

多载频 MIMO 雷达中目标旋转部件 三维微动特征提取方法

罗 迎¹,张 群^{1,2},朱仁飞¹,梁贤姣¹,吉 楠³

(1. 空军工程大学电讯工程学院,陕西西安 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. 95813 部队,福建福州 350000)

摘 要: 雷达目标的微多普勒效应为目标精确识别提供了新的技术途径,近年来获得了广泛研究.将多输入多输出(MIMO)雷达技术引入雷达目标微多普勒效应研究,在分析多载频 MIMO 雷达中目标旋转部件微多普勒效应的基础上,提出了一种雷达目标三维微动特征提取方法.该方法通过在回波时频平面上消除目标主体运动产生的多普勒频移,构造相应的 Hough 变换方程提取时频平面上曲线骨架的参数,再利用 MIMO 雷达的多视角特性,构建多元非线性方程组求解旋转部件的三维运动参数,从而实现了目标三维微动特征的提取.仿真实验验证了算法的有效性,并对算法的鲁棒性进行了进一步的分析.

关键词: 微多普勒; 多输入多输出(MIMO); 目标识别

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2011)09-1975-07

Three-Dimensional Micro-Motion Feature Extraction of Target with Rotating Parts in Multi-Carrier MIMO Radar

LUO Ying¹,ZHANG Qun^{1,2},ZHU Ren-fei¹,LIANG Xian-jiao¹,JI Nan³

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

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

3. PLA, No. 95813 Troop, Fuzhou, Fujian 350000, China)

Abstract: The micro-Doppler (m-D) effect, which provides a new approach for accurate auto radar target recognition, has attracted great research attention in recent years. In this paper, the multi-input multi-output (MIMO) techniques are introduced for the m-D feature extraction. Based on the analysis of m-D effect induced by radar target with rotating parts in multi-carrier MIMO radar, an algorithm for three-dimensional micro-motion feature extraction is proposed. In the algorithm, the Doppler frequency shift induced by the target body is eliminated from the time-frequency plane of echoes, and the parameters of the curve skeletons on the time-frequency plane are extracted by utilizing the Hough transform, then the three-dimensional micro-motion features can be obtained by solving nonlinear multivariable equation systems. Simulations validate the effectiveness of the algorithm, and the robustness of the algorithm is also analyzed.

Key words: micro-Doppler; multi-input multi-output (MIMO); target recognition

1 引言

高分辨时频分析等现代信号处理技术的发展与成熟使得对雷达目标精细微动特征的提取成为可能,这为目标的精确识别提供了新的技术途径^[1].2000年,Chen首次将“微多普勒(micro-Doppler)”的概念由激光领域引入雷达目标识别领域^[2],并将由目标或目标部件除质心平动以外的振动、转动等微动产生的对雷达回波信号的

附加频率调制,从而生成关于机动目标主体的多普勒边带的现象称为微多普勒效应(micro-Doppler effect)^[3,4].微多普勒效应体现了目标的独特运动特征,因而可为飞机、导弹、卫星等特殊目标的分类与识别提供重要信息.

近年来,微多普勒效应在单基雷达中已经得到了较为广泛的研究^[2~8].Chen等人较为系统地研究了单基雷达中目标加速、旋转、振动、翻滚等状态下的微多普勒频移^[2~4];文献[5]采用 chirplet 分解方法实现了单基雷

达下旋转部件回波信号与目标主体信号的分离;文献[6]提出了基于“经验模式分解(EMD)”的含旋转部件雷达目标成像方法;文献[7]提出了一种基于推广的Hough变换来提取微多普勒信息的方法;文献[8]研究了加速度对微多普勒的影响并提出了补偿算法;等等.由于在单基雷达条件下,雷达回波的微多普勒特征参数仅由目标微动部件运动矢量在雷达视线方向(LOS)上的投影值决定,因此现有文献所提方法只能提取目标微动部件在雷达视线方向上的结构和运动特征.由于运动目标姿态变化的复杂性,在不同的雷达视角下,其微多普勒特征将呈现出显著差异,从而影响目标识别的准确性.若要克服目标微多普勒特征的姿态敏感性,必须设法从雷达目标回波中提取能反映目标微动部件真实运动的三维微动信息,而从现有文献和资料来看,尚无提取目标三维微动特征的方法公开报道.

多输入多输出(MIMO)雷达技术近两年来获得了较为广泛的关注^[9~11].空间分集的特点使得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,且具备较好的反隐身能力.由于MIMO雷达可形成多个收发通道,在不同的视角下接收目标回波信号,因此若将MIMO技术引入目标微多普勒信息提取,必将能提取到目标更为精细准确的微动特征,并为提取目标部件的真实三维微动特征提供了可能.

本文从该思路出发,以目标微动形式中最为常见的旋转运动为例,提出了基于多载频MIMO雷达系统的目标三维微动特征提取方法.论文推导了MIMO雷达系统中目标部件旋转运动引起的微多普勒效应的参数化表示,在此基础上补偿目标主体运动产生的多普勒频移,并构造相应的Hough变换方程提取回波时频平面上曲线骨架的参数,再进一步利用MIMO雷达的多视角特点构建多元非线性方程组求解旋转部件的三维运动参数,从而实现了目标三维微动特征的提取.论文通过仿真验证了算法的有效性,并对算法的鲁棒性进行了进一步的分析.

2 MIMO 雷达微多普勒效应

如图1所示的MIMO雷达系统, $OXYZ$ 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 $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 绕旋转中心C旋转, $\boldsymbol{\omega}$ 的模值为 Ω .对于任意一组收发阵元 $O_{Tm}O_{Rn}$,散射点P到雷达收发阵元的距离和为

$$r(t; m, n) = \|\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}\| + \|\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}\| \quad (1)$$

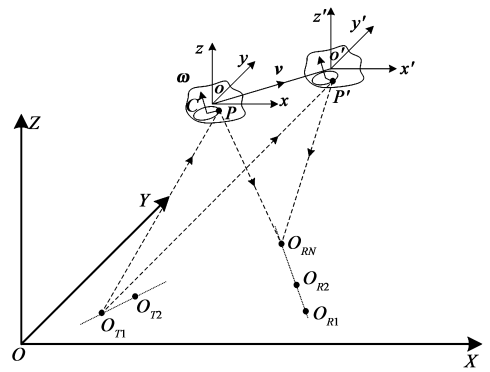


图1 MIMO雷达中含旋转部件目标几何示意图

其中 \mathbf{R}_t 为3-D旋转矩阵:

$$\mathbf{R}_t = \exp\{\hat{\boldsymbol{\omega}}t\}, \hat{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

令 $\boldsymbol{\omega}' = [\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z]^T = \boldsymbol{\omega}/\Omega$, \mathbf{R}_t 可写为^[4]

$$\mathbf{R}_t = \mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}' \sin\Omega t + \hat{\boldsymbol{\omega}}'^2 (1 - \cos\Omega t) \quad (3)$$

$$\text{其中 } \hat{\boldsymbol{\omega}}' = \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_z & \omega'_y \\ \omega'_z & 0 & -\omega'_x \\ -\omega'_y & \omega'_x & 0 \end{bmatrix}.$$

假设各雷达发射阵元辐射载频互异的单频连续波,则P点的基带回波信号为

$$s(t; m, n) = \sigma(x, y, z) \exp[j2\pi f_m \cdot r(t; m, n)/c] \quad (4)$$

其中 $\sigma(x, y, z)$ 为P的散射系数, f_m 为第m个发射阵元辐射信号的载频, c 为光速.

对式(4)右边的相位项关于时间 t 求导,即得到回波信号的多普勒频率

$$\begin{aligned} f_D(t; m, n) &= \frac{f_m}{c} \frac{dr(t; m, n)}{dt} \\ &= \frac{f_m}{c} \left[\mathbf{v} + \frac{d}{dt} (\mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}) \right]^T \\ &\times \left[\frac{\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}}{\|\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}\|} + \frac{\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}}{\|\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}\|} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

\overrightarrow{CP} 为初始时刻旋转半径矢量.通常 $\|\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt}\| \gg \|\mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}\|$, $\|\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt}\| \gg \|\mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}\|$,因此有

$$\begin{aligned} \frac{\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}}{\|\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}\|} &\approx \frac{\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt}}{\|\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt}\|} \\ \frac{\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}}{\|\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}\|} &\approx \frac{\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt}}{\|\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt}\|} \end{aligned}$$

则式(5)简化为

$$\begin{aligned} f_D(t; m, n) &\approx \frac{f_m}{c} \left[\mathbf{v} + \frac{d}{dt} (\mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}) \right]^T \\ &\times \left[\frac{\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt}}{\|\overrightarrow{O_{Tm}C} + \mathbf{vt}\|} + \frac{\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt}}{\|\overrightarrow{O_{Rn}C} + \mathbf{vt}\|} \right] \end{aligned}$$

$$= \frac{f_m}{c} \left[\mathbf{v} + \frac{d}{dt} (\mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}) \right]^T \mathbf{n}_b(t) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{n}_b(t)$ 事实上为 t 时刻与目标相对收发阵元夹角的角平分线矢量相反的矢量. 上式右边第一项为由目标主体运动引起的多普勒频移, 第二项则为由微动散射点旋转引入的微多普勒频率, 即

$$f_{m-D}(t; m, n) = \frac{f_m}{c} \left[\frac{d}{dt} (\mathbf{R}_t \overrightarrow{CP}) \right]^T \mathbf{n}_b(t) \quad (7)$$

将式(2)和(3)代入式(7), 由 $\hat{\boldsymbol{\omega}}'^3 = -\hat{\boldsymbol{\omega}}'$ 有

$$\begin{aligned} f_{m-D}(t; m, n) &= \frac{f_m}{c} \left[\frac{d}{dt} (\mathbf{e}^{\hat{\boldsymbol{\omega}}' t} \overrightarrow{CP}) \right]^T \mathbf{n}_b(t) \\ &= \frac{f_m}{c} [\hat{\boldsymbol{\omega}}' \mathbf{e}^{\hat{\boldsymbol{\omega}}' t} \overrightarrow{CP}]^T \mathbf{n}_b(t) \\ &= \frac{\Omega f_m}{c} [\hat{\boldsymbol{\omega}}' (\mathbf{I} + \hat{\boldsymbol{\omega}}' \sin \Omega t + \hat{\boldsymbol{\omega}}'^2 (1 - \cos \Omega t)) \overrightarrow{CP}]^T \mathbf{n}_b(t) \\ &= \frac{\Omega f_m}{c} [\hat{\boldsymbol{\omega}}' (\hat{\boldsymbol{\omega}}' \sin \Omega t + \mathbf{I} \cos \Omega t) \overrightarrow{CP}]^T \mathbf{n}_b(t) \end{aligned} \quad (8)$$

在式(8)中, $\mathbf{n}_b(t)$ 的时变性对微多普勒频率的影响在短时间内通常可忽略不计, 即有 $\mathbf{n}_b(t) \approx \mathbf{n}_b(0) = \mathbf{n}_{b0}$. 于是式(8)可近似为

$$f_{m-D}(t; m, n) = \frac{\Omega f_m}{c} [\hat{\boldsymbol{\omega}}' (\hat{\boldsymbol{\omega}}' \sin \Omega t + \mathbf{I} \cos \Omega t) \overrightarrow{CP}]^T \mathbf{n}_{b0} \quad (9)$$

令 $\overrightarrow{CP} = \mathbf{r}_0 = [r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}]^T$, $\mathbf{n}_{b0} = [n_{b0x}, n_{b0y}, n_{b0z}]^T$, 式(9)可展开为

$$\begin{aligned} f_{m-D}(t; m, n) &= \frac{\Omega f_m}{c} \cdot [A \sin \Omega t + B \cos \Omega t] \\ &= \frac{\Omega f_m}{c} \sqrt{A^2 + B^2} \sin(\Omega t + \phi) \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= -n_{b0x} r_{0x} \omega_z'^2 - n_{b0x} r_{0x} \omega_y'^2 + n_{b0x} r_{0y} \omega_x' \omega_y' \\ &\quad + n_{b0x} r_{0y} \omega_x' \omega_z' + n_{b0y} r_{0x} \omega_x' \omega_y' - n_{b0y} r_{0y} \omega_z'^2 \\ &\quad - n_{b0y} r_{0y} \omega_x'^2 + n_{b0y} r_{0z} \omega_y' \omega_z' + n_{b0z} r_{0x} \omega_x' \omega_z' \\ &\quad + n_{b0z} r_{0y} \omega_y' \omega_z' - n_{b0z} r_{0z} \omega_y'^2 - n_{b0z} r_{0z} \omega_x'^2 \\ B &= -n_{b0x} r_{0y} \omega_z' + n_{b0x} r_{0z} \omega_y' + n_{b0y} r_{0x} \omega_z' \\ &\quad - n_{b0y} r_{0z} \omega_x' - n_{b0z} r_{0x} \omega_y' + n_{b0z} r_{0y} \omega_x' \\ \phi &= \text{atan}(B/A) \end{aligned}$$

由式(10)可以看出, 由旋转引入的微多普勒频率随时间呈现正弦规律的变化, 若对回波信号做时频分析, 微多普勒效应在时频平面上将表现为正弦曲线形式, 正弦曲线的频率即为旋转散射点的旋转频率 Ω , 振幅 M_a 由发射信号频率、旋转散射点的旋转半径和旋转角速度矢量、目标与收发阵元夹角的角平分线矢量等参数共同决定, 即

$$M_a = \Omega f_m \sqrt{A^2 + B^2} / c \quad (11)$$

3 旋转部件三维微动特征提取

对于 MIMO 雷达中各组收发阵元, 由于目标与收发

阵元之间几何结构参数的变化, 接收天线上获得的目标回波微多普勒信号各不相同, 时频平面上的正弦曲线的振幅也将出现差异, 这为利用 MIMO 雷达的多视角特点建立多元方程组求解目标旋转部件的空间三维特征提供了可能. 本文所提的旋转部件三维微动特征提取算法可分为消除目标主体多普勒频移、提取时频平面曲线参数和构建多元方程组求解三维微动参数等三个主要步骤, 具体阐述如下.

3.1 消除目标主体多普勒频移

由于目标回波除了存在由目标微动引起的微多普勒频移外, 还存在由目标主体平动引起的多普勒频移

$$f_{B-D}(t; m, n) = \frac{f_m}{c} \mathbf{v}^T \mathbf{n}_b(t) \quad (12)$$

因此在对目标回波进行微多普勒效应分析时, 必须先剔除目标主体多普勒频移的影响. 与式(8)相比, 由于通常 $\|\mathbf{v}\| \gg \|\overrightarrow{CP}\|$, 因此式(12)中的 $\mathbf{n}_b(t)$ 不能由 \mathbf{n}_{b0} 简单近似, 需对目标进行多普勒跟踪, 估计目标运动速度并计算 $f_{B-D}(t; m, n)$. 目标运动速度估计可采取现有单基雷达中成熟的算法, 或参考文献[12]中所提的双基多载频 MIMO 雷达目标运动参数估计方法, 必要时可能还需要雷达发射辅助信号以实现目标主体运动参数的准确估计. 由于本文重点在于提取目标的三维微动特征, 因此不妨假设目标主体运动速度 \mathbf{v} 已经被准确估计. 由于目标主体多普勒频移 $f_{B-D}(t; m, n)$ 是时变的, 因此无法简单地对目标回波信号 $s(t; m, n)$ 进行频谱搬移以消除主体多普勒频移, 必须将 $s(t; m, n)$ 做时频分析变换到时间-频率域再做处理. 假设 $s(t; m, n)$ 通过时频变换后的表达式为 $S(t, f; m, n)$, 对于某时刻 t_0 时的信号 $S(t_0, f; m, n)$, 将其平移为 $S(t_0, f - f_{B-D}(t_0; m, n); m, n)$ 即可消除目标主体多普勒频移影响, 这可借助傅立叶变换的时移特性来实现, 即(记 f 维的傅立叶变换算子为 FFT_f)

$$\begin{aligned} S_{m-D}(t, f; m, n) &= \text{IFFT}_F \{ \text{FFT}_f [S(t, f; m, n)] \\ &\quad \cdot \exp[-j2\pi F \cdot f_{B-D}(t; m, n)] \} \end{aligned} \quad (13)$$

或先对 $S(t, f; m, n)$ 在 f 维进行傅立叶插值再进行移位处理得到目标微多普勒信号的时频分布 $S_{m-D}(t, f; m, n)$, 这可一定程度上避免式(13)中傅立叶变换时产生的旁瓣效应.

特别地, 当目标在回波信号采集时间内为匀速运动, 即 \mathbf{v} 不变时, 可将 $\mathbf{n}_b(t)$ 分为常数项和时变项两部分, 式(12)可重写为

$$\begin{aligned} f_{B-D}(t; m, n) &= \frac{f_m}{c} \mathbf{v}^T [n_{b0} + \mathbf{n}'_b(t)] \\ &= f_{B-D0}(m, n) + f'_{B-D}(t; m, n) \end{aligned} \quad (14)$$

此时, 为了在降低信号采样率的同时避免时频平面上曲线的卷绕现象, 可先对 $s(t; m, n)$ 做去多普勒载

频处理:

$$s'(t; m, n) = s(t; m, n) \cdot \exp(-j2\pi f_{B-D}(m, n)t) \quad (15)$$

对 $s'(t; m, n)$ 做时频分析变换为 $S'(t, f; m, n)$, 再将其平移为 $S'(t, f - f'_{B-D}(t; m, n); m, n)$ 即可。

3.2 提取时频平面曲线参数

由前面分析可知, 要实现目标旋转部件的空间三维特征提取, 必须从各组收发阵元获得的时频平面上的正弦曲线出发, 通过提取曲线的频率和振幅, 再利用式(11)建立方程组联立求解。为了准确提取曲线参数, 首先利用数学形态学方法提取曲线骨架。为了避免时频平面上的曲线“毛刺”对骨架提取的不利影响, 先对时频图进行平滑处理, 并设置合适阈值将其转化为二值图像, 在此基础上再提取曲线骨架。根据数学形态学, 设 $S(A)$ 为区域 A 的骨架^[13]

$$S(A) = \bigcup_{k=0}^K S_k(A) \quad (16)$$

其中 $S_k(A)$ 为骨架子集:

$$S_k(A) = (A \circ k B) - [(A \circ k B) \circ B] \quad (17)$$

其中 B 为结构元素, \circ 为“开启”运算, $(A \circ k B)$ 表示连续 k 次用 B 对 A 腐蚀, K 为将 A 腐蚀成空集前的最后一次迭代次数, 即

$$K = \max\{k \mid (A \circ k B) \neq \emptyset\} \quad (18)$$

在提取曲线骨架的基础上, 再利用 Hough 变换提取骨架的参数。Hough 变换是检测图像中满足特定解析式的各类曲线的一种有效方法, 最早由 Paul Hough 提出并申请了专利^[14], 并已被证明可有效应用于雷达目标微多普勒特征提取^[7, 15]。根据微多普勒信号在时频平面上的曲线方程式(10), 可构造 Hough 变换方程

$$f_{m-D}(t; m, n) - M_a \sin(\Omega t + \phi) = 0 \quad (19)$$

利用 Hough 变换可将 (t, f) 平面的曲线检测问题转化为参数 (M_a, Ω, ϕ) 空间的峰值检测问题。具体的算法实现过程如下:

Step 1 建立一个离散的累加器数组 $A_c(M_a, \Omega, \phi)$, 其中 $M_a \in [M_{a\min}, M_{a\max}]$, $\Omega \in [\Omega_{\min}, \Omega_{\max}]$, $\phi \in [\phi_{\min}, \phi_{\max}]$ 分别为预期的取值范围。将 $A_c(M_a, \Omega, \phi)$ 中每个元素置 0。

Step 2 对提取骨架后的 (t, f) 平面上所有点按照式(19)做 Hough 变换, 即算出点 $(t', f_{m-D}(t'; m, n))$ 在 HT 空间里的对应曲线 (M'_a, Ω', ϕ') , 并在相应的累加器加 1, 即

$$A_c(M'_a, \Omega', \phi') = A_c(M'_a, \Omega', \phi') + 1 \quad (20)$$

Step 3 找出 $A_c(M_a, \Omega, \phi)$ 里的局部最大值, 该值的坐标提供了 (t, f) 平面上正弦曲线的频率和振幅。

3.3 求解三维微动参数

在式(11)中, Ω 和 M_a 已通过 Hough 变换获得; f_m ,

$n_{b0x}, n_{b0y}, n_{b0z}$ 均为已知参数; 待求解参数为六元未知数组 $(r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}, \omega'_x, \omega'_y, \omega'_z)$ 。因此, 若要正确求解, 至少需构建六个方程。由已有条件可得到以下两个方程:

(1) 由于 $\omega' = [\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z]^T = \omega / \Omega$, 因此有 $\omega'^2_x + \omega'^2_y + \omega'^2_z = 1$;

(2) 对于旋转运动, 旋转角速度矢量垂直于旋转半径矢量, 即 $\omega'_x r_{0x} + \omega'_y r_{0y} + \omega'_z r_{0z} = 0$ 。

因此, 要求得 $(r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}, \omega'_x, \omega'_y, \omega'_z)$, 至少还需要构建四个方程, 即 MIMO 雷达中收发阵元个数的乘积须满足 $MN \geq 4$ 。通常对于式(11)所示的六次方程无法求得解析解, 只能通过数值计算方法求得近似解, 如采用牛顿法求解。为了保证迭代求解过程能向准确解收敛, 并避免求解受无实际物理意义的重根的影响, 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, 以对方程的根提出更为严格的约束。仿真表明, 当收发阵元数量满足 $MN \geq 6$ 时, 采用牛顿法可求得方程组较为准确的解。

综上所述, 多载频 MIMO 雷达目标中旋转部件的三维微动特征提取方法的具体步骤如下:

Step 1 构建 MIMO 雷达系统, 收发阵元数量满足 $MN \geq 6$, 各发射阵元辐射载频互不相同的单频连续波信号;

Step 2 对各接收阵元接收到的目标回波信号进行带通滤波, 分离不同载频的回波信号, 共得到 MN 组回波数据;

Step 3 对 MN 组回波数据分别进行时频分析, 在时频平面上去除主体多普勒频移, 得到目标微多普勒信号的时频分布 $S_{m-D}(t, f; m, n)$;

Step 4 对 $|S_{m-D}(t, f; m, n)|$ 提取骨架并进行 Hough 变换, 获得时频平面上正弦曲线的频率 Ω 和振幅 M_{ai} , $i = 1, 2, \dots, MN$;

Step 5 求解非线性方程组

$$\begin{cases} M_{ai} = \Omega f_m \sqrt{A_i^2 + B_i^2} / c, \\ i = 1, 2, \dots, MN; m = 1, 2, \dots, M \\ \omega'^2_x + \omega'^2_y + \omega'^2_z = 1 \\ \omega'_x r_{0x} + \omega'_y r_{0y} + \omega'_z r_{0z} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

获得数值解 $(r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}, \omega'_x, \omega'_y, \omega'_z)$;

Step 6 由数值解求得旋转散射点的旋转半径 $\|\mathbf{r}_0\| = \sqrt{r_{0x}^2 + r_{0y}^2 + r_{0z}^2}$, 旋转角速度矢量 $\omega = [\Omega \omega'_x, \Omega \omega'_y, \Omega \omega'_z]^T$ 。

通过上述步骤, 可以获得目标旋转部件的真实旋转半径和旋转角速度的空间三维矢量。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, 多载频 MIMO 雷达为实现特殊目标的精确识别、目标部件运动

姿态的精确定位等提供了更为丰富准确的特征信息。

4 仿真分析

4.1 算法有效性验证

设 MIMO 雷达系统由 4 个发射阵元和 2 个接收阵元构成,发射阵元的坐标分别为 $(0, 0, 0)$ 、 $(1000, 3000, 0)$ 、 $(2000, 6000, 0)$ 和 $(3000, 9000, 0)$,接收阵元的坐标分别为 $(7000, 0, 0)$ 和 $(6000, 4000, 0)$,单位均为米.发射阵元辐射信号的载频分别为 6GHz、7GHz、8GHz 和 9GHz.目标中心坐标为 $(3000\text{m}, 4000\text{m}, 5000\text{m})$, $\mathbf{v} = [150\text{m/s}, 150\text{m/s}, 150\text{m/s}]^T$.目标由三个旋转散射点构成,其在本地坐标系中的散射点分布如图 2(a) 所示.三个旋转散射点在旋转圆周上等间距分布,以相同的旋转角速度 $\boldsymbol{\omega} = [2\pi, 4\pi, 2\pi]^T \text{ rad/s} = [6.2832, 12.5664, 6.2832]^T \text{ rad/s}$ 、相同的旋转半径 $\|\mathbf{r}_0\| = 0.6633\text{m}$ 绕目标本地坐标系中的点 $(3, 4, 5)$ 作匀速圆周运动.三个旋转散射点的初始旋转半径矢量分别为 $[0.2, 0.2, -0.6]^T$ 、 $[-0.5950, 0.1828, 0.2293]^T$ 和 $[0.3950, -0.3828, 0.3707]^T$.计算可得 $\Omega = 15.3906\text{rad/s}$,即 2.4495Hz .共采集了时长 0.5s 的回波信号,采样率 6kHz .

对发射阵元 $(0, 0, 0)$ 与接收阵元 $(7000, 0, 0)$ 构成的雷达观测组获得的回波信号按照式(15)去多普勒载频后进行时频分析(仿真中我们采用的是 Gabor 变换),得到如图 2(b) 所示的时频分布,可见各旋转散射点的回波频率表现为随时间变化的震荡曲线,但由于主体多普勒频移的存在,曲线并未呈现为标准的正弦曲线形式.对 f 维进行 6 倍傅立叶插值并进行移位处理后得到的时频分布如图 3(a) 所示,此时主体多普勒频移已被消除,获得的是目标微多普勒信号的时频分布,呈现为规则的正弦曲线形式。

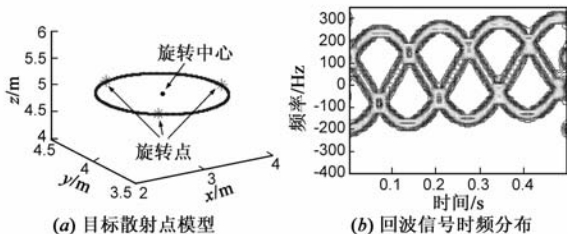


图 2

为了消除图 3(a) 中曲线周边噪点的影响,我们采用一个 25×25 像素的高斯空间掩模对图像进行平滑处理,所得结果如图 3(b) 所示,此时时频平面上的噪点已经被很好地消除.再进一步将图 3(b) 转化为二值图像如图 3(c) 所示,图中黑色代表 1,白色背景代表 0.在此基础上,提取到的曲线骨

架如图 3(d) 所示。

对图 3(d) 所示的曲线骨架进行 Hough 变换,可提取到正弦曲线的频率为 15.40rad/s ,振幅为 214.6Hz .同样地,对 4 个发射阵元和 2 个接收阵元构成的 MIMO 雷达,在接收端共可分离出 8 组目标回波信号,不妨记第 m 个发射阵元和第 n 个接收阵元构成的雷达观测组为 (m, n) .对这 8 组目标回波信号去除主体多普勒频移后,采用 Hough 变换共可提取到 8 个不同的正弦曲线频率和振幅,具体结果如表 1 所示。

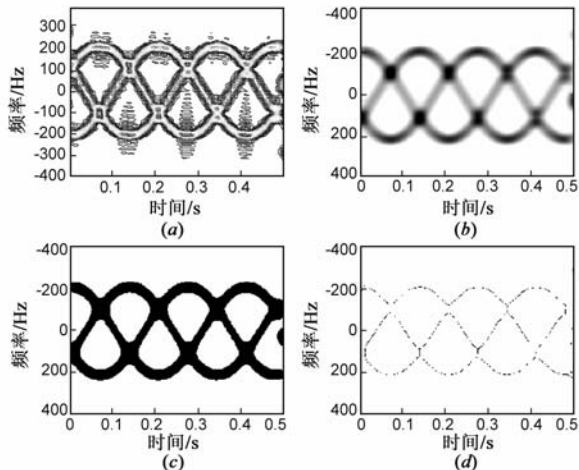


图 3 目标微多普勒信号的时频分布及其骨架提取

从表 1 中数据可以看出,提取到的曲线频率基本位于 15.39rad/s 到 15.42rad/s 之间,由于曲线的频率等于旋转散射点的旋转频率,与收发雷达的几何配置并无关系,因此可对 8 组收发雷达提取到的曲线频率值取均值,作为旋转散射点旋转频率 Ω 的估计值,计算可得 $\Omega = 15.39875\text{rad/s}$ 。

在提取曲线参数的基础上,利用式(21)建立方程组,采用 MATLAB 中的 fsolve 命令求解, $(r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}, \omega'_x, \omega'_y, \omega'_z)$ 的迭代搜索初值设为 $(-1, -1, -1, 0, 0, 0)$,可解得 $(r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}, \omega'_x, \omega'_y, \omega'_z) = (-0.1699, 0.3590, -0.5655, 0.3833, 0.8078, 0.3977)$,因此旋转散射点的旋转半径 $\|\mathbf{r}_0\| = \sqrt{r_{0x}^2 + r_{0y}^2 + r_{0z}^2} = 0.6911\text{m}$,旋转角速度矢量 $\boldsymbol{\omega} = [\Omega\omega'_x, \Omega\omega'_y, \Omega\omega'_z]^T = [5.9025, 12.4408, 6.1253]^T \text{ rad/s}$,均与理论值十分接近.这验证了本文所提方法的有效性。

4.2 鲁棒性分析

由于时频分析的分辨率限制,Hough 变换在提取时

表 1 Hough 变换提取到的正弦曲线振幅

(m, n)	(1,1)	(1,2)	(2,1)	(2,2)	(3,1)	(3,2)	(4,1)	(4,2)
振幅理论值(Hz)	213.8667	261.8331	308.3771	379.0710	406.0460	494.1058	448.8819	547.0639
实际提取到的振幅(Hz)	214.6	264.6	308.0	378.0	411.3	498.0	451.3	548.0
提取到的曲线频率(rad/s)	15.40	15.39	15.40	15.40	15.42	15.39	15.40	15.39

频平面上曲线参数时不可避免地会引入误差,而对 Ω 和 M_a 的估计误差必然会影响方程组式(21)的求解精度.为了考察和分析这种影响,我们定义误差绝对值与真实值之间的比值为归一化误差,并设误差服从高斯分布,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.为了便于分析,我们分三种情况进行仿真:

(1)假设曲线频率 Ω 被准确估计, M_a 的误差均值为 0,即为无偏估计,考察解得的旋转角速度 $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 和半径 $\|r_0\|$ 的归一化误差与 M_a 的均方差之间的关系.图 4(a)给出了 M_a 的均方差在 $[0, 20]$ 内时, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, \|r_0\|)$ 的归一化误差在 100 次仿真中平均值的变化曲线,可见 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, \|r_0\|)$ 的归一化误差基本上是随着 M_a 的均方误差的增加而线性增加.

(2)假设曲线频率 Ω 被准确估计, M_a 为有偏估计,此时可设其均方差一定,考察解得的 ω 和 $\|r_0\|$ 的归一化误差与 M_a 的误差均值之间的关系.图 4(b)给出

了 M_a 的误差均值在 $[-10, 10]$ 内、均方误差为 1 时, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, \|r_0\|)$ 的归一化误差在 100 次仿真中平均值的变化曲线,可见 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, \|r_0\|)$ 的归一化误差远比第(1)种情况下的误差小.这表明 M_a 的均方误差在一定程度上比其误差均值更为影响方程组的求解精度.

(3)假设曲线振幅 M_a 被准确估计,考察解得的 ω 和 $\|r_0\|$ 的归一化误差与 Ω 误差之间的关系.图 4(c)给出了 Ω 的误差在 $[-1, 1]$ 内时, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, \|r_0\|)$ 的归一化误差在 100 次仿真中平均值的变化曲线.由图可见, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, \|r_0\|)$ 的归一化误差基本上随着 Ω 误差的增加而线性增加.

由以上分析及图 4(a) ~ (c) 可知,方程组的求解精度受到曲线参数估计精度的制约.由于曲线频率由各组收发阵元上提取到的曲线频率取均值得到,所以其估计精度一般较高,曲线参数的估计误差主要表现为振幅的估计误差.因此,要提高曲线参数估计精度,必须进一步提高时频分析的分辨率.

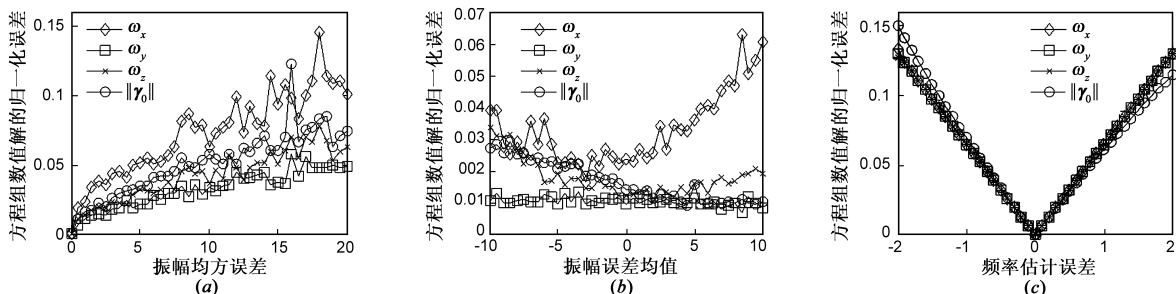


图4 鲁棒性分析

5 结论

雷达目标的三维微动特征提取对于目标精确识别具有重要意义,但相关研究工作目前尚未见报道.本文将 MIMO 技术引入雷达目标微多普勒效应研究,利用 MIMO 雷达的多视角特性求解目标微动部件的三维运动参数,为获取目标三维微动特征提供了一条思路.本文仅针对旋转形式的微动展开了研究,对于其他形式的微动,如弹头目标的进动和章动等,由于其微动特征远比匀速旋转复杂,对其中间变量和特征参数的估计更为困难,因此相关的研究工作还有待进一步的深入开展.

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.
 Zhang Zhao-wen, Liu Yong-xiang, Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 520-525. (in Chinese)
 [2] Chen V C. Analysis of radar micro-Doppler signature with

time-frequency transform[A]. Proceedings on Statistical Signal and Array Processing [C]. Pocono Manor, PA, USA: IEEE Press, 2000. 463-466.
 [3] Chen V C, Li F. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 271-276.
 [4] 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.
 [5] Li J, Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 284-291.
 [6] Bai Xueru, Xing Mengdao, Zhou Feng, et al. Imaging of micro-motion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3514-3523.
 [7] Zhang Q, Yeo T S, Tan H S, 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.
 [8] 高红卫,谢良贵,文树梁,等.加速度对微多普勒的影响及

- 其补偿研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 705 - 711.
- Gao Hong-wei, Xie Liang-gui, Wen Shu-liang, et al. Research on the influence of acceleration on micro-Doppler and its compensation[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2): 705 - 711. (in Chinese)
- [9] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. MIMO radar: An idea whose time has come[A]. Proceeding of the IEEE Radar Conference[C]. Philadelphia, PA, USA: IEEE Press, 2004. 71 - 78.
- [10] 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, Liu Bo. MIMO radar and its technical characteristic analyses[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12A): 2441 - 2445. (in Chinese)
- [11] 周生华, 刘宏伟. MIMO 雷达目标空间和频率散射多样性研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 38 - 42.
- Zhou Sheng-hua, Liu Hong-wei. Scattering properties of spatial and frequency diversity of MIMO radar targets[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(1): 38 - 42. (in Chinese)
- [12] 秦国栋, 陈伯孝, 陈多芳, 等. 双基地多载频 MIMO 雷达目标运动参数估计[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(4): 799 - 803.
- Qin Guo-dong, Chen Bai-xiao, Chen Duo-fang, et al. Movement parameter estimation of targets in bistatic multi-frequency MIMO radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(4): 799 - 803. (in Chinese)
- [13] 章毓晋. 图像工程(上册)——图像处理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 267 - 268.

- [14] Hough P V C. Method and Means for Recognizing Complex Patterns[P]. U S Patent: 3,069,654, Dec 1962.
- [15] 罗迎, 张群, 柏又青, 等. 线性调频步进信号雷达微多普勒效应分析及目标特征提取[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2741 - 2746.
- Luo Ying, Zhang Qun, Bai You-qing, et al. Analysis of micro-Doppler effect and feature extraction of target in frequency-stepped chirp signal radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2741 - 2746. (in Chinese)

作者简介



罗 迎 男, 1984 年出生于湖南益阳, 现为空军工程大学电讯工程学院博士生, 已在《IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing》、《电子学报》等国内外学术期刊和会议录上发表和录用论文 40 余篇. 研究方向: 雷达成像与目标识别.

E-mail: luoying2002521@163.com



张 群 男, 1964 年出生于陕西合阳, 现为空军工程大学电讯工程学院教授、博士生导师, IEEE Senior Member、中国电子学会无线电定位技术分会委员. 发表学术论文 100 余篇, 其中 SCI、EI 检索 60 余篇次. 研究方向: 雷达信号处理、雷达成像和电子对抗.

E-mail: zhangqunnus@gmail.com