

文章编号: 2095-4980(2017)02-0206-05

组网雷达下的弹道目标三维微动识别

王宇晨¹, 雷 腾², 胡晓伟¹, 徐培胜³

(1.空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2.中国人民解放军 95899 部队, 甘肃 酒泉 735018;
3.中国人民解放军 93575 部队, 河北 承德 067000)

摘 要: 基于组网雷达的多视角特性, 研究了弹道目标的三维微动识别。建立了有翼、无翼锥体目标在进动、摆动和滚动形式下的微动模型, 理论分析了各种微动目标的距离信号形式, 得到了不同微动目标的频域特征, 在此基础上提出了基于组网雷达多视角频域积累的微动类型识别方法。实验验证了该方法的有效性。

关键词: 弹道目标; 组网雷达; 三维微动; 目标识别

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0206

Ballistic targets recognition based on three-dimensional micro-motion in radar networks

WANG Yuchen¹, LEI Teng², HU Xiaowei¹, XU Peisheng³

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710051, China; 2. Unit 95899 of the PLA, Jiuquan Gansu 735018, China; 3. Unit 93575 of the PLA, Chengde Hebei 735018, China)

Abstract: The three-dimensional recognition method based on radar networks is studied. Micro-motion models are built for precessing, swinging and spinning cone-shaped targets with and without empennages. Then the micro-ranges of all the targets are analyzed, and their frequency characteristics are obtained. Furthermore, one classification method is put forward based on frequency integration in multi-view. This method is validated to be effective by experiments.

Keywords: ballistic target; radar networks; three-dimensional micro-motion; target recognition

微动信息是进行弹道导弹识别的一个重要依据^[1]。微动特征刻画了目标除主体运动外的精细运动规律, 是区别于其他运动目标的特有的身份标识^[2-3]。弹道目标在中段飞行中存在大量的伴飞物, 其中轻诱饵和碎片随机运动, 不存在稳定的微动形式; 重诱饵会作规律性的摆动或滚动; 而弹头本身由于存在姿态控制, 将处于进动形式^[4]。通过目标微运动形式的差异, 可以实现弹道目标的识别。当前研究都是基于单基雷达的微动识别, 而单基条件下获取的仅是空间微动信息在雷达视线方向的投影, 不能准确全面地刻画目标的微动规律。本文基于组网雷达信息研究弹道目标识别所面临的最为关键和现实的问题——三维微动目标的分类识别, 针对弹头锥体目标, 分别建立了进动、摆动和滚动类型下的三维微动模型, 得到了不同微动目标的频域特征, 并提出了基于频域特征的三维微动识别方法。

1 弹道目标微动建模

1.1 有翼锥体目标微动建模

对于锥体上一散射点 P , 设其在本地坐标系中的初始位置为 r_p , 则 t 时刻在参考坐标系中位置可表示为:

$$r(t) = R_p(t) R_{\text{init}} r_p \quad (1)$$

式中: $R_p(t)$ 为 t 时刻的旋转矩阵; R_{init} 为锥体的初始旋转矩阵。对于锥顶散射点 $R_p(t) = R_{\text{coning}}$, $R_{\text{coning}} = I + \hat{\omega}'_c \sin \Omega_c t + \hat{\omega}'_c{}^2 (1 - \cos \Omega_c t)$ 为锥旋旋转矩阵, 其中 I 是单位矩阵, ω_c 为锥旋角速度矢量, $\Omega_c = \|\omega_c\|$, $\hat{\omega}'_c = \omega_c / \Omega_c$, $\hat{\omega}'_c$ 为 ω'_c 的反对称矩阵。对于尾翼散射点 $R_p(t) = R_{\text{coning}} R_{\text{spinning}}$, $R_{\text{spinning}} = I + \hat{\omega}'_s \sin \Omega_s t + \hat{\omega}'_s{}^2 (1 - \cos \Omega_s t)$ 为自旋旋转矩阵, 其中 ω_s 为自旋角速度矢量, $\Omega_s = \|\omega_s\|$, $\omega'_s = \omega_s / \Omega_s$, $\hat{\omega}'_s$ 为 ω'_s 的反对称矩阵。

收稿日期: 2015-11-10; 修回日期: 2016-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372166)

摆动是锥体对称轴在某一空间平面内作周期性摇摆, 摆动角 $\theta(t) = \theta_s \sin \omega_s t$, 其中 θ_s 和 ω_s 分别为摆动幅度和摆动角频率。如果将摆动看作是围绕其摆动平面法线方向的非匀速转动, 则摆动锥体的坐标位置可以用式(1)来表示, 此时 $\mathbf{R}_p(t) = \mathbf{R}_{\text{swing}}$, $\mathbf{R}_{\text{swing}} = \mathbf{I} + \hat{\omega}'_s \sin \Theta(t) + \hat{\omega}'_s{}^2 (1 - \cos \Theta(t))$ 为摆动旋转矩阵, 其中 $\hat{\omega}'_s$ 为摆动平面单位法向矢量, $\hat{\omega}'_s$ 为 $\hat{\omega}'_s$ 的反对称矩阵。 $\Theta(t)$ 为转动角度, 此时它不再是匀速变化, 而由摆动角 $\theta(t)$ 决定。

锥体滚动模型可以看作是锥旋角速度为 0 的进动, 即 $\mathbf{R}_{\text{coning}} = \mathbf{I}$ 时进动模型的特殊情况。

1.2 无翼锥体目标微动建模

设锥体质心到底面的距离为 d , 底面半径为 a , 则根据锥体底面非理想散射点与雷达视线、锥体结构的空间相对位置关系, 其位置矢量可表示为 $\mathbf{r}(t) = \pm a \cdot \mathbf{n}_{\text{ine}}(t) + d \cdot \mathbf{n}_s(t)$, 其中 $\mathbf{n}_s(t)$ 为 t 时刻锥体轴线方向单位矢量 $\mathbf{n}_s(t) = \mathbf{R}_{\text{coning}} \mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{r}_p$, \mathbf{r}_p 为初始时刻轴线方向单位矢量; $\mathbf{n}_{\text{ine}}(t) = \frac{\mathbf{n}_s(t) \times [\mathbf{n}_s(t) \times \mathbf{n}_{\text{los}}]}{\|\mathbf{n}_s(t) \times [\mathbf{n}_s(t) \times \mathbf{n}_{\text{los}}]\|}$, 表示雷达视线和锥体轴线所成平面与底面的交线方向单位矢量; $\pm a$ 分别对应底面边缘的 2 个非理想散射点。

摆动模型下的非理想散射点同样为雷达视线和目标对称轴形成的平面与底部平面边缘的交点。对于滚动锥体的非理想散射点, 其位置不随时间变化。

2 微动频域特征分析

2.1 进动

1) 对于锥顶散射点, 设雷达视线方向单位矢量为 \mathbf{n}_{los} , 则由微动引起的雷达视线上的微距离变化为:

$$\begin{aligned} r(t) = \mathbf{r}(t) \cdot \mathbf{n}_{\text{los}} = (\mathbf{R}_{\text{coning}} \mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{r}_p)^T \mathbf{n}_{\text{los}} = \left\{ \left[\mathbf{I} + \hat{\omega}'_c \sin \Omega_c t + \hat{\omega}'_c{}^2 (1 - \cos \Omega_c t) \right] \mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{r}_p \right\}^T \mathbf{n}_{\text{los}} = \\ (\mathbf{A}_0 \mathbf{r}_0)^T \mathbf{n}_{\text{los}} + (\mathbf{A}_1 \mathbf{r}_0)^T \mathbf{n}_{\text{los}} \sin \Omega_c t + (\mathbf{A}_2 \mathbf{r}_0)^T \mathbf{n}_{\text{los}} \cos \Omega_c t \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}_0 = \mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{r}_p$; $\mathbf{A}_0, \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ 为推导过程中的常量矩阵, 由于篇幅限制具体形式不再给出。由式(2)可知, 进动形式下锥顶散射点的微距离是锥旋频率的单频信号, 信号幅度和相位由散射点位置、锥旋矢量和雷达视角共同决定。

2) 对于有翼锥体尾翼散射点, 微距离变化公式可表示为

$$\begin{aligned} r(t) = (\mathbf{R}_{\text{coning}} \mathbf{R}_{\text{spinning}} \mathbf{r}_0)^T \mathbf{n}_{\text{los}} = \left\{ \left[\mathbf{I} + \hat{\omega}'_c \sin \Omega_c t + \hat{\omega}'_c{}^2 (1 - \cos \Omega_c t) \right] \left[\mathbf{I} + \hat{\omega}'_s \sin \Omega_s t + \hat{\omega}'_s{}^2 (1 - \cos \Omega_s t) \right] \mathbf{r}_0 \right\}^T \mathbf{n}_{\text{los}} = a_0 + a_1 \sin \Omega_s t + \\ a'_1 \cos \Omega_s t + a_2 \sin \Omega_c t + a'_2 \cos \Omega_c t + a_3 \sin (\Omega_c + \Omega_s) t + a'_3 \cos (\Omega_c + \Omega_s) t + a_4 \sin |\Omega_c - \Omega_s| t + a'_4 \cos |\Omega_c - \Omega_s| t \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $a_0, a_1, a'_1, a_2, a'_2, a_3, a'_3, a_4, a'_4$ 均为与散射点位置、微动参数和雷达视角相关的常标量。进动形式下尾翼散射点的微距离是频率 $\Omega_s, \Omega_c, \Omega_c + \Omega_s$ 和 $|\Omega_c - \Omega_s|$ 的 1 个四点频信号。

3) 对于无翼锥体底面非理想散射点, 令 $\mathbf{r}'_0 = \mathbf{r}_0 / \|\mathbf{r}_0\|$, 则有

$$\mathbf{n}_s(t) = \mathbf{R}_{\text{coning}} \mathbf{r}'_0 = \mathbf{A}_0 \mathbf{r}'_0 + \mathbf{A}_1 \mathbf{r}'_0 \sin \Omega_c t + \mathbf{A}_2 \mathbf{r}'_0 \cos \Omega_c t \quad (4)$$

$$\mathbf{n}_s(t) \times \mathbf{n}_{\text{los}} = \mathbf{A}_0 \mathbf{r}'_0 \times \mathbf{n}_{\text{los}} + \mathbf{A}_1 \mathbf{r}'_0 \times \mathbf{n}_{\text{los}} \sin \Omega_c t + \mathbf{A}_2 \mathbf{r}'_0 \times \mathbf{n}_{\text{los}} \cos \Omega_c t = \mathbf{a}'_0 + \mathbf{a}'_1 \sin \Omega_c t + \mathbf{a}'_2 \cos \Omega_c t \quad (5)$$

式中 $\mathbf{a}_0, \dots, \mathbf{a}_5, \mathbf{a}'_0, \dots, \mathbf{a}'_2$, 为常矢量。令 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{n}_s(t) \times [\mathbf{n}_s(t) \times \mathbf{n}_{\text{los}}]$, 则有:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) = [\mathbf{A}_0 \mathbf{r}'_0 + \mathbf{A}_1 \mathbf{r}'_0 \sin \Omega_c t + \mathbf{A}_2 \mathbf{r}'_0 \cos \Omega_c t] \times [\mathbf{a}'_0 + \mathbf{a}'_1 \sin \Omega_c t + \mathbf{a}'_2 \cos \Omega_c t] = \\ \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \sin \Omega_c t + \mathbf{a}_2 \cos \Omega_c t + \mathbf{a}_3 \sin^2 \Omega_c t + \mathbf{a}_4 \cos^2 \Omega_c t + \mathbf{a}_5 \sin \Omega_c t \cos \Omega_c t \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可知 $\mathbf{x}(t) = \|\mathbf{x}(t)\|$ 是以 $2\pi / \Omega_c$ 为周期的周期函数, 那么

$$\mathbf{n}_{\text{ine}}(t) = \mathbf{x}(t) / x(t) = \mathbf{a}_0 x_0(t) + \mathbf{a}_1 x_1(t) + \mathbf{a}_2 x_2(t) + \mathbf{a}_3 x_3(t) + \mathbf{a}_4 x_4(t) + \mathbf{a}_5 x_5(t) \quad (7)$$

可知 $x_0(t), x_1(t), \dots, x_5(t)$ 也是周期为 $2\pi / \Omega_c$ 的周期函数。对任一个 $x_i(t)$, 可以将其展开为各次正弦信号 $(a_n \cos n\Omega_c t + b_n \sin n\Omega_c t)$ 和的形式, 并可证明傅里叶系数 (a_n, b_n) 存在多个不为零的高次项。则式(7)可表示为:

$$\mathbf{n}_{\text{ine}}(t) = \mathbf{a}''_0 + \mathbf{a}''_1 \sin \Omega_c t + \mathbf{a}''_2 \cos \Omega_c t + \mathbf{a}''_3 \sin 2\Omega_c t + \mathbf{a}''_4 \cos 2\Omega_c t + \dots \quad (8)$$

结合式(2)和式(8), 非理想散射点的微距离公式可表示为:

$$r(t) = [\pm a \cdot \mathbf{n}_{\text{ine}}(t) + d \cdot \mathbf{n}_s(t)]^T \mathbf{n}_{\text{los}} = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 \sin \Omega_c t + \tilde{a}'_1 \cos \Omega_c t + \tilde{a}_2 \sin 2\Omega_c t + \tilde{a}'_2 \cos 2\Omega_c t + \dots \quad (9)$$

式中 $\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \tilde{a}'_1, \tilde{a}_2, \tilde{a}'_2$ 为常标量。由式(9)可知, 进动形式下无翼锥体底面非理想散射点的微距离是一个多点频信号, 频率分量为 Ω_c 的各次倍频。

2.2 摆动

1) 摆动形式下, 锥顶和尾翼散射点的微距离可表示为:

$$r(t) = \left\{ \left[\mathbf{I} + \hat{\omega}'_s \sin \Theta(t) + \hat{\omega}'_s{}^2 (1 - \cos \Theta(t)) \right] \mathbf{r}_0 \right\}^T \mathbf{n}_{\text{los}} = \left\{ \left[\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1 \sin \theta(t) + \mathbf{B}_2 \cos \theta(t) \right] \mathbf{r}_0 \right\}^T \mathbf{n}_{\text{los}} \quad (10)$$

将摆动角 $\theta(t) = \theta_s \sin \omega_s t$ 代入上式, 有

$$r(t) = \left[\mathbf{B}_0 \mathbf{r}_0 + \mathbf{B}_1 \mathbf{r}_0 \sin(\theta_s \sin \omega_s t) + \mathbf{B}_2 \mathbf{r}_0 \cos(\theta_s \sin \omega_s t) \right]^T \mathbf{n}_{\text{los}} = \left(\mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 \sin \omega_s t + \mathbf{b}_2 \sin^2 \omega_s t + \mathbf{b}_3 \sin^3 \omega_s t + \dots \right)^T \mathbf{n}_{\text{los}} = \quad (11)$$

$$\mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 \sin \omega_s t + \mathbf{b}_2 \sin 2\omega_s t + \mathbf{b}_3 \sin 3\omega_s t + \dots$$

式中: $\mathbf{B}_0, \mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3, \dots$ 为推导过程中的常矩阵和常矢量; $b_0, b_1, b_2, b_3, \dots$ 为常标量。由式(11)可知, 锥顶和尾翼散射点的微距离属于多点频信号, 频率分量为 ω_s 的各倍频。

2) 对于非理想散射点, 其微距离与进动非理想散射点的分析过程类似, 不同的是此时 $\mathbf{n}_s(t)$ 为 ω_s 的多次倍频和, 则摆动形式下非理想散射点的微距离是多点频信号的合成。结合公式(9)推导过程, 可容易得到摆动形式下非理想散射点的微距离与锥顶和尾翼相似, 同为多点频信号, 只是幅度上存在差异。

2.3 滚动

由第2节可知, 滚动是 $\mathbf{R}_{\text{coning}} = \mathbf{I}$ 时进动模型的特例, 将其代入式(2)可得 $r(t) = (\mathbf{R}_{\text{mit}} \mathbf{r}_p)^T \mathbf{n}_{\text{los}}$, 即锥顶散射点的微距离是不随时间变化的常量, 其大小由散射点位置和观测视角决定。代入式(3)可得 $r(t) = c_0 + c_1 \sin \Omega_s t + c'_1 \cos \Omega_s t$, c_0, c_1, c'_1 为常标量, 即滚动形式下尾翼的微距离是自旋频率的单频信号。由2.2节分析可知, 滚动形式下非理想散射点的微距离同样为不随时间变化的常量。

3 弹道目标三维微动识别

利用频域特征进行微动类型识别的具体过程如下:

1) 微动目标雷达回波获取与前期处理。若组网中共 N 部雷达, 各雷达发射载频不同的宽带线性调频信号。设第 i 部雷达的发射信号为 $s_i(\hat{t}, t_m)$, $i=1, 2, \dots, N$, 对回波信号 $s_{ir}(\hat{t}, t_m)$ 进行“去斜”处理, 得到可以反映目标微动变化规律的时间-微距离像 $S_i(f, t_m)$ 。

2) 从 $S_i(f, t_m)$ 中提取微距离变化曲线。在曲线提取前可以先对图像进行预处理, 从而提高图像质量。设经过以上方法提取到的第 i 部雷达的微距离曲线为 $r_i^j(t)$, $j=1, 2, \dots, M$, 其中 M 为目标散射中心个数, 一般对于锥体目标 $M \leq 3$ 。

3) 微动类型识别。分2步进行: a) 根据滚动目标微距离的时不变特性, 若在每一组 $r_i(t)$ 中均存在一条或多条直线, 则可初步判定目标的微动形式为滚动; b) 对每个 $r_i^j(t)$ 作快速傅里叶变换, 剔除零频干扰并作幅值归一化后得到频域信号 $R_i^j(f)$, 先对每一组信号作频域合成得 $R_i(f)$, 再对各雷达的合成信号进行频域积累, 得到多视角频域合成信号 $R(f)$ 。若 $R(f)$ 无明显峰值或只在一个点频上存在峰值, 则可进一步确定目标微动类型为滚动; 若 $R(f)$ 呈现出四点频特征, 且各组 $R_i^j(f)$ 中均稳定地存在一个单点频信号, 则可初步判断目标微动形式为进动; 若 $R(f)$ 表现出多点频特征, 则当各组 $R_i^j(f)$ 中均存在一个单点频信号时, 目标微动形式可能为进动; 当各组 $R_i^j(f)$ 中不存在一个稳定的单点频信号时, 目标微动形式为摆动。

4 仿真实验

目标仿真参数设置: 真目标包括有翼和无翼进动弹头: 锥旋频率为 1 Hz, 进动角为 30° , 自旋频率为 3 Hz, 旋转轴单位方向矢量为 $[-0.866, 0.5, 0]^T$, 锥顶散射点初始位置矢量为 $[-1, 1.732, 0]^T$; 诱饵包括有翼摆动、无翼摆动、有翼滚动和无翼滚动诱饵: 其中摆动诱饵的摆动频率为 2 Hz, 幅度为 20° , 旋转轴单位方向矢量为 $[0, 0, 1]^T$, 锥顶散射点初始位置矢量为 $[-1.732, 1, 0]^T$; 滚动诱饵的滚动频率 3 Hz。弹头和诱饵具有等比例的锥体外形, 锥体直径为 3 m, 底面半径为 1 m, 质心在轴线距底面 1 m 处。仿真中对有翼目标, 只考虑底部 2 个位置对称的尾翼, 不考虑视线遮挡。组网雷达参数设置: 雷达网由 7 部雷达组成, 在大地坐标系中它们各自坐标分别为 $(30, 0, 0)$, $(14, 0, -50)$, $(50, 0, -87)$, $(100, 0, -58)$, $(14, 0, 50)$, $(50, 0, 87)$ 和 $(100, 0, 58)$ km, 目标的位置均在 $(100, 70, 0)$ km 附近。各雷达发射 6~20 GHz 不同载频的线性调频信号, 脉宽为 1 μ s, 带宽为 3 GHz, 脉冲重复频率为 100 Hz。各部雷达同时对

多个目标观测 5 s。图 1 给出了组网中第 3 部雷达观测到的各目标时间-微距离像。从各时间-微距离像中提取微距离曲线, 频域变换后的结果见图 2。因为图 1(f)所对应的无翼滚动目标微距离为 3 条直线, 频域变换后只存在零频分量, 故在图 2 中未给出。

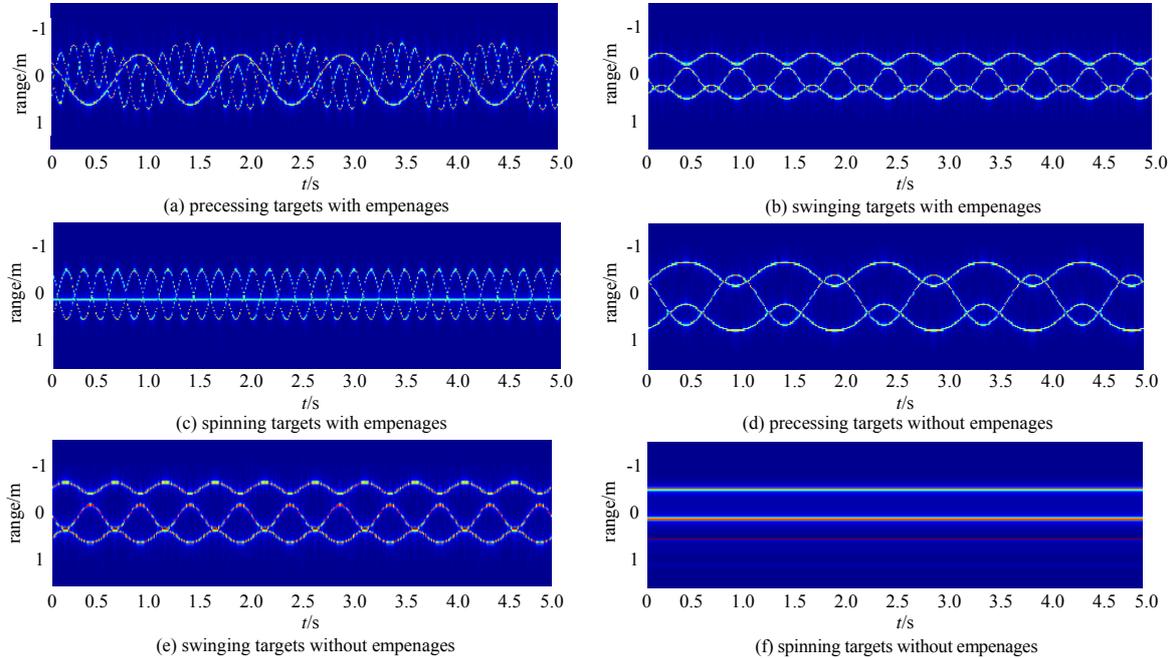


Fig.1 Time-range profile of targets observed in the 3rd radar

图 1 第 3 部雷达观测到的目标时间-微距离像

图 1 和图 2 所反映的各微动目标的时域、频域特征与本文的结论一致, 从而验证了理论分析的正确性。图 2(a_4)、图 2(b_4)、图 2(c_4)、图 2(d_4)和图 2(e_4)为对应微动目标的频域积累结果, 从中可以看出积累频谱相比单部雷达的观测结果, 在频点的一致性、幅值的辨析度上都更好, 能更稳定地反应目标的频域特征。

5 结论

本文初步研究了组网雷达在弹道目标微动识别中的应用, 对于收发分置的多基雷达、多发多收的分布式雷达等具有多视角特征的组网雷达, 本文方法同样具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 周万幸. 弹道导弹雷达目标识别技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2011. (ZHOU Wanxing. BMD Radar Target Recognition Technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2011.)
- [2] CHEN V C,LI F Y,HO S S,et al. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEE Proceedings on Radar,Sonar and Navigation, 2003,150(4):271-276.
- [3] CHEN V C,LI F Y,HO S S,et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon,model and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2006,42(1):2-21.
- [4] GAO H W,XIE L U,WEN S L. Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2010,46(4):1969-1982.

作者简介:



王宇晨(1988-), 女, 陕西省耀县人, 硕士, 助教, 主要研究方向为信号处理等, 发表学术论文 10 余篇.email:601237134@qq.com.

雷 腾(1985-), 男, 南昌市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为微动目标特征提取及成像方法.

胡晓伟(1987-), 男, 河北省邢台市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为雷达目标成像与识别.

徐培胜(1985-), 男, 河北省邢台市人, 本科、助理工程师, 主要研究方向为信号与信息处理.

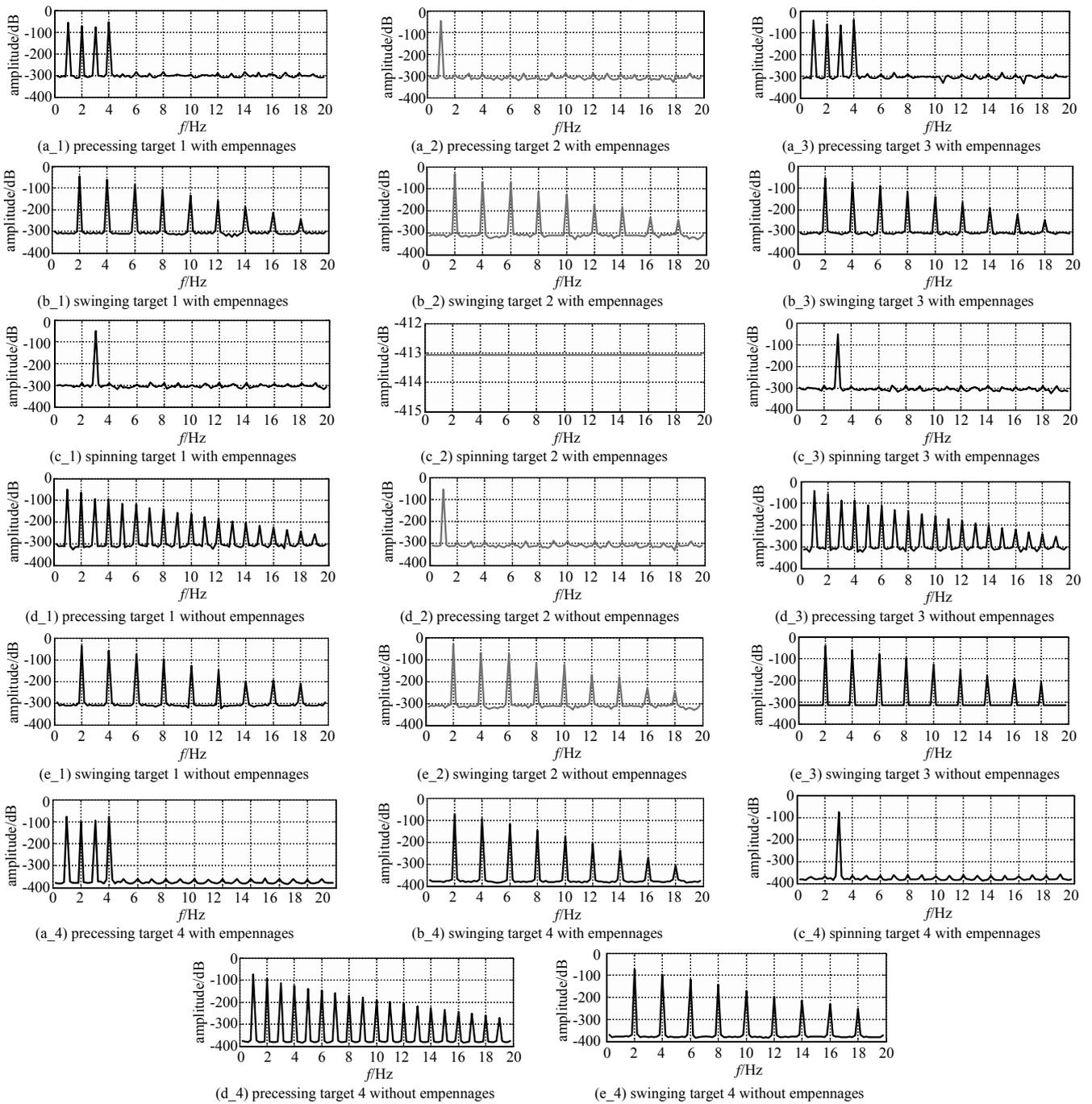


Fig.2 Spectra of different micro targets

图2 不同微动目标频谱图