593–601. (in Chinese)
- [12] GU F F, FU M H, LIANG B S, et al. Translational motion compensation and micro-Doppler feature extraction of space spinning targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(10): 1550–1554.
- [13] HE Z H, TAO F X, DUAN J, et al. Research on radar micro-Doppler feature parameter estimation of propeller aircraft[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 960: 012049.
- [14] LIU L H, MCLERNON D, GHOGHO M, et al. Ballistic missile detection via micro-Doppler frequency estimation from radar return[J]. Digital Signal Processing, 2012, 22(1): 87–95.
- [15] 黄健,李欣,黄晓涛,等. 基于微多普勒特征的坦克目标参数估计与身份识别[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1050–1055.
HUANG J, LI X, HUANG X T, et al. Micro-Doppler features based parameter estimation and identification of tank[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1050–1055. (in Chinese)
- [16] SURESH P, THAYAPARAN T, OBULESU T, et al. Extracting micro-Doppler radar signatures from rotating targets using Fourier-Bessel transform and time-frequency analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3204–3210.
- [17] 李康乐. 雷达目标微动特征提取与估计技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
LI K L. Research on feature extraction and parameters estimation for radar targets with micro-motions [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [18] ZHOU Y, CHEN Z Y, ZHANG L R, et al. Micro-Doppler curves extraction and parameters estimation for cone-shaped target with occlusion effect[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2892–2902.
- [19] SINGH A K, KIM Y H. Automatic measurement of blade length and rotation rate of drone using W-band micro-Doppler radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(5): 1895–1902.
- [20] 沈菲菲,李立钢,贾配洋,等. 一种基于雷达微多普勒效

- 应苍蝇识别的方法[J]. 电子设计工程, 2017, 25(9): 22-26, 30.
- SHEN F F, LI L G, JIA P Y, et al. A method of recognizing flies based on radar micro-Doppler effect [J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(9): 22-26, 30. (in Chinese)
- [21] 田坤, 李晋. 太赫兹频段微动特征边缘检测及提取方法[J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(1): 19-24, 36.
- TIAN K, LI J. Micro-motion feature extraction method based on edge detection in Terahertz band [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2018, 47(1): 19-24, 36. (in Chinese)
- [22] DING X F, FAN M M, WEI X Z, et al. Narrowband imaging method for spatial precession cone-shaped targets [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(4): 942-949.
- [23] 张群, 罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- ZHANG Q, LUO Y. Micro-doppler effect of radar targets [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [24] BO T, QIANG S. Analysis on suppression of echo signal of target body and translation in Micro-Doppler signal processing [C] // Proceedings of Artificial Intelligence in China, 2020: 205-211.
- [25] 唐波, 黄文玲, 陈喜. 水中目标微多普勒特征研究[J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(1): 92-94, 106.
- TANG B, HUANG W L, CHEN X. Research on micro-Doppler characteristics of underwater target [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2019, 31(1): 92-94, 106. (in Chinese)
- [26] 黄河, 邹明松, 蒋令闻. 海洋波导中目标声辐射场的计算方法[J]. 声学学报, 2019, 44(6): 1027-1035.
- HUANG H, ZOU M S, JIANG L W. Computing method of sound radiation of target in ocean acoustic environment [J]. Acta Acustica, 2019, 44(6): 1027-1035. (in Chinese)