

基于高阶时频分布的雷达目标微多普勒特征分析

李秋生^{1,2} 谢维信¹

(1. 深圳大学 ATR 国防科技重点实验室, 广东深圳 518060; 2. 赣南师范学院物理与电子信息学院, 江西赣州 341000)

摘 要: 目标微动特征提供了对目标细节的精细刻画, 为雷达目标的探测和识别提供了新的途径。在分析机动点目标、振动点目标、复合运动点目标等几种典型微动目标的微多普勒变化规律的基础上, 从高阶时频分析的角度出发, 提出了一种基于改进 L-Wigner 分布的微动目标微多普勒特征的分析算法, 详细分析了提高时频聚集性和消除交叉项的措施及其高效递推实现方法, 并对算法的复杂度进行了分析, 最后以机动点目标、振动点目标、复合运动点目标以及多个点目标构成的群目标为例对提出的算法进行了仿真分析。仿真结果表明, 相对于 Cohen 类双线性时频分布, 该算法对于复杂非线性调制目标回波信号提供了更好的时频聚集性, 并能够较好地消除交叉干扰项的影响, 且具有较小的算法运算量。

关键词: 微动; 微多普勒; 高阶时频分布; 瞬时频率

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)09-1291-05

Analysis of Micro-Doppler Signatures for Radar Targets Based on Higher Order Time-frequency Distribution

LI Qiu-sheng^{1,2} XIE Wei-xin¹

(1. ATR Key Laboratory of National Defense Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

2. School of Physics and Electronic Information, Gannan Teachers' College, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: Target characteristic with micro-motion depicts the target details detailedly, therefore it can provide a new way for radar target measurement and its recognition. On basis of analyzing the micro-Doppler laws of several typical targets with micro-motions, such as the maneuvered point target, the vibrational point target, the composite moving point target and so on, the paper proposed an algorithm to analyse the target micro-Doppler features using the modified L-Wigner distribution from the angle of higher order time-frequency analysis, analysed the measure to improve the time-frequency concentration and the measure to eliminate the cross-terms as well as its efficient recursive calculation method in detail, and then gave out the complexity analysis for the proposed algorithm. At last the algorithmic simulations were performed by taking the maneuvered point target, the vibrational point target, the composite moving point target and the group target containing multiple point targets as examples. Simulation results show, comparing with the Cohen class bilinear time-frequency distribution, the proposed algorithm can gain better time-frequency concentration for a complex nonlinear modulation target echo signals, and better eliminate the influence of the cross interference items, and at the same time it has a smaller algorithmic calculation burden.

Key words: Micro-motion; Micro-Doppler; Higher order time-frequency distribution; Instantaneous frequency

1 引言

目标特征控制技术(如隐身、伪装等)的发展对目标探测与识别提出了更高的技术要求。随着雷达测量能力和时频信号处理水平的提高,对目标细节的描述和刻画,尤其是目标运动状态的精细刻画已成为一个新的技术热点。近年来,目标微动特性在目标探测与识别领域的应用价值已引起国内外学术界和工程界的

广泛关注^[1]。一般将目标或目标部件除质心平动以外的振动、转动和加速运动等微小运动称为微动^[2]。微动目标电磁散射响应蕴含了精细的微多普勒特征信息,反映了目标的运动特征和结构特征。因此,微多普勒特征是一种有效的雷达识别特征,提供了目标识别的新方法,在目标分辨、分类和识别领域显示出巨大的潜力^[3-5]。

微动目标回波信号具有非线性和非平稳的特点,

时频分析是对其微多普勒特征进行分析的一种有效数学工具。然而现有的线性时频分布(如短时 Fourier 变换、Gabor 变换等)分辨率低,而高分辨时频分布(如 Wigner-Ville 分布)往往都包含交叉干扰项,交叉干扰项强度甚至高于目标信号特征,且对复杂非线性调频信号时频聚集性较差,难于直接应用于复杂目标微多普勒特征的分析^[6-8]。文献[9]提出了一种基于自适应线调频小波分析的雷达目标微多普勒特征分析方法,该方法一定程度上抑制了交叉干扰项的影响,但算法复杂度太大,且仍难于解决复杂非线性微动目标回波的多成分分辨问题。

为此,在分析雷达目标微多普勒变化规律的基础上,本文提出了基于改进 L-Wigner 变换(MLWD)的微多普勒特征分析方法,该方法首先计算目标回波信号的短时 Fourier 变换(STFT),然后由 STFT 迭代算得伪 Wigner-Ville 分布(PWVD),再由 PWVD 迭代算得改进 L-Wigner 变换,从而得到目标回波信号的高阶时频分布,这样既可消除交叉干扰项的影响,同时又能保持较高的时频聚集性。根据得到的高阶时频分布,即可得到目标微多普勒特征,进而可对目标微动参数进行估计,仿真实验验证了算法的有效性。

2 微多普勒的模型分析

微动是指目标除质心平动以外的振动、转动和加速运动等微小运动。目标微动对雷达回波的调制,表现在频谱上就是存在频谱展宽或副瓣。下面对几种典型微动目标的微多普勒模型进行分析。

2.1 机动点目标

对于机动点目标,在只考虑加速运动的情况下,设其在雷达一目标视线的径向运动规律为 $R(t) = R_0 + v_0 t + at^2/2$, 则其微多普勒为

$$f_{\text{md}} = \frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} (v_0 + at) \quad (1)$$

式中, λ 为雷达发射信号波长; R_0 为雷达到目标的初始距离; v_0 为目标初始速度; a 为目标加速度。从式(1)可以看出,机动点目标的微多普勒呈线性变化,在雷达发射信号波长 λ 一定的条件下,其斜率与目标加速度 a 成正比。

2.2 振动点目标

假定点目标作径向正弦振动,其振动规律为 $R(t) = R_0 + A \sin(2\pi f_v t)$, 其中 A 为振幅, f_v 为振动频率,则其微多普勒为

$$f_{\text{md}} = \frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{4\pi f_v A}{\lambda} \cos(2\pi f_v t) \quad (2)$$

可见其微多普勒按余弦规律变化,调制频率与振动频率一致,幅度与振幅 A 和振动频率 f_v 的乘积成正比,与雷达发射信号波长 λ 成反比。

2.3 复合运动点目标

设点目标在径向同时作加速运动和正弦振动,其

运动规律为 $R(t) = R_0 + v_0 t + at^2/2 + A \sin(2\pi f_v t)$, 则其微多普勒为

$$f_{\text{md}} = \frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} (v_0 + at) + \frac{4\pi f_v A}{\lambda} \cos(2\pi f_v t) \quad (3)$$

可见其微多普勒沿一斜率为 $2a/\lambda$ 的直线按余弦规律变化。

2.4 群目标

前面分析了点目标微多普勒的变化规律,对于群目标,其微多普勒为

$$f_{\text{md}} = \sum_{n=1}^N f_{\text{md}n} = \sum_{n=1}^N \frac{2}{\lambda} \frac{dR_n(t)}{dt} \quad (4)$$

式中, N 为群目标中点目标的个数; $f_{\text{md}n}$ 为第 n 个点目标的微多普勒; $R_n(t)$ 为第 n 个点目标的径向运动规律,它可以是机动点目标,振动点目标,或者是复合运动点目标。

时频分析是对目标回波微多普勒特征进行分析的有力数学工具。短时 Fourier 变换、Gabor 变换等时频表示具有线性特性,但分辨率较低,一般较少采用。Wigner-Ville 分布等 Cohen 类时频分布虽然对于线性调频信号具有较好的时频聚集性,但对于非线性调频信号的瞬时频率的估计是有偏的,会导致大量的虚假信息(自交叉项)产生,影响信号项的检测^[10]。因此,对于复杂微多普勒特征的分析,宜采用对非线性调频信号具有较好的时频聚集性的 L 类时频分布,如 L-Wigner 分布及其改进算法^[11],但需要较好地解决交叉项的干扰问题。

3 基于高阶时频分布的微多普勒特征分析

为解决目标微多普勒特征的分析问题,本文拟采用基于改进 L-Wigner 变换的高阶时频分析方法,通过加窗处理和迭代计算等技术手段来提高时频聚集性以及消除交叉项的影响,进而实现对目标复杂微多普勒特征的提取。

3.1 改进 L-Wigner 分布及其高效算法

3.1.1 L-Wigner 分布的定义

考虑一个解析信号 $z(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}$, 其中幅度 $a(t)$ 相对于相位 $\varphi(t)$ 为缓变的,即有 $|a'(t)| \ll |\varphi'(t)|$ 。则其伪 L-Wigner 分布(PLWD)定义为^[11]

$$\text{PLWD}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} z^L \left(t + \frac{\tau}{2L} \right) \cdot z^{*L} \left(t - \frac{\tau}{2L} \right) w_L(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

式中, $w_L(\tau)$ 为窗函数,一般取实偶函数; L 为大于 0 的整数。式(5)中,当取 $w_L(\tau) = 1$ 时,则 PLWD 退化为 L-Wigner 分布(LWD);当取 $L=1$ 时,则 PLWD 退化为伪 Wigner-Ville 分布(PWVD)。

若将 $\varphi(t + \tau/2L)$ 和 $\varphi(t - \tau/2L)$ 作三阶泰勒展开,则 $z(t)$ 的 PLWD 可进一步写成

$$PLWD(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} |a(t)|^{2L} \delta[\omega - \varphi'(t)] *_{\omega} W_L(\omega) *_{\omega} FT \{ \exp[j\tau^3(\varphi'''(t+\eta_1) + \varphi'''(t-\eta_2))/48L^2] \} \quad (6)$$

式中, FT[] 为 Fourier 变换算子; $W_L(\omega) = FT[w_L(\tau)]$; $\eta_1, \eta_2 \in [0, \tau/2L]$; $*_{\omega}$ 表示关于变量 ω 作卷积。显然,若 L 充分大,则 PLWD 可以逼近任何调频信号的理想加窗时频分布。

3.1.2 改进 L-Wigner 分布的计算

这里以一多分量信号为例来讨论 PLWD 的计算。信号形式为

$$z(t) = \sum_{i=1}^M a_i(t) e^{j\varphi_i(t)} \quad (7)$$

式中, $a_i(t)$ 相对于 $\varphi_i(t)$ 为缓变的。下面对 PLWD 算法的推导将以信号的短时 Fourier 变换 (STFT) 为基础。易知, $z(t)$ 的 STFT 为

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t+\tau) w(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (8)$$

若将 $\varphi_i(t+\tau)$ 作二阶泰勒展开,并假定 $a_i(t+\tau)$ 在窗函数内的变化忽略不计,则有

$$STFT(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^M a_i(t) e^{j\varphi_i(t)} \delta[\omega - \varphi'_i(t)] *_{\omega} W(\omega) *_{\omega} FT \{ e^{j\tau^2\varphi''(t+\eta)/2} \} \quad (9)$$

若进一步假定 $\varphi''_i(t+\eta)$ 在窗函数内的变化可忽略不计,则由式(9)可得 $z(t)$ 的谱图为

$$SPEC(t, \omega) = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M a_i(t) a_l(t) e^{j[\varphi_i(t) - \varphi_l(t)]} \cdot W[\omega - \varphi'_i(t)] W^*[\omega - \varphi'_l(t)] \quad (10)$$

假设 $W(\omega)$ 带宽为 W_B ,且当 $|\omega| > W_B/2$ 时,有 $W(\omega) = 0$,则当 $|\varphi'_i(t) - \varphi'_l(t)| < W_B$ 时,谱图中第 i 和第 l 个信号分量将产生交叉干扰项;反之,谱图中各信号分量的能量将聚集在各自的瞬时频率处。

接下来我们分析一下 PWVD (式(5)中 $L=1$) 的计算。若取实窗函数,则 PWVD 可由 STFT 表示为

$$PWVD(t, \omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} STFT(t, \omega + \theta) \cdot STFT^*(t, \omega - \theta) d\theta \quad (11)$$

对于式(7)所示的多分量信号,其 PWVD 为

$$PWVD(t, \omega) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M a_i(t) a_l(t) e^{j[\varphi_i(t) - \varphi_l(t)]} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} W[\omega + \theta - \varphi'_i(t)] \cdot W[\omega - \theta - \varphi'_l(t)] d\theta \quad (12)$$

从式(12)可以看出,非零项应该满足如下条件:

$$\begin{cases} |\omega + \theta - \varphi'_i(t)| < W_B/2 \\ |\omega - \theta - \varphi'_l(t)| < W_B/2 \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)两不等式相加,可得

$$\left| \omega - \frac{\varphi'_i(t) + \varphi'_l(t)}{2} \right| < W_B/2 \quad (14)$$

将式(13)两不等式相减,可得

$$\left| \theta - \frac{\varphi'_i(t) - \varphi'_l(t)}{2} \right| < W_B/2 \quad (15)$$

从式(14)和(15)可以看出, PWVD 的信号项 (对 $i=l$) 聚集在其瞬时频率附近,其大小由沿 $\theta=0$ 、宽度为 W_B 的带型区域的积分得到;交叉干扰项位于各信号分量瞬时频率曲线的中位线上,其大小由沿 $\theta = [\varphi'_i(t) - \varphi'_l(t)]/2$ 、宽度为 W_B 的带型区域的积分得到。因此,若对式(11)的积分作频域加窗处理,即

$$MPWVD(t, \omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta) STFT(t, \omega + \theta) \cdot STFT^*(t, \omega - \theta) d\theta \quad (16)$$

式中,频域窗函数 $P(\theta)$ 的带宽 W_p 满足

$$W_B \leq W_p < |\varphi'_i(t) - \varphi'_l(t)| - W_B \quad (17)$$

则 MPWVD 在保持对信号项的时频聚集性的同时,能充分抑制交叉干扰项的影响。

类似地, PLWD 可以认为是 PWVD 的卷积。对于 $L=2$,改进的伪 L-Wigner 分布 (MPLWD) 可计算如下

$$MPLWD(t, \omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P_1(\theta) MPWVD(t, \omega + \theta) \cdot MPWVD^*(t, \omega - \theta) d\theta \quad (18)$$

式中, $P_1(\theta)$ 具有与式(16)的 $P(\theta)$ 相同的性质。把两个 $L=2$ 的 MPLWD 相卷积,可得 $L=4$ 的 MPLWD。依此类推,即可得到高时频聚集性,同时又充分抑制各信号分量间的交叉干扰。

若取 $P(\theta)$ 为矩形窗,则式(16)和(18)的离散形式为^[12]

$$MPWVD(n, k) = |\text{STFT}(n, k)|^2 + 2 \sum_{i=1}^{N_p} \text{Re}[\text{STFT}(n, k+i) \text{STFT}^*(n, k-i)] \quad (19)$$

$$MPLWD_{2L}(n, k) = MPLWD_L^2(n, k) + 2 \sum_{i=1}^{N_p} MPLWD_L(n, k+i) MPLWD_L(n, k-i) \quad (20)$$

式中, $2N_p+1$ 为离散窗函数 $P(\theta)$ 的宽度。

3.1.3 算法复杂度分析

下面分析离散情况下 MPLWD 的计算量。假设窗函数 $w(\tau)$ 中包含的信号长度为 N_0 ,则由文献[13]可知,在由式(19)计算 $MPWVD(n, k)$ 时,所需复数乘法为 $N_0(3+N_p)/2$,复数加法为 $N_0(6+N_p)/2$,而一次复数乘法共需 4 次实数乘法 and 2 次实数加法,一次复数加法需要 2 次实数加法,故所需实数乘法次数为 $2N_0(3+N_p)$,实数加法次数为 $N_0(9+2N_p)$;由式(20)计算 $MPLWD_{2L}(n, k)$ 时,所需实数乘法次数为 $N_0(3+N_p)/2$,实数加法次数为 $N_0(6+N_p)/2$ 。若取 $L=4$,则计算 $MPLWD_4(n, k)$ 所需的总的实数乘法次数为 $3N_0(3+N_p)$,总的实数加法次数为 $3N_0(5+N_p)$ 。由此可见,算法运算量不大,易于实现。

3.2 仿真计算

为验证算法的有效性,这里分别以机动点目标、振动点目标、复合运动点目标和多个点目标构成的群目标为例进行仿真,并与 Cohen 类双线性时频分布中对时频聚集性和交叉项抑制具有较好兼顾的平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SPWVD) [10] 进行对比分析。设雷达发射信号为单频连续波,频率 $f_0 = 3$ GHz, $t = 0$ 时刻雷达目标径向距离 $R_0 = 2000$ m; 采样率 $f_s = 0.75$ kHz, $M = N = 256$, 回波信号强度归一化; 若 STFT 离散分析窗采用 Hamming 窗, 宽度取 21, 则由式 (16) 知, 可取 $N_p = 10$ 。此外, 平滑伪 Wigner-Ville 时频分析平滑窗也选用 Hamming 窗, 宽度取 64。

3.2.1 机动点目标

设机动点目标的径向运动规律为 $R(t) = R_0 + t + 10t^2$, 则图 1(a) 和 (b) 分别给出了其回波信号的平滑伪 Wigner-Ville 分布及其等高线投影以及 $L = 8$ 时的改进 L-Wigner 分布及其等高线投影。从图中可以看出, 由于机动点目标的微多普勒特征具有线性调频特性, 因而改进 L-Wigner 分布和平滑伪 Wigner-Ville 分布均具有良好的时频聚集性, 但改进 L-Wigner 分布具有比平滑伪 Wigner-Ville 分布更为优越的时频聚集性。

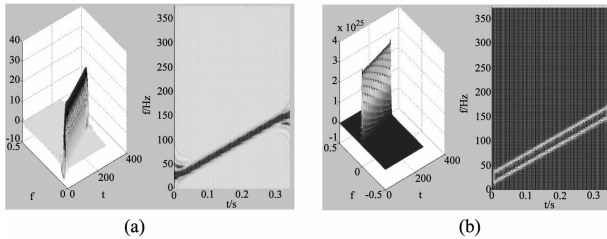


图 1 机动点目标 (a) 平滑伪 Wigner-Ville 分布及其等高线投影 (b) $L = 8$ 时改进 L-Wigner 分布及其等高线投影

Fig. 1 The maneuvered point target (a) The SPWVD as well as its contour. (b) The MPLWD as well as its contour with $L = 8$.

3.2.2 振动点目标

设振动点目标的径向运动规律为 $R(t) = R_0 + 0.025 \sin(24\pi t)$, 则图 2(a) 和 (b) 分别给出了其回波信号的平滑伪 Wigner-Ville 分布及其等高线投影以及 $L = 8$ 时的改进 L-Wigner 分布及其等高线投影。从图中可以看出, 由于振动点目标的微多普勒特征的非线性正弦调制特性, 作为双线性时频分布的平滑伪 Wigner-Ville 分布具有较为明显的自干扰项, 且时频聚集性较差, 而改进 L-Wigner 分布则仍然保持了优越的时频聚集性能。

3.2.3 复合运动点目标

设复合运动点目标的径向运动规律为 $R(t) = R_0 + 10t^2 + 0.025 \sin(24\pi t)$, 则图 3(a) 和 (b) 分别给出了其回波信号的平滑伪 Wigner-Ville 分布及其等高线投影以及 $L = 8$ 时的改进 L-Wigner 分布及其等高线投影。从图中可以看出, 与振动点目标类似, 由于复合运动点

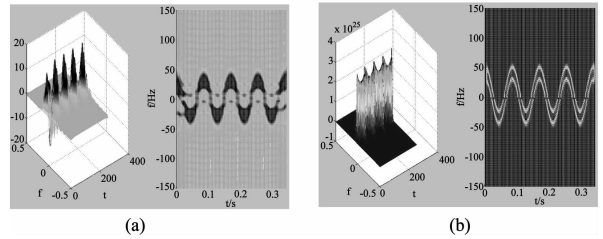


图 2 振动点目标 (a) 平滑伪 Wigner-Ville 分布及其等高线投影 (b) $L = 8$ 时改进 L-Wigner 分布及其等高线投影

Fig. 2 The vibrational point target (a) The SPWVD as well as its contour. (b) The MPLWD as well as its contour with $L = 8$

目标的微多普勒特征的非线性调制特性, 作为双线性时频分布的平滑伪 Wigner-Ville 分布也存在较为明显的自干扰项, 且时频聚集性较差, 而改进 L-Wigner 分布则依然保持着优越的时频聚集性能。

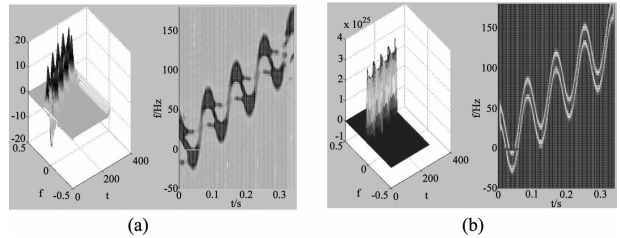


图 3 复合运动点目标 (a) 平滑伪 Wigner-Ville 分布及其等高线投影 (b) $L = 8$ 时改进 L-Wigner 分布及其等高线投影

Fig. 3 The composite moving point target (a) The SPWVD as well as its contour. (b) The MPLWD as well as its contour with $L = 8$

3.2.4 群目标

设群目标中包含一个机动点目标和一个振动点目标, 其径向运动规律分别为 $R_1(t) = R_0 + 8t + t^2$ 和 $R_2(t) = R_0 + 0.025 \sin(24\pi t)$, 则图 4(a) 和 (b) 分别给出了其回波信号的平滑伪 Wigner-Ville 分布及其等高线投影 $L = 8$ 时的改进 L-Wigner 分布及其等高线投影。从图中可以看出, 对于多分量信号, 由于均作了加窗处理, 因此平滑伪 Wigner-Ville 分布和改进 L-Wigner 分布均能较好地抑制信号分量间的交叉干扰项, 但与前面分析类似, 平滑伪 Wigner-Ville 分布对于非线性调频信号时频聚集性较差, 无法抑制信号的自干扰项, 而改进 L-Wigner 分布则在抑制信号分量间的交叉干扰项和自干扰项的同时, 依然保持了各信号分量较高的时频聚集性。

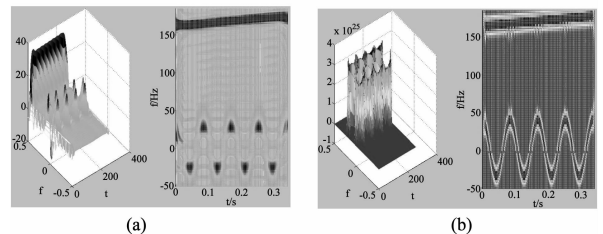


图 4 复合运动点目标 (a) 平滑伪 Wigner-Ville 分布及其等高线投影 (b) $L = 8$ 时改进 L-Wigner 分布及其等高线投影

Fig. 4 The multiple targets (a) The SPWVD as well as its contour. (b) The MPLWD as well as its contour with $L = 8$

4 结束语

目标微动特征反映了目标的电磁散射特性、几何结构特性和运动特性,为雷达目标探测和识别提供了新的途径。本文在分析几种典型雷达目标微多普勒变化规律的基础上,提出了基于改进 L-Wigner 高阶时频分布的目标微多普勒特征分析算法,并对单频连续波照射条件下机动点目标、振动点目标、复合运动点目标以及多个点目标构成的群目标的微多普勒特征进行了仿真分析。仿真分析表明,该算法对于复杂非线性调制点目标回波信号具有良好的时频聚集性,能够有效提取出目标的微多普勒信息,并具有较小的算法运算量。在今后的研究中,还需就复杂微动目标的雷达特征提取、微动目标的宽带雷达特征以及基于微多普勒的雷达目标成像等方面开展进一步的研究工作。

参考文献

- [1] 庄钊文,刘永祥,黎湘,目标微动特性研究进展[J]. 电子学报,2007,35(3):520-525.
Zhuang Z. W., Liu Y. X., and Li X., The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 520-525. (in Chinese)
- [2] Chen V. C., Li F. Y., Ho S. S., and Wechsler H., Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Trans. on AES, 2006, 42(1): 2-21.
- [3] Liu Y. X., Chen H. Y., Li X., and Zhuang Z. W., Radar micro-motion target resolution[C]. Proceedings of ICRP 2007: 1411-1414.
- [4] Chen V. C., Miceli W. J., and Himed B., Micro-Doppler analysis in ISAR-review and perspectives[C]. Proceedings of ICRP 2009: 49-54.
- [5] 黄健,李欣,黄晓涛,贺峰,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., and He F., Micro-Doppler features based on parameter estimation and identification of tank[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(5): 1050-1055. (in Chinese)
- [6] 李开明,李长栋,李松,李宏静,张群,基于 Gabor 变换的微动目标微多普勒分析与仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2010,11(1):40-43.
Li K. M., Li C. D., Li S., Li H. J., and Zhang Q., Analysis and simulation for micro-Doppler information of micro-motion target based on Gabor transformation[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science

Edition), 2010, 11(1): 40-43. (in Chinese)

- [7] 陈行勇,刘永祥,黎湘,郭桂蓉,雷达目标微多普勒特征提取[J]. 信号处理,2007,23(2):222-226.
Chen H. Y., Liu Y. X., Li X., and Guo G. R., Extraction of micro-Doppler signatures for radar target[J]. Signal Processing, 2007, 23(2): 222-226. (in Chinese)
- [8] 胡航,李绍滨,杨秀萍. 基于高效时频分析的多 LFM 信号源的 DOA 估计[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(3):534-537.
Hu H., Li S. B., Yang X. P., DOA estimation based on high efficient time-frequency analysis for multiple LFM signal sources[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(3): 534-537. (in Chinese)
- [9] 黄小红,贺夏,辛玉林,陈曾平,基于时频特征的低分辨雷达微动多目标分辨方法[J]. 电子与信息学报,2010,32(10):2342-2347.
Huang X. H., He X., Xin Y. L., and Chen Z. P., Resolving multiple targets with micro-motions based on time-frequency feature with low-resolution radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(10): 2342-2347. (in Chinese)
- [10] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998. 35-70.
- [11] Stankovic LJ., A method for improved distribution concentration in the time-frequency analysis of multicomponent signals using the L-Wigner distribution[J]. IEEE Trans. on SP, 1995, 43(5):1262-1268.
- [12] Stankovic LJ., A multitime definition of the Wigner higher order distribution: L-Wigner distribution[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1994, 1(7): 106-109.
- [13] Stankovic LJ., A method for time-frequency analysis[J]. IEEE Trans. on SP, 1994, 42(1): 225-229.

作者简介



李秋生(1976-),男,讲师,博士研究生,研究方向为智能信息处理、目标识别与跟踪等。

E-mail:bjliqiusheng@163.com,
liqiusheng@email.szu.edu.cn



谢维信(1941-),男,教授,博士生导师,研究方向为智能信息处理、模糊信息处理、智能人机交互、对地观测技术等。