

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

罗 迎^{*①} 张 群^{①②} 封同安^① 李 松^③ 梁贤姣^①

^①(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

^②(复旦大学波散射与遥感信息国家教育部重点实验室 上海 200433)

^③(空军工程大学导弹学院 三原 713800)

摘 要: 该文将微多普勒效应引入到多输入多输出(MIMO)雷达技术研究,以旋转运动目标为例,分析了雷达辐射正交频分线性调频信号(OFD-LFM)时目标的微多普勒效应,给出了其参数化表达。在此基础上,进一步将微多普勒理论从目前的雷达视线方向上的微动分量提取扩展到微动部件 3 维运动和结构特征提取,利用 MIMO 雷达的多视角特性,提出了构建多元非线性方程组求解旋转部件的 3 维运动参数的算法,实现了目标 3 维微动特征的提取。仿真实验验证了算法的有效性和鲁棒性。

关键词: 多输入多输出雷达; 微多普勒; 旋转目标; 目标识别

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0008-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00234

Micro-Doppler Effect Analysis of Rotating Target and Three-dimensional Micro-motion Feature Extraction in OFD-LFM MIMO Radar

Luo Ying^① Zhang Qun^{①②} Feng Tong-an^① Li Song^③ Liang Xian-jiao^①

^①(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

^②(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China)

^③(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: The micro-Doppler (m-D) effect is introduced for the Multi-Input Multi-Output (MIMO) radar techniques in the paper. Taking rotating target for an example, the m-D effect is analyzed and the parameterized expression is deduced in MIMO radar which transmits OFD-LFM (Orthogonal Frequency Division Linear Frequency Modulation) signals. An algorithm for three-dimensional micro-motion feature extraction is proposed, which extends the m-D signature extraction from the micro-motion projection in Line-Of-Sight (LOS) to the three-dimensional micro-motion feature. By taking advantage of the multi-view of MIMO radar, the three-dimensional micro-motion features are obtained by solving nonlinear multivariable equation systems. Simulation results validate the effectiveness and robustness of the algorithm.

Key words: MIMO radar; micro-Doppler (m-D); Rotating target; Target recognition

1 引言

自从 2004 年 Fishler 等人^[1]提出“多输入多输出(MIMO)雷达”概念以来, MIMO 雷达引起了相关研究人员的广泛关注^[2-6]。MIMO 雷达在弱目标检测能力、目标运动参数估计精度和目标分辨率等方面较传统雷达有着明显优点^[1-3], 特别是 MIMO 雷达具有空间分集优势, 可完成对目标散射分布信息的空域并行采样, 从而减少时域的脉冲采样数量, 实现目标的快速 ISAR 成像, 因此 MIMO 雷达成像

技术近年来开始得到深入研究^[4-6]。

但由于受到现有技术的限制, 目前直接利用 ISAR 像进行目标识别较为困难。近几年来, 从激光雷达中引入的微多普勒概念为特殊目标的精确识别提供了新的技术途径^[7-10]。微多普勒现象可被视为目标结构部件与主体之间相互作用的结果, 它是该目标所具有的独特特征, 可为完成对特殊目标的分类、识别、成像提供重要信息^[11]。由于 MIMO ISAR 具有空间分集优势, 因而可以提取目标更多的空间特征以用于目标识别。特别是由于目标微动在不同视角上有着不同的投影分量, 各个接收阵元上接收到的微多普勒信号将有着不同的相位变化, 利用该变化可望提取目标微动部件的空间 3 维运动和结构特征, 大大提高雷达的目标识别能力。基于这种考

2010-03-12 收到, 2010-06-15 改回

国家自然科学基金(60971100)资助课题

*通信作者: 罗迎 luoying2002521@163.com

考虑, 本文将微多普勒概念引入 MIMO 雷达技术, 分析了 MIMO 雷达中旋转运动引起的微多普勒效应, 给出了其参数化表达, 并进一步将微多普勒理论从目前的雷达视线方向上的微动分量提取扩展到微动部件 3 维运动和结构特征提取, 利用 MIMO 雷达的空间分集特性, 提出了一种 3 维微动特征提取方法。

2 OFD-LFM MIMO 雷达微多普勒效应

MIMO 雷达各个发射阵元的辐射波形需要尽可能地保持相互之间理想的正交性。正交频分线性调频信号(OFD-LFM)是一种良好的正交波形, 在本文的分析中, 假设 MIMO 雷达辐射 OFD-LFM 信号, 第 m 个发射阵元的辐射信号可表示为

$$s_m(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + m \frac{k}{T_p} t + \frac{1}{2} \mu t^2\right)\right],$$

$$m = 1, 2, \dots, M, \quad k \in N \quad (1)$$

其中 t 为快时间, T_p 为脉冲宽度, f_0 为起始载频, μ 为调频斜率, M 为雷达发射阵元总数, k 为自然数。在实际工程应用中, 应选择合适的 k 值以保证各辐射信号之间的频率间隔。

设 MIMO 雷达系统如图 1 所示, $OXYZ$ 为全局坐标系, $oxyz$ 为目标本地坐标系, $O_{T1}, O_{T2}, \dots, O_{TM}$ 为 M 个雷达发射阵元, $O_{R1}, O_{R2}, \dots, O_{RN}$ 为 N 个雷达接收阵元。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 。慢时间 t_m 时刻第 n 个接收阵元接收到散射点 P 的回波信号为

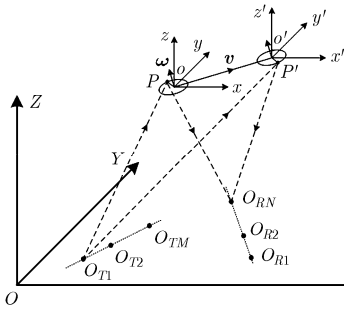


图 1 MIMO 雷达中旋转目标微多普勒效应的几何示意图

$$s_n(t, t_m) = \sum_{m=1}^M \sigma(x, y, z) s_m \left(t - \frac{R(t_m; m, n)}{c} \right),$$

$$n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中 $\sigma(x, y, z)$ 为 P 的散射系数, c 为光速, $R(t_m; m, n)$ 为 t_m 时刻 P 点到收发阵元对 (m, n) 的距离和。当雷达辐射信号为 OFD-LFM 信号时, 各接收阵元可采用图 2 所示的处理流程来分离各发射阵元辐射的信号。假设目标与雷达之间的平动可被精确补偿, 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, 即图 2 中的 $s_m(t)$ 用 $s_{m0}(t, t_m)$ 代替。

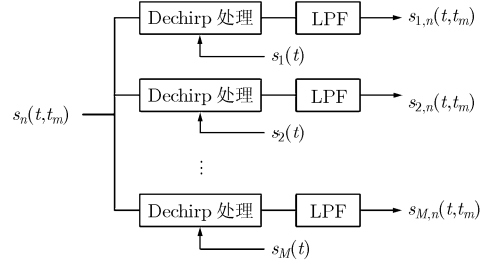


图 2 接收阵元各路信号分离处理示意图

$$s_{m0}(t, t_m) = s_m \left(t - \frac{R_0(t_m; m, n)}{c} \right) \quad (3)$$

其中 $R_0(t_m; m, n)$ 为 t_m 时刻 o 点到收发阵元对 (m, n) 的距离和。“Dechirp”后的输出信号为

$$s_d(t, t_m) = \sigma(x, y, z) \sum_{m'=1}^M \text{rect}\left(\frac{t - R(t_m; m', n)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left[j2\pi\left(-\frac{f_0 R_\Delta(t_m; m', n)}{c} + \frac{(m' - m)}{T_p} t - \frac{k}{T_p c} (m' R(t_m; m', n) - m R_0(t_m; m, n)) - \frac{\mu R_\Delta(t_m; m', n)}{c} t + \frac{\mu (R^2(t_m; m', n) - R_0^2(t_m; m, n))}{2c^2}\right)\right] \quad (4)$$

其中 $R_\Delta(t_m; m', n) = R(t_m; m', n) - R_0(t_m; m', n)$ 。 $s_d(t, t_m)$ 通过低通滤波器后, 只有 $m' = m$ 的分量得以输出, 即得到图 2 中的 $s_{m,n}(t, t_m)$ 。

$$s_{m,n}(t, t_m) = \sigma(x, y, z) \text{rect}\left(\frac{t - R(t_m; m, n)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left[j2\pi\left(-\left(\frac{f_0}{c} + \frac{mk}{T_p c}\right) R_\Delta(t_m; m, n) + \frac{\mu (R^2(t_m; m', n) - R_0^2(t_m; m, n))}{2c^2} - \frac{\mu R_\Delta(t_m; m, n)}{c} t\right)\right] \quad (5)$$

对 $s_{m,n}(t, t_m)$ 关于 t 做傅里叶变换, 得到

$$S_{m,n}(f, t_m) = \sigma(x, y, z) \cdot \exp\left[j2\pi\left(-\left(\frac{f_0}{c} + \frac{mk}{T_p c}\right) R_\Delta(t_m; m, n) + \frac{\mu (R^2(t_m; m', n) - R_0^2(t_m; m, n))}{2c^2}\right)\right] \cdot \exp\left(-\frac{j2\pi R f}{c}\right) \text{psf}\left(f + \frac{\mu R_\Delta(t_m; m, n)}{c}\right) \quad (6)$$

其中 $\text{psf}(f) = \text{FT}[\text{rect}(t/T_p)]$ 。 $|S_{m,n}(f, t_m)|$ 是一个 sinc 函数, 其峰值出现在 $f = -\mu R_\Delta(t_m; m, n)/c$ 处。由于目标上不同散射点到收发阵元距离与参考点到收发阵元距离之差不同, 因此在 f 轴上的不同位置将呈现出峰值, 从而实现了目标的 1 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, $R_\Delta(t_m; m, n)$ 随 t_m 的变化幅度小于距离分辨率, 因此可被认为是常数, 从距离-慢时间平面(即 f - t_m 平面)上看, 该散射点将对应一条垂直于 f 轴的直线, 这一点与单基雷达中相关结论相同。但当目标存在微动时, $R_\Delta(t_m; m, n)$ 表现出随 t_m 的明显变化, 使得微动点在 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。下面以最为常见的旋转运动为例分析 MIMO 雷达的微多普勒效应。

将图 1 所示的 MIMO 雷达系统简化为图 3 所示的平面图, 当取 o 点为“dechirp”处理的参考点时, 散射点 P 对应的 $R_\Delta(t_m; m, n)$ 即为 $(|\overline{O_T P}| + |\overline{O_R P}|) - (|\overline{O_T o}| + |\overline{O_R o}|)$, 当雷达工作于远场条件下时有 $R_\Delta(t_m; m, n) \approx |\overline{O P_1}| + |\overline{O P_2}|$, 其中 P_1, P_2 分别为 P 点在发射阵元视线方向 \mathbf{n}_1 和接收阵元视线方向 \mathbf{n}_2 上的投影点。图 4 给出了当散射点 P 绕点 o 做旋转运动时其空间几何结构示意图。图中平面为 P 点的旋转运动平面, $\overline{O P}$ 为旋转半径矢量, 其长度为 r ; \mathbf{n}_1 为某发射阵元的视线方向, 其在旋转平面上的投影矢量为 \mathbf{n}'_1 ; \mathbf{n}_2 为某接收阵元的视线方向, 其在旋转平面上的投影矢量为 \mathbf{n}'_2 ; P_1, P_2 分别为 P 点在 \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 上的投影点。设 t_m 时刻 $\overline{O P}$ 与 \mathbf{n}'_1 之间的夹角为 Ωt_m , 并设 $\overline{O P_1}$ 、 $\overline{O P_2}$ 分别与 \mathbf{n}_1 、 \mathbf{n}_2 同向时其长度为正, 否则长度为负, 有

$$\left. \begin{aligned} |\overline{O P_1}| &= |\overline{O P}| \cos(\Omega t_m) \sin \theta_1 \\ |\overline{O P_2}| &= |\overline{O P}| \cos(\Omega t_m + \phi) \sin \theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 θ_1 为 $\boldsymbol{\omega}$ 与 \mathbf{n}_1 之间的夹角, θ_2 为 $\boldsymbol{\omega}$ 与 \mathbf{n}_2 之间的夹角, ϕ 为从 \mathbf{n}'_1 绕旋转方向到 \mathbf{n}'_2 所转过的角度。因此有

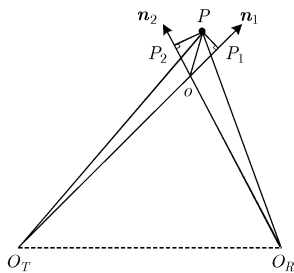


图 3 $R_\Delta(t_m; m, n)$ 沿 \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 方向分解示意图

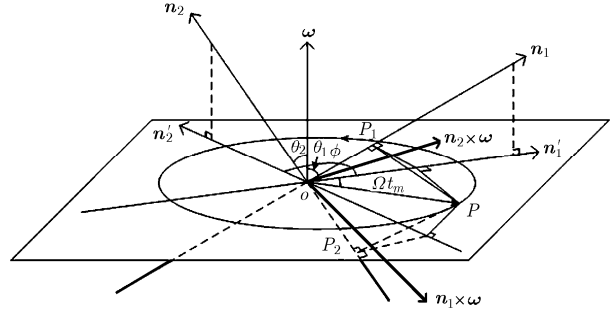


图 4 旋转运动空间几何示意图

$$\begin{aligned} R_\Delta(t_m; m, n) &= r \cos(\Omega t_m) \sin \theta_1 + r \cos(\Omega t_m + \phi) \sin \theta_2 \\ &= r(2 - \cos^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_2 \\ &\quad + 2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \phi)^{1/2} \cdot \sin(\Omega t_m - \varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\varphi = \arctan((\sin \theta_1 + \sin \theta_2 \cos \phi)/(\sin \theta_2 \sin \phi))$ 。可见 $R_\Delta(t_m; m, n)$ 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, 此即由旋转运动引起的微多普勒效应。分析式(8)可知, 与单基雷达中旋转运动的微多普勒效应比较, MIMO 雷达中旋转运动的微多普勒效应存在以下特点: (1)微多普勒频率随时间呈现正弦规律的变化, 正弦曲线的频率即为旋转散射点的旋转频率 Ω , 这一点与单基雷达微多普勒效应的性质相同; (2)与单基雷达中微多普勒频率正弦变化曲线的振幅为旋转半径在雷达视线方向上的投影值不同, MIMO 雷达中微多普勒频率曲线的振幅由 r, θ_1, θ_2 和 ϕ 等参数共同确定, 这意味着各组不同的收发阵元对 (m, n) 检测到的微多普勒频率曲线都具有不同的振幅。

3 3 维微动特征提取

由以上分析可知, 各组收发阵元对 (m, n) 检测到的微多普勒频率曲线的振幅由目标与收发阵元之间几何结构参数共同决定, 即

$$M_a = r \sqrt{2 - \cos^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_2 + 2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \phi} \quad (9)$$

其中 $\theta_1 = \arccos(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}_1 / (|\boldsymbol{\omega}| |\mathbf{n}_1|))$, $\theta_2 = \arccos(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}_2 / (|\boldsymbol{\omega}| |\mathbf{n}_2|))$, $0 \leq \theta_1, \theta_2 \leq \pi$ 。由图 4 可知, 当 $0 \leq \phi \leq \pi$ 时, ϕ 等价于 $\mathbf{n}_1 \times \boldsymbol{\omega}$ 与 $\mathbf{n}_2 \times \boldsymbol{\omega}$ 之间的夹角, 即 $\phi = (\mathbf{n}_1 \times \boldsymbol{\omega}, \mathbf{n}_2 \times \boldsymbol{\omega})$; 当 $\pi \leq \phi \leq 2\pi$ 时, $\phi = 2\pi - (\mathbf{n}_1 \times \boldsymbol{\omega}, \mathbf{n}_2 \times \boldsymbol{\omega})$ 。因此 $\cos \phi = (\mathbf{n}_1 \times \boldsymbol{\omega}) \cdot (\mathbf{n}_2 \times \boldsymbol{\omega}) / (|\mathbf{n}_1 \times \boldsymbol{\omega}| |\mathbf{n}_2 \times \boldsymbol{\omega}|)$ 。当目标与收发阵元之间的位置关系确定时, \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 为已知, 在提取到曲线的振幅 M_a 后, 式(9)中还包含了 4 个未知参量 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 。因此, 利用 MIMO 雷达的多视角特性, 提取 4 个收发阵元对以上的微多普勒频率曲线振幅信息, 即可

构造方程组求解 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 。

微多普勒频率曲线的振幅可以通过多种方法获取,如搜索 $f-t_m$ 平面中 f 轴上的最大值和最小值,再取均值即可获得 M_a 的近似估计;或采用推广的Hough变换来提取曲线参数信息^[11]。提取到曲线的参数信息后,可利用式(9)建立联立方程组求解。但是,对于式(9)所示的四元高次方程组无法求得解析解,只能通过数值计算方法如采用牛顿法求得近似解。

综上所述,OFD-LFM MIMO 雷达中旋转目标3维微动特征提取方法的具体步骤如下:

步骤1 构建MIMO雷达系统,收发阵元数量满足 $MN \geq 4$,各发射阵元辐射相互正交的OFD-LFM信号;

步骤2 对各接收阵元接收到的回波信号分别与参考信号 $s_{m0}(t, t_m)(m=1, 2, \dots, M)$ 做“dechirp”处理再经过低通滤波,分离不同载频的回波信号,共得到 MN 组回波数据;

步骤3 对 MN 组回波数据关于快时间 t 做傅里叶变换,获得 $f-t_m$ 域的回波信号;

步骤4 提取 $f-t_m$ 平面上正弦曲线的频率 Ω 和振幅 M_{ai} , $i=1, 2, \dots, MN$;

步骤5 求解多元非线性方程组

$$\left. \begin{aligned} M_{ai} &= r \sqrt{2 - \cos^2 \theta_{1m} - \cos^2 \theta_{2n} + 2 \sin \theta_{1m} \sin \theta_{2n} \cos \phi_i} \\ i &= 1, 2, \dots, MN; m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N \\ \omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2 &= \Omega^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

获得数值解 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 。

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3维矢量 $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ 。与单基雷达下仅能获得目标在雷达视线方向上的运动信息相比,MIMO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。可通过增加MIMO雷达收发阵元个数来增加方程组中方程数量,对其根提出更为严格的约束。以进一步提高求解精度。

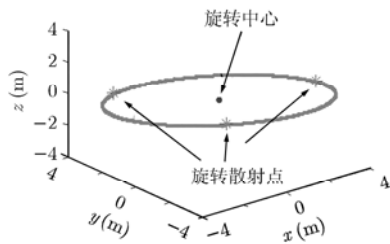


图5 目标散射点模型

4 仿真分析

4.1 算法有效性验证

设MIMO雷达系统由2个发射阵元和4个接收阵元构成,发射阵元的坐标分别为 $(-3000, 0, 0)$ 和 $(3000, 0, 0)$,接收阵元的坐标分别为 $(-7000, 0, 0)$, $(-1000, 0, 0)$, $(2000, 0, 0)$ 和 $(5000, 0, 0)$,单位均为米(m)。发射阵元辐射OFD-LFM信号的载频分别为10 GHz和10.015 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 $(3000 \text{ m}, 4000 \text{ m}, 5000 \text{ m})$, $\mathbf{v} = [100 \text{ m/s}, 150 \text{ m/s}, 100 \text{ m/s}]$ 。如图5所示,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 $\omega = [2\pi \text{ rad/s}, 3\pi \text{ rad/s}, 3\pi \text{ rad/s}]$ 、相同的旋转半径 $r = 4.3716 \text{ m}$ 绕目标本地坐标系中的原点 $(0, 0, 0)$ 作匀速圆周运动,初始旋转半径矢量分别为 $[2, 2, -3.3333]$ 、 $[-3.9542, 1.3387, 1.2974]$ 和 $[1.9542, -3.3387, 2.0359]$,其构成的平面与 ω 垂直。计算可得 $\Omega = 14.7354 \text{ rad/s}$,即2.3452 Hz。仿真中不考虑散射点遮挡效应。

图6给出了收发阵元对(1,1)获得的回波信号经过1维成像处理后在 $f-t_m$ 平面上的正弦曲线表现形式。对图6进行Hough变换,可提取到3条正弦曲线的频率为14.7 rad/s,振幅为3.72 m(在 f 轴上对应于7.46 MHz),而由式(9)计算得到的振幅理论值为3.7336,两者相当吻合。对其余各收发阵元对获得的目标回波信号进行同样处理后,提取到的正弦曲线振幅值见表1。

在提取曲线参数的基础上,利用式(10)建立方程组,采用MATLAB中的fsolve命令求解,搜索初值设为 $(1, 1, 1, 1)$,解得 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r) = (6.3023, 9.3762, 9.4052, 4.4069)$,与理论值 $(2\pi, 3\pi, 3\pi, 4.3716)$ 十分接近。这就验证了本文所提方法的有效性。

4.2 鲁棒性分析

由于辐射信号带宽的限制,MIMO雷达的距离分辨率有限,且由于距离像旁瓣的存在,在提取

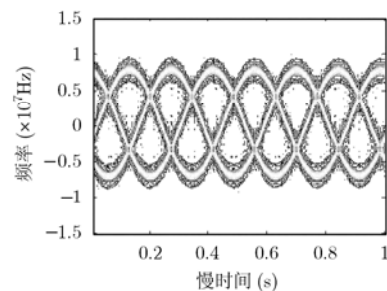


图6 收发阵元对(1,1)获得的微多普勒信号

表1 Hough 变换提取到的正弦曲线振幅

(m,m)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)
振幅理论值	3.7336	2.0244	0.8396	1.7907	0.8838	1.6006	3.2194	4.8919
提取到的振幅	3.72	2.00	0.84	1.80	0.90	1.60	3.23	5.00

$f-t_m$ 平面上曲线参数时将不可避免地引入误差,而对 Ω 和 M_a 的估计误差必然会影响到式(10)的求解精度。为了考察和分析这种影响,我们定义误差与真实值之间的比值为归一化误差 $\rho = (\hat{X} - X)/X$, 其中 X 为真实值, \hat{X} 为估计值,并定义 $|\rho|$ 为归一化绝对误差。假设误差服从高斯分布,并采用蒙特卡洛仿真方法对算法进行了鲁棒性分析,仿真次数为 100 次。由于 MIMO 雷达共可获得 MN 组回波数据,对每组数据均需估计 M_{ai} , $i = 1, 2, \dots, MN$, 因此考察 M_a 的估计精度对方程组求解的影响,需从 M_a 的归一化误差均值 $E(\rho_{M_a})$ 或归一化误差的方差 $D(\rho_{M_a})$ 着手进行讨论。我们分以下 3 种情况进行仿真:

(1)假设曲线频率 Ω 被准确估计, M_a 为无偏估计,考察解得的 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 的归一化绝对误差与 $D(\rho_{M_a})$ 之间的关系。图 7(a)给出了 $D(\rho_{M_a})$ 在 $[0, 0.5]$ 内变化时, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 的归一化误差平均值的变化曲线,可见其基本上是随着 $D(\rho_{M_a})$ 的增加而线性增加。

(2)假设曲线频率 Ω 被准确估计, M_a 为有偏估计,此时可设 $D(\rho_{M_a})$ 一定,考察解得的 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 的归一化绝对误差与 $E(\rho_{M_a})$ 之间的关系。图 7(b)给出了当 $D(\rho_{M_a}) = 0.01$, $E(\rho_{M_a})$ 在 $[-0.3, 0.3]$ 内变化时 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 的归一化绝对误差平均值的变化曲线,可见 r 的归一化绝对误差随着 $|E(\rho_{M_a})|$ 的增加而线性增加, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 的归一化绝对误差则基本保持平稳,且远比第(1)种情况下的误差小。这表明 $E(\rho_{M_a})$ 的变化对 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 的求解精度影响要小于 $D(\rho_{M_a})$ 对其的影响。

(3)假设曲线振幅 M_a 被准确估计,考察解得的 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 的归一化绝对误差与 Ω 的归一化误差 ρ_Ω 之间的关系。图 7(c)给出了 ρ_Ω 在 $[-0.3, 0.3]$ 内变化时, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 的归一化绝对误差平均值的变化曲线。由图可见, r 的归一化绝对误差始终接近于 0, 基本不受 ρ_Ω 的影响, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 的归一化绝对误差则与 ρ_Ω 保持着十分严格的线性关系。这个现象可由式(10)的性质得到解释: M_{ai} 由 r 、 θ_1 、 θ_2 和 ϕ 共同确定,而 θ_1 、 θ_2 和 ϕ 的取值与旋转角速度矢量 $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ 的方向有关,与其模值 Ω 并无直接关系,因此 Ω 的估计精度并不对 r 的求解造成影响;而由 $\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2 = \Omega^2$ 可知,当 ρ_Ω 线性增加时, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 的归一化绝对误差也将线性增加。

由以上分析可知,方程组的求解精度一定程度上受到曲线参数估计精度的制约。因此,若要提高 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, r)$ 的求解精度,应尽可能地提高 Ω 和 M_a 的估计精度。这可通过两条途径来实现:一是尽可能地增加雷达辐射信号带宽,以获得更高的距离分辨率;二是在提取曲线参数前先采用图像处理方法对曲线进行预处理,如进行“骨架”提取并使用正弦曲线拟合等方法,本文不再赘述。

5 结束语

MIMO 雷达技术已成为当前研究的一个热点,但总的来看,当前 MIMO 雷达的研究主要集中在信号设计、检测、参数估计、波束形成、DOA 估计等方面,基于 MIMO 雷达的成像与目标识别技术研究则尚未十分深入。本文从提取目标精细微动特征出发,研究了 OFD-LFM MIMO 雷达中旋转目标的微

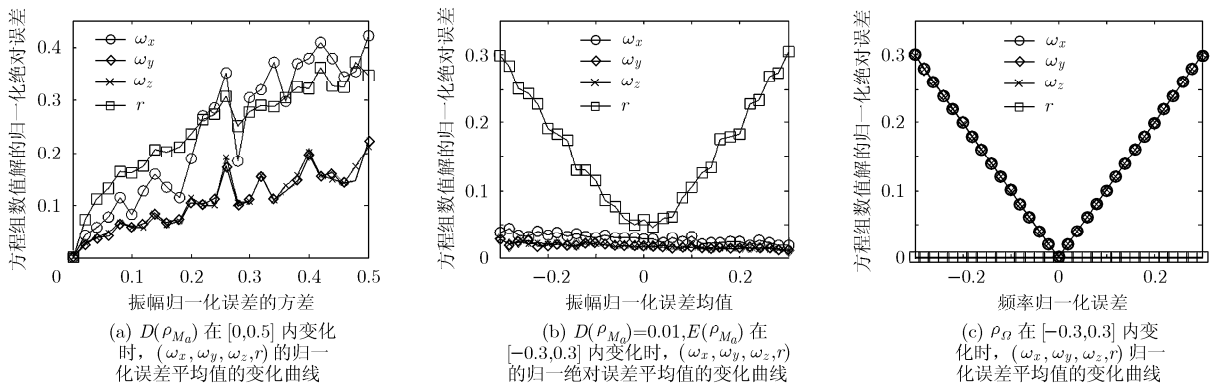


图7 鲁棒性分析

多普勒效应, 并利用 MIMO 雷达的多视角特性成功提取了目标的 3 维微动参数, 克服了普通单基雷达中仅能提取目标在雷达视线方向上微动分量的局限, 为特殊目标识别提供了更为准确丰富的特征信息。

参 考 文 献

- [1] Fishler E, Haimovich A, and Blum R, *et al.* MIMO radar: an idea whose time has come [C]. Proceeding of the IEEE Radar Conference, Philadelphia, PA, 2004: 71-78.
- [2] 何子述, 韩春林, 刘波. MIMO 雷达概念及其技术特点分析[J]. 电子学报, 2005, 33(12A): 2441-2445.
He Zi-shu, Han Chun-lin, and Liu Bo. MIMO radar and its technical characteristic analyses [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12A): 2441-2445.
- [3] 汤俊, 伍勇, 彭应宁, 等. MIMO 雷达检测性能和系统配置研究[J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(7): 776-781.
- [4] 韩兴斌, 胡卫东, 郁文贤, 等. 分布式多通道雷达成像技术[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2354-2358.
Han Xing-bin, Hu Wei-dong, and Yu Wen-xian, *et al.* An imaging technique based on distributed multi-channel radars [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2007, 29(10): 2354-2358.
- [5] 朱宇涛, 郁文贤, 粟毅. 一种基于 MIMO 技术的 ISAR 成像方法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1885-1894.
Zhu Yu-tao, Yu Wen-xian, and Su Yi. An ISAR imaging method based on MIMO technique [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(9): 1885-1894.
- [6] 段广青, 王党卫, 马晓岩. MIMO 雷达三维成像方法研究[J]. 空军雷达学院学报, 2009, 23(3): 171-174.
Duan Guang-qing, Wang Dang-wei, and Ma Xiao-yan. Study on the approach of 3D imaging for MIMO radar systems [J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2009, 23(3): 171-174.
- [7] Chen V C, Li F, and 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.
- [8] 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 Zhao-wen, Liu Yong-xiang, and Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 520-525.
- [9] Bai Xue-ru, Xing Meng-dao, and 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.
- [10] 白雪茹, 周峰, 刑孟道, 等. 空中微动旋转目标的二维 ISAR 成像算法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1937-1943.
Bai Xue-ru, Zhou Feng, and Xing Meng-dao, *et al.* 2D ISAR imaging algorithm for air micro-motion targets [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(9): 1937-1943.
- [11] 张群, 罗斌凤, 管桦, 等. 基于微 Doppler 提取的具有旋转部件雷达目标成像[J]. 自然科学进展, 2007, 17(10): 1410-1417.
罗 迎: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像与目标识别.
张 群: 男, 1964 年生, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理与电子对抗.