

组网雷达中旋转目标微多普勒效应分析及三维微动特征提取

李东伟¹, 罗迎², 张群², 李天鹏¹

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西三原, 713800; 2. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 目标微动特征提取是当前研究的一个热点,在组网雷达技术中研究了旋转目标的微多普勒效应,分别分析了组网雷达中不同信号形式下的目标微多普勒效应,并给出了其参数化表达。利用组网雷达的多视角特性,将不同信号形式下分布在不同位置的雷达获得的回波信号进行参数提取,通过构造多元非线性方程组,以提取的参数作为变量,进行目标3维微动参数解算,实现了目标3维微动特征的提取。仿真实验验证了所提算法的有效性。

关键词 组网雷达;微多普勒;三维微动特征;旋转目标

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.03.010

中图分类号 TN957 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)03-0045-05

随着电子技术的迅猛发展,雷达对抗愈演愈烈,空袭与防空已不再是单种兵器的对抗,而是空袭体系与防空体系的对抗,组网雷达^[1]应运而生。它通过中心站对网内不同体制、不同频段、不同极化方式的雷达信息进行综合,形成体系作战优势。

目标微多普勒效应反映了目标的精细运动和几何结构对电磁散射的综合调制特征,是该目标所具有的独特特征,它为目标特征提取和目标识别提供了新的技术途径^[2-3]。文献[4]在单频信号雷达中应用广义Radon变换提取了行人摆臂的微多普勒特征;文献[5]应用时频分析和变采样滤波,在窄带雷达中研究了几种典型微动点目标的微多普勒计算和参数估计方法;文献[6]提出了用时域自相关法和频域倒谱法来提取微多普勒变化周期,并用傅里叶变换法提取微多普勒的最大值达到特征提取的目的;文献[7]在正交频分线性调频信号MIMO雷达中提取了旋转目标的三维微动特征。

由于在单基条件下只能提取雷达视线方向(LOS)上的微动特征,限制了识别的精确性,而组网雷达在组网雷达中,目标的微动在不同视角上有着不同的投影分量,这就为目标三维微动特征提供可能。本文针对以单频信号雷达和线性调频信号雷达组网为例进行研究,通过融合处理,将微多普勒理论从目前的LOS上的微动特征提取扩展大微动部件的三维特征提取。

1 系统模型的建立

把组网雷达看成一个系统,定义组网雷达中的所有单基雷达为子雷达,假设组网雷达由 m 部单频信号形式雷达(窄带雷达)和 n 部线性调频信号形式雷达组成,这 $m+n$ 部雷达均匀分布在不同的位置,从而形成多视角的雷达网。图1为简化的组网雷达系统, $OXYZ$ 为全局坐标系, $oxyz$ 为目标本地坐标系,目标主体以速度 \mathbf{v} 运动,同时目标上散射点 P 以角速度 $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ 绕旋转中心 o 旋转, $\boldsymbol{\omega}$ 的模值为 Ω ,初始时刻旋转半径矢量为 $\mathbf{r}_{oP} = [r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}]^T$ 。慢时间 t_m 时刻任一雷达接收到散射点 P 的回波信号为:

$$s(t, t_m) = \sigma(x, y, z) s(t - 2\mathbf{R}(t_m)/c) \quad (1)$$

* 收稿日期:2011-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971100)

作者简介:李东伟(1986-),男,黑龙江依兰人,硕士,主要从事雷达成像及目标微多普勒信息提取研究。

E-mail:1014764635@qq.com

式中: $\sigma(x, y, z)$ 为 P 的散射系数; c 为光速; $R(t_m)$ 为 t_m 时刻 P 点到雷达的距离。

2 单频信号形式下目标多普勒效应分析

假设组网雷达中包含 m 部单频信号形式雷达, 其发射的信号具有不同的载频。首先计算旋转点到第 k 个子雷达的距离 $R_k(t) = |\mathbf{R}_k \mathbf{o} + \mathbf{v}t + \mathbf{R}_t \mathbf{r}_{oP}|$; \mathbf{R}_t 为旋转矩阵:

$$\mathbf{R}_t = \exp\{\hat{\boldsymbol{\omega}}\}; \hat{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

令 $\boldsymbol{\omega}' = [\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z]^T = \boldsymbol{\omega}/\Omega$, 则 \mathbf{R}_t 可进一步写为 $\mathbf{R}_t = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}' \sin(\Omega t) + \hat{\boldsymbol{\omega}}'^2 (1 - \cos(\Omega t))$, 式中 $\hat{\boldsymbol{\omega}}' =$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega'_z & \omega'_y \\ \omega'_z & 0 & -\omega'_x \\ -\omega'_y & \omega'_x & 0 \end{bmatrix}, \text{ 则 } P \text{ 点回波信号的基带形式为:}$$

$$s_k(t) = \sigma(x, y, z) \exp\left[j2\pi f_k 2 \frac{R_k(t)}{c}\right] \quad (2)$$

在远场条件下对上式右面的相位项关于 t 求导, 即得到目标回波信号的多普勒频率:

$$f_D(t; k) \approx \frac{2f_k}{c} \left[\mathbf{v} + \frac{d}{dt}(\mathbf{R}_t \mathbf{r}_{oP}) \right]^T \left(\frac{\mathbf{R}_k \mathbf{o} + \mathbf{v}t}{\|\mathbf{R}_k \mathbf{o} + \mathbf{v}t\|} \right) = \frac{2f_k}{c} \left[\mathbf{v} + \frac{d}{dt}(\mathbf{R}_t \mathbf{r}_{oP}) \right]^T \mathbf{n}_p(t; k) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{n}_p(t)$ 为第 k 个子雷达到旋转点 P 的单位方向矢量, 由于在远场条件下 $\mathbf{n}_p(t; k)$ 的实时性对上式的影响可以忽略, 所以在这里我们用 $\mathbf{n}_o(t; k)$ 代替 $\mathbf{n}_p(t; k)$; $\mathbf{n}_o(t; k)$ 为第 k 个子雷达到旋转中心 o 的方向矢量。这样, 上式变为:

$$f_D(t; k) = 2f_k/c \left[\mathbf{v} + \frac{d}{dt}(\mathbf{R}_t \mathbf{r}_{oP}) \right]^T \mathbf{n}_o(t; k) \quad (4)$$

上式右面的第 1 项为由于目标主体的运动引起的多普勒频率, 第 2 项就是由旋转点旋转引起的微多普勒频率, 运动补偿后并展开可得:

$$f_{m-D}(t; k) = 2\Omega f_k/c [\mathbf{A} \sin \Omega t + \mathbf{B} \cos \Omega t] = 2\Omega f_k/c \sqrt{\mathbf{A}^2 + \mathbf{B}^2} \sin(\Omega t + \varphi) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{A} = [\hat{\boldsymbol{\omega}}'^2 \cdot \mathbf{r}_{oP}]^T \cdot \mathbf{n}_o(t; k)$, $\mathbf{B} = [\hat{\boldsymbol{\omega}}' \cdot \mathbf{r}_{oP}]^T \cdot \mathbf{n}_o(t; k)$; $\varphi = \text{actan}\left(\frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}}\right)$, 设 $M_{ok} = \frac{2\Omega f_k \sqrt{\mathbf{A}^2 + \mathbf{B}^2}}{c}$ 。

从式(5)我们可以总结出单频信号形式下旋转目标的微多普勒特征具有以下 2 个特点: ①由旋转引入的微多普勒频率随时间呈现正弦规律的变化, 且正弦曲线的频率等于旋转目标的旋转频率; ②由 M_{ok} 可以看出, 旋转目标的微多普勒频率曲线的振幅由 $\mathbf{n}_o(t)$ 和相应的子雷达雷达参数共同决定, 所以各个子雷达获得的多普勒频率曲线具有不同的振幅。

3 LFM 信号形式下目标微多普勒效应分析

LFM 信号目标微多普勒效应的分析是建立在目标的一维像的基础上的。LFM 信号目标回波可写为:

$$s(t, t_m) = \sigma(x, y, z) \text{rect}\left(\frac{t - \frac{2R(t_m)}{c}}{T_p}\right) \exp\left(j\beta\left(t - \frac{2R(t_m)}{c}\right) + j\mu\left(t - \frac{2R(t_m)}{c}\right)^2\right) \quad (6)$$

式中 T_p 为脉冲持续时间, 假设目标与雷达之间的平动可被精确补偿^[8-10], 则 o 点的运动轨迹可被准确估计, 取 o 点回波信号为“dechirp”的参考信号, 即:

$$s_0(t, t_m) = \sigma(x, y, z) \text{rect}\left(\frac{t - \frac{2R_0(t_m)}{c}}{T_{\text{ref}}}\right) \exp\left(j\beta\left(t - \frac{2R_0(t_m)}{c}\right) + j\mu\left(t - \frac{2R_0(t_m)}{c}\right)^2\right) \quad (7)$$

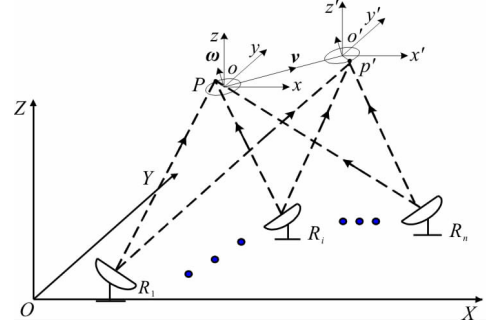


图1 组网雷达中旋转目标微多普勒效应的几何关系图

Fig. 1 Geometry of the micro-doppler (m-d) effect of rotating target in netted radar

式中 $\mathbf{R}_0(t_m)$ 为 t_m 时刻 o 点到子雷达的距离,且 $T_{\text{ref}} > T_p$, 进行“dechirp”后的输出信号为:

$$s_d(t, t_m) = \sigma(x, y, z) \text{rect}(t - 2\mathbf{R}(t_m)/c/T_p) \exp(j2\pi(-f_0 2\mathbf{R}_\Delta(t_m)/c - j\mu(4\mathbf{R}_\Delta(t_m)/ct) + j\mu(4(\mathbf{R}(t_m)^2 - \mathbf{R}_0(t_m)^2)/c^2)) \quad (8)$$

式中 $\mathbf{R}_\Delta(t_m) = \mathbf{R}(t_m) - \mathbf{R}_0(t_m)$ 。对 $s_d(t, t_m)$ 关于 t 作傅里叶变换,得到:

$$s_d(\mathbf{f}, t_m) = \sigma(x, y, z) \exp(j2\pi(-f_0 2\mathbf{R}_\Delta(t_m)/c) + j\mu 4(\mathbf{R}^2(t_m) - \mathbf{R}_0^2(t_m))/c^2) \exp(-2\pi f j 2\mathbf{R}(t_m)/c) T_p \text{sinc}(2\pi T_p(\mathbf{f} + 2\mu\mathbf{R}_\Delta(t_m)/\pi c)) \quad (9)$$

在 $\mathbf{f} - t_m$ 域中,上式中当 $\mathbf{f} = -2\frac{\mu\mathbf{R}_\Delta(t_m)}{\pi c}$ 时, sinc 函数出现峰值,峰值位置由 $\mathbf{R}_\Delta(t_m)$ 决定,因此当 $\mathbf{R}_\Delta(t_m)$

不同时,在 \mathbf{f} 轴上的不同位置将呈现出峰值,从而实现了目标的一维距离像。当目标无微动时,在成像时间内,对于目标上某散射点, $\mathbf{R}_\Delta(t_m)$ 随 t_m 的变化幅度小于距离分辨率,因此峰值 \mathbf{f} 可被认为是不变的,从 $\mathbf{f} - t_m$ 平面上看,该散射点将对应一条垂直于 \mathbf{f} 轴的直线。但当目标存在微动时, $\mathbf{R}_\Delta(t_m)$ 表现出随 t_m 的明显变化,使得微动点在 $\mathbf{f} - t_m$ 平面上不再简单地对应于直线,从而表现出微多普勒效应^[11-12]。

假设组网雷达中包含 n 部 LFM 信号形式雷达,其发射的信号具有不同的载频和带宽。当采用 LFM 信号时,目标微多普勒频率由旋转点对应的 $\mathbf{R}_\Delta(t_m)$ 决定,下面对旋转运动目标的微多普勒频率进行分析:

将图 1 所示的组网雷达系统简化为图 2 所示的平面图,图中平面为 P 点的旋转运动平面,取第 i 个子雷达为例, \mathbf{n}_i 为子雷达的雷达视线方向,其在旋转平面上的投影矢量为 \mathbf{n}'_i , P_i 为 P 点在 \mathbf{n}_i 上的投影点。当取 o 点为“dechirp”处理的参考点时, t_m 时刻第 i 个子雷达观测散射点 P 时对应的 $\mathbf{R}_\Delta(t_m; i)$ 为: $\mathbf{R}_\Delta(t_m; i) = ||\mathbf{R}_{ip}| - |\mathbf{R}_{io}||$, 当雷达工作于远场条件下时,即 $|\mathbf{R}_{ip}| \gg |\mathbf{r}_{op}|$, 得到 $\mathbf{R}_\Delta(t_m; i) \approx |\mathbf{r}_{opi}|$ 。设 t_m 时刻 P 与 \mathbf{n}'_i 之间的夹角为 Ωt_m , 并设 \mathbf{r}_{opi} 与 \mathbf{n}_i 同向时其长度为正,否则长度为负,有 $|\mathbf{r}_{opi}| = |\mathbf{r}_{op}| \cos(\Omega t_m) \sin\theta_i$, 其中 Ω 为 $\boldsymbol{\omega}$ 的模值, θ_i 为 $\boldsymbol{\omega}$ 与 \mathbf{n}_i 之间的夹角,且 $\theta_i = \arccos(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}_i / (|\boldsymbol{\omega}| \cdot |\mathbf{n}_i|))$, $0 \leq \theta_i \leq \pi$ 。当目标与子雷达之间的位置关系确定时, \mathbf{n}_i 为已知,因此有:

$$\mathbf{R}_\Delta(t_m; i) = r \sin\theta_i \cos(\Omega t_m) = M_{ai} \cos(\Omega t_m) \quad (10)$$

式中 $M_{ai} = r \sin\theta_i$ 。进一步得到线性调频信号形式下旋转目标的微多普勒频率为:

$$f_{m-D}(t_m; i) = -2\mu\mathbf{R}_\Delta(t_m)/\pi c = -2\mu r \sin\theta_i \cos(\Omega t_m)/\pi c = M_{ai} \cos(\Omega t_m) \quad (11)$$

由于 $\mathbf{R}_\Delta(t_m; i)$ 随 t_m 做正弦形式的变化,因此若从距离-慢时间平面上分析,旋转散射点 P 将对应一条正弦曲线,曲线的频率为旋转点的旋转频率,曲线振幅由 $r \sin\theta_i$ 决定,可知分布在不同位置的子雷达得到的微多普勒曲线具有不同的振幅。

4 三维微动特征提取

由以上目标微多普勒效应分析可知,组网雷达中各子雷达检测到的目标微多普勒频率曲线的频率等于微动目标的旋转频率,而由 M_{ak} 和 M_{ai} 可知,曲线振幅由目标与子雷达之间几何结构参数和子雷达的信号特征共同决定。综上分析,建立组网雷达中旋转目标三维微动特征提取方程如下:

$$\begin{cases} M_{ak} = 2\Omega f_k \sqrt{A^2 + B^2}/c, & k = 1, 2, \dots, m \\ M_{ai} = r \sin\theta_i & i = 1, 2, \dots, n \\ \omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2 = \Omega^2 \\ \omega_x r_{ox} + \omega_y r_{oy} + \omega_z r_{oz} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: M_{ak} 和 M_{ai} 分别为单频信号和 LFM 信号形式下获得的目标微多普勒频率曲线的振幅; $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ 为旋转角速度矢量; $[r_{ox}, r_{oy}, r_{oz}]$ 为初始时刻旋转半径矢量,且 $r = \sqrt{r_{ox}^2 + r_{oy}^2 + r_{oz}^2}$, 因为旋转角速度矢量和旋转半径矢量是垂直的关系,因而得到 $\omega_x r_{ox} + \omega_y r_{oy} + \omega_z r_{oz} = 0$ 。分析式(14)可知,方程组中包含了 6 个隐含的未知

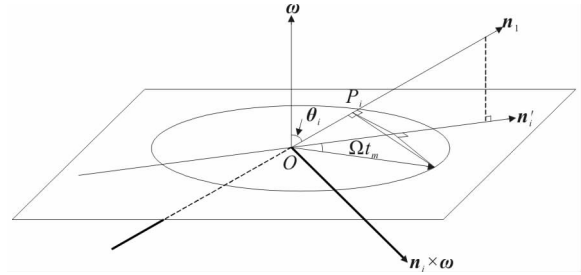


图2 旋转运动空间几何示意图

Fig. 2 Geometry of rotating space

参量 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r_{0x}, r_{0y}, r_{0z})$ 。所以要实现目标旋转部件的空间三维微动特征提取,必须从分布在各个视角上子雷达获取的目标特征曲线里,提取曲线的振幅和频率信息,因此,利用组网雷达的多视角特性,提取至少 4 个不同位置的子雷达的微多普勒频率曲线的频率和振幅信息,即可构造方程组求解未知参量。

综上所述,组网雷达中旋转目标三维微动特征提取方法的具体步骤如下:

步骤 1 构建组网雷达系统,子雷达数量满足 $m + n \geq 4$,相同信号形式子雷达采用不同的载频,并假设信号具有良好的相参性、各子雷达之间具有严格的时间同步;

步骤 2 对采用线性调频信号形式的子雷达接收到的回波信号分别与参考信号 $s_{i0}(t, t_m)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 做“dechirp”处理,再关于快时间 t 做傅里叶变换,获得 $f-t_m$ 域的回波信号,共得到 n 组回波数据;对采用连续单频信号的子雷达接收的回波运用时频分析(Gabor 变换)得到 m 组回波信号的时频分布;

步骤 3 提取时频平面和 $f-t_m$ 平面上正弦曲线的频率 Ω 和振幅 $M_{ak}, M_{ai}, k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n$;

步骤 4 求解方程组,获得 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r_{0x}, r_{0y}, r_{0z})$ 的数值解;

步骤 5 通过获得的数值解得到旋转目标的旋转半径 r 和旋转角速度矢量 $\hat{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$;

通过上述步骤,可以获得旋转目标的真实旋转半径 r 和旋转角速度的空间三维矢量 $\hat{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 。与单基雷达下仅能在雷达视线方向上获得目标的运动信息相比,组网雷达为实现特殊目标的精确识别提供了更为丰富准确的特征信息。通过增加组网雷达子雷达的个数来增加方程组中方程数量,对方程解提出更为严格的约束,求解精度可以得到进一步提高。

5 仿真分析

设组网雷达系统由 3 部单频信号形式雷达和 3 部 LFM 信号形式雷达组成。单频信号雷达沿 Y 坐标轴分布,坐标分别为 $(0, 3\ 000, 0)$, $(0, 5\ 000, 0)$ 和 $(0, 7\ 000, 0)$,雷达发射的单频信号的载频分别为 7 GHz, 8 GHz, 9 GHz,共采集 0.8 s 的回波信号,采样率为 6 KHz。LFM 信号雷达沿 X 坐标轴分布,坐标分别为 $(3\ 000, 0, 0)$, $(5\ 000, 0, 0)$ 和 $(7\ 000, 0, 0)$,雷达辐射 LFM 信号的载频分别为 10 GHz, 11 GHz 和 12 GHz 带宽均为 600 MHz,获得的距离分辨率为 0.25 m。目标中心坐标为 $(3\ 000\ \text{m}, 4\ 000\ \text{m}, 4\ 000\ \text{m})$, $v = [150\ \text{m/s}, 100\ \text{m/s}, 150\ \text{m/s}]$,目标由 3 个旋转散射点构成,在旋转圆周上等间距分布,以相同的旋转角速度 $\omega = [3\pi, 2\pi, 3\pi]$ 、相同的旋转半径 $r = 2.185\ 8\ \text{m}$,绕目标本地坐标系中的原点 $(1, 2, 3)$ 作匀速圆周运动,初始旋转半径矢量分别为 $[1.000\ 0, 1.000\ 0, -1.666\ 7]$ 、 $[-1.669\ 4, 0.977\ 1, 1.018\ 0]$ 和 $[0.669\ 4, -1.977\ 1, 0.648\ 7]$,其构成的平面与 ω 垂直。计算可得 $\Omega = 14.735\ 4\ \text{rad/s}$,即 2.3452 Hz。在仿真中不考虑散射点遮挡效应。

以雷达坐标代表各个子雷达,图 3 给出了应用 Gabor 变换后,得到的坐标 $(0, 3\ 000, 0)$ 子雷达获得回波信号在 $f-t$ 平面上的正弦曲线表现形式,再对其进行 Hough 变换,可以提取到 3 条旋转角速度为 14.72 rad/s 的正弦曲线,振幅为 405.3 Hz,与由式(14)计算得到的理论值 412.1 Hz 非常接近;图 4 给出了坐标 $(7\ 000, 0, 0)$ 子雷达接收回波经过一维成像处理和频率-距离差变换后,在距离-时间平面上的正弦曲线表现形式,其中距离为旋转点到雷达的距离与参考点到雷达的距离之差。对图 7 进行 Hough 变换,可提取到 3 条正弦曲线的旋转角速度为 14.73 rad/s,提取的振幅为 2.13 m,而振幅理论值为 2.118 5 m,两者相当吻合。对其余 4 部子雷达获得的目标回波信号进行同样处理,就可以获得求解所需的所有振幅和频率信息。

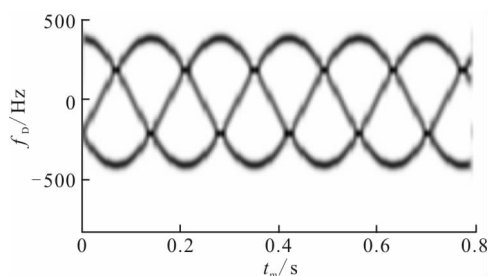


图3 坐标 $(0, 3\ 000, 0)$ 雷达获得的微多普勒信号
Fig. 3 Micro-doppler signal of radar in $(0, 3\ 000, 0)$

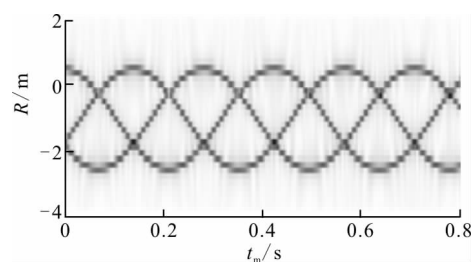


图4 坐标 $(7\ 000, 0, 0)$ 雷达获得的微多普勒信号
Fig. 4 Micro-doppler signal of radar in $(7\ 000, 0, 0)$

获得了曲线参数信息后,根据步骤5建立的方程组,采用 MATLAB 中的 fslove 命令求解,搜索初值设为 $(1, 0, 1, 1, 1, -1)$,解得 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}) = (9.419\ 5, 6.297\ 8, 9.425\ 2, 1.491\ 3, -1.559\ 0, -0.370\ 1)$,其中角速度与理论值 $(3\pi, 2\pi, 3\pi)$ 十分接近,旋转半径 $r = 2.188\ 9\ \text{m}$ 与理论值 $2.185\ 8\ \text{m}$ 也比较接近,这就验证了本文所提方法的有效性。

6 结束语

本文分析和验证了目标微动特征三维提取在组网雷达中的实现,从求得的方程解与理论值的比较可以看出,提出的组网雷达中目标三维微动信息提取方法具有可行性,可以为特殊目标识别提供更为准确和丰富的特征信息,为在组网雷达中分析目标微多普勒效应提供了理论依据。

参考文献(References):

- [1] 花汗兵. 雷达组网的特点及其关键技术研究[J]. 通信与信息技术, 2007, (23): 33-35.
HUA Hanbing. Study on characteristics and critical technologies of radar networking[J]. Communication & information technology, 2007, (23): 33-35. (in Chinese)
- [2] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2006, 42(1): 2-21.
- [3] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Analysis of micro-doppler signatures[J]. IEE proc - radar sonar navig, 2003, 150(4): 271-276.
- [4] 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 Zhaowen, LIU Yongxiang, LI Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Acta electronica sinica, 2007, 35(3): 520-525. (in Chinese)
- [5] BAI Xueru, Xing Mengdao, Zhou Feng, et al. Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [6] Sparr T, Krane P. Micro-doppler analysis of vibrating targets in SAR[J]. IEEE proc radar sonar navig, 2003, 150(4): 277-283.
- [7] 张翼,朱玉鹏,刘峥,等. 基于微多普勒特征的人体上肢运动参数估计[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(3): 20-27.
ZHANG Yi, ZHU Yupeng, LIU Zheng, et al. Parameter estimation of human upper limbs motion based on micro-doppler features[J]. Journal of astronautic metrology and measurement, 2009, 29(3): 20-27. (in Chinese)
- [8] 肖昌达,行勇,王祎. 基于微多普勒的微动点目标参数估计[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(3): 96-100.
XIAO Changda, XING Yong, WANG Yi. Micro-doppler-based parameter estimation of micro-motion point target[J]. Shipboard electronic countermeasure, 2009, 32(3): 96-100. (in Chinese)
- [9] 孙照强,鲁耀兵,李宝柱,等. 宽带信号及其特征的微多普勒提取技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(11): 2040-2044.
SUN Zhaoqiang, LU Yaobing, LI Baozhu, et al. Research on extraction technology of micro-doppler of wideband signal and its properties[J]. Systems engineering and electronics, 2008, 30(11): 2040-2044. (in Chinese)
- [10] 罗迎,张群,封同安,等. OFD-LFM MIMO 雷达中旋转目标微多普勒效应分析及三维微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 8-13.
LUO Ying, ZHANG Qun, FENG Tongan, et al. Micro-doppler effect analysis of rotating target and three-dimensional micro-motion feature extraction in OFD-LFM MIMO radar[J]. Journal of electronics & information technology, 2011, 33(1): 8-13. (in Chinese)
- [11] 高红卫,谢良贵,文树梁,等. 速度对微多普勒的影响及其补偿研究[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(4): 46-50.
GAO Hongwei, XIE Liangui, WEN Shuliang, et al. Research on the influence of velocity on micro-doppler and its compensation[J]. Aerospace electronic warfare, 2008, 24(4): 46-50. (in Chinese)
- [12] Qun Zhang, Tat Soon Yeo, Hwee Siang Tan, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2008, 46(1): 291-299.

(编辑:田新华)

(下转第90页)

(编辑:徐楠楠)

The Basic Theory and Simulation Research on Metal Magnetic Memory Based on Stress – Magnetization

LI Long – jun¹, WANG Xiao – feng¹, YANG Bin – feng¹, ZHANG Hui², CUI wen – yan¹, BAI Xue – qian¹
(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aimed at the problem of metal magnetic memory that the microcosmic cracks cannot be evaluated quantitatively by the metal magnetic memory testing method at present, the numerical value relation between the magnetic conductivity and stress is derived based on the analysis of the metal magnetic memory testing mechanism by using the theory of Jiles, who discussed the physical mechanism of the stress – magnetization effect. The finite element analysis of stress – magnetization effect is done on steel plate specimen with a microcosmic crack using ANSYS. Through the analysis, using an applicable magneto – elastic coupling model and distilling the peak value's distance and peak value of metal magnetic memory can evaluate the breadth and deepness of microcosmic cracks quantitatively.

Key words: microcosmic cracks; metal magnetic memory; stress – magnetization; finite element simulation; quantitative evaluation

.....
(上接第 49 页)

Micro – Doppler Effect Analysis of Rotating Target and Three – Dimensional Micro – motion Feature Extraction in Netted Radar

LI Dong – wei¹, LUO Ying², ZHANG Qun², LI Tian – peng¹
(1. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, 710077, China)

Abstract: The micro – motion feature extraction for micro – motion target has attracted great attention in recent years. The micro – Doppler (m – D) effect of rotating target is introduced in the netted radar techniques in the paper. The m – D effects are separately analyzed and the parameterized expressions are deduced in the netted radars that transmit different forms of signals. Making use of the multi – view of netted radar, the parameters of the radars' different forms of echo signals those come from different locations are extracted, the three – dimensional micro – motion features are obtained by solving nonlinear multivariable equation systems. Simulation results validate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: netted radar; micro – Doppler (m – D); three – dimensional micro – motion features; rotating target