

基于组网雷达的有翼弹道目标三维成像

冯存前 陈蓉* 黄大荣 许旭光
(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

摘要: 组网雷达的多视角特性有利于获取目标的真实空间结构。该文在构建有翼进动目标回波模型的基础上, 分析不同类型散射中心的微多普勒信息变化率的变化趋势, 对微多普勒信息进行分离提取。利用非线性最小二乘拟合获取散射中心的幅度、相位信息。基于微动特征的不变性, 利用多部雷达锥顶散射中心的幅度信息估计微动特征和坐标转换参数。然后根据各散射中心在不同视角上投影分量的差异, 实现尾翼散射中心的匹配, 之后求解散射中心的瞬时空间位置, 实现目标重构。仿真验证了算法的有效性, 并分析了微动参数和信噪比对重构结果的影响。

关键词: 组网雷达; 有翼进动目标; 散射中心匹配; 3 维成像

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)03-0517-08

DOI: 10.11999/JEIT170481

Three-dimensional Imaging of Ballistic Targets with Vanes Based on Netted Radar

FENG Cunqian CHEN Rong HUANG Darong XU Xuguang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The multi-angle characteristic of netted radar is helpful in obtaining the actual space structure of ballistic targets. In this paper, the echo model for precession targets with vanes is established. Based on the model, the rate of change of micro-Doppler for different scattering centers are analyzed, and the micro-Doppler information is extracted. Then the nonlinear least-square fitting is introduced to obtain the amplitude and phase information of scattering centers. Amplitude information of scattering centers at the conical point obtained from radars is used to estimate micro-motion characteristics and parameters of coordinate transformation. According to the distinctions among different projection components of scattering centers under different perspectives, scattering centers of fins are matched, and the instantaneous space coordinates are calculated to reconstruct the targets. Finally, simulations verify the effectiveness of the proposed method, and the influence of micro-motion parameters and SNR (Signal to Noise Ratio) on reconstruction results are analyzed.

Key words: Netted radar; Ballistic targets with vanes; Scattering centers matching; 3-D imaging

1 引言

弹道目标识别是防空反导作战的关键。已有研究表明, 通过利用弹道中段目标的自旋、进动等微动导致的多个回波积累期间目标相对于雷达转角的变化, 无论是窄带单基雷达还是宽带单基雷达都可以获取目标的 2 维像或 3 维像, 但受限于雷达视线的单一性, 该 2 维像或 3 维像都难以真实反映目标的空间结构。对组网雷达系统而言, 各雷达从不同视角对目标进行观测, 利用各雷达获得的微动特征, 根据各散射中心在不同位置雷达上投影分量的差异, 有望重构出目标的真实 3 维结构特征并实现定

标, 获取目标的精细结构^[1-5]。因此, 组网雷达的目标 3 维重构技术具有很高的研究价值和应用前景。

弹道目标微多普勒信号参数与散射中心的 3 维空间位置密切相关, 这为组网条件下弹道目标的 3 维成像提供了依据。文献[5]基于时频分布和广义 Radon 变换, 提取目标散射中心的时频多普勒曲线参数, 在参数空间内实现目标散射中心的 2 维重构。文献[6]提出一种基于匹配追踪的稀疏分解成像算法, 实现了自旋目标的 2 维成像。上述方法均采用旋转对称模型, 运动形式较为简单。文献[7]利用微动特征在不同雷达下不变的特性实现同一散射中心的关联, 在此基础上得到非对称自旋目标的 3 维像。有尾翼的进动弹道目标在空间中采用自旋与锥旋的复合运动形式, 运动模型更为复杂, 文献[1]基于复数经验模式分解, 实现了重构主体及非旋转对称部

收稿日期: 2017-05-18; 改回日期: 2017-11-27; 网络出版: 2017-12-27

*通信作者: 陈蓉 cr_task@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61372166)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61372166)

件的回波分离, 但仅获取导弹主体的2维像, 丢失了目标的空间结构。文献[8]通过构建相位补偿因子, 使得时间-距离像上的所有数据同相叠加, 实现目标3维成像。以上研究为组网雷达下有翼进动目标3维重构的实现提供可能。

对复杂目标而言, 对多个视角观测得到的距离像进行散射中心匹配是一项复杂而具有挑战性的问题, 但对弹道目标而言, 由于其等效散射中心数目少、且运动模式已知, 其散射中心匹配的复杂程度有所降低。文献[9]根据多普勒变化率的变化趋势, 对时频谱中各点的最近领域进行多尺度编码, 实现多普勒信息的分离与提取。本文在文献[9]的基础上, 分离出锥顶散射中心与尾翼散射中心对应的微多普勒信息, 估计得到目标的自旋频率和锥旋频率, 并通过非线性最小二乘拟合求得散射中心对应的幅度、相位信息。然后对多个雷达观测到的锥顶散射中心进行匹配, 通过多视角下同一时刻目标的幅度信息估计目标的微动特征及坐标转换参数, 在此基础上, 对尾翼散射中心对应的微多普勒信息进行匹配, 进而解算出目标各散射中心的瞬时空间位置, 得到目标的3维像。

2 有翼目标微多普勒效应分析

如图1所示, 有尾翼弹道目标旋转中心为 O , 以 O 为原点建立参考坐标系 $O-XYZ$, 锥体目标绕对称轴 Oz 轴以角速度 ω_s 自旋, 绕进动轴 ON 以角速度 ω_c 自旋, 其中目标的本体坐标系为 $O-xyz$, β 为本体坐标系相对于参考坐标系的欧拉角。进动轴 ON 在参考坐标系 $O-XYZ$ 的方位角和俯仰角分别为 α_c 和 β_c 。雷达视线LOS在参考坐标系中的方位角和高低角分别为 (α_L, β_L) 。 ψ_g 为雷达视线方向与目标自旋轴夹角, g 表示雷达的序号。

有尾翼进动目标的散射中心可等效为锥顶强散

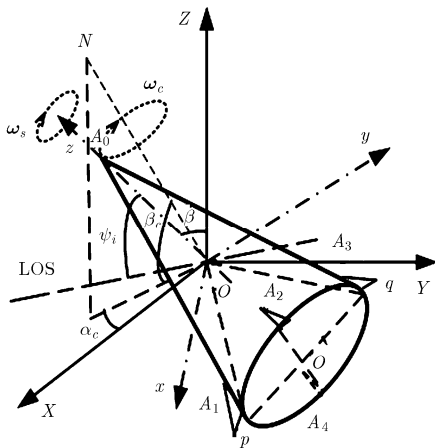


图1 有尾翼弹道目标进动模型

射中心 A_0 , 尾翼强散射中心 A_1, A_2, A_3, A_4 , 以及锥底滑动散射中心 p, q 。弹头自旋轴与锥旋轴的夹角为进动角 θ 。锥顶强散射中心 A_0 与旋转中心 O 的距离为 h_s , 旋转中心 O 到锥底的距离为 h , 锥底半径为 r 。

则在参考坐标系下, 锥旋轴 ON 的单位向量 e_{ON} 为

$$e_{ON} = [\cos \alpha_c \cos \beta_c, \sin \alpha_c \cos \beta_c, \sin \beta_c] \quad (1)$$

目标上任意一点 l 在本体坐标系 $O-xyz$ 中的初始位置矢量为 $r_{l0} = (x_{l0}, y_{l0}, z_{l0})$, 则 t 时刻 l 点在参考坐标系中的位置矢量为

$$r_l = T_c T_s R_{\text{mit}} \cdot r_{l0} \quad (2)$$

其中, R_{mit} 为初始欧拉旋转矩阵^[8], T_s 和 T_c 分别为弹头的自旋和锥旋矩阵, 具体表示为

$$T_s = I + \hat{e}_s \sin \omega_s t + \hat{e}_s^2 (1 - \cos \omega_s t) \quad (3)$$

$$T_c = I + \hat{e}_c \sin \omega_c t + \hat{e}_c^2 (1 - \cos \omega_c t) \quad (4)$$

其中, I 为单位矩阵, \hat{e}_c 和 \hat{e}_s 分别为 ω_c 和 ω_s 的斜对称矩阵, 且 $\omega_c = (\omega_{cX}, \omega_{cY}, \omega_{cZ})^T$, $\omega_s = (\omega_{sX}, \omega_{sY}, \omega_{sZ})^T$ 。

则 t 时刻第 l 个散射中心到雷达的距离为

$$R_l(t) = \|\mathbf{R}_g + \mathbf{r}_l(t)\| = n_g^T \cdot (\mathbf{R}_g + T_c T_s R_{\text{mit}} r_{l0}) \quad (5)$$

其中, \mathbf{R}_g 为参考坐标系坐标原点在雷达网中的位置矢量, n_g 为雷达视线方向。

假设目标的平动分量已补偿。设宽带雷达载频为 f_B , T_p 为脉冲宽度, γ 为调频率, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 为发射脉冲的序号, T_{ref} 为宽带雷达测得的参考时间。 T_r 为脉冲重复周期, $t_m = mT_r$ 是慢时间。目标的回波信号经快速傅里叶变换后将包络斜置项去除, 可得到高分辨距离像表达式:

$$s_r(f, t_m) = \sum_l \sigma_l T_p \text{sinc} \left(T_{\text{ref}} \left(f + \frac{2\gamma}{c} r_{Bl}(t_m) \right) \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_B}{c} r_{Bl}(t_m) \right\} \quad (6)$$

其中, $r_{Bl}(t_m)$ 表示宽带雷达测得的第 l 个散射中心相对于 O 点的径向距离。

则散射中心的微距离可以表示为^[10]

$$r_{Bl} \approx \mathbf{B}_{pl}(\omega) \mathbf{B}_{rl} \quad (7)$$

式中, $\omega = (\omega_c + \omega_s, \omega_c - \omega_s, \omega_c, \omega_s)$ 为频率信息, r_{Bl} 为第 l 个散射中心的多普勒信息, \mathbf{B}_{rl} , $\mathbf{B}_{pl}(\omega)$ 分别为第 l 个散射中心对应的幅度信息和相位信息。

$$\mathbf{B}_{pl}(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{O}_{4 \times 1} & \mathbf{Z}_{4 \times 1} \\ 1 & \cos \omega \Delta t & \sin \omega \Delta t \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \omega (N-1) \Delta t & \sin \omega (N-1) \Delta t \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{B}_{r_l}(\boldsymbol{\omega}) = \boldsymbol{\rho}(\Lambda), \Lambda = (\omega_c, \omega_s, \hat{\mathbf{e}}_c, \hat{\mathbf{e}}_s, \mathbf{n}_l, \mathbf{r}_l)^T \quad (9)$$

其中, N 为雷达采样次数, Δt 表示采样时间间隔, $\mathbf{O}_{4 \times 1}$ 为 4×1 的全 1 矩阵, $\mathbf{Z}_{4 \times 1}$ 为 4×1 的全零矩阵, Λ 为 \mathbf{B}_{r_l} 的参量空间。 \mathbf{B}_{r_l} 的具体表示形式参考文献[10], 幅度信息与目标进动参数、结构参数及雷达视角有关。

3 微动信息的获取

3.1 微多普勒信息的分离

在文献[9]的基础上, 本文讨论了尾翼散射中心的微多普勒信息, 并从中提取出自旋频率与锥旋频率。化简模型, 令 $\beta_c = 90^\circ$, $\beta = \theta$, 尾翼散射中心的微距离可以表示为^[11]

$$r_{A_j}(t_m) = \sum_{i=1}^4 k_{ij} \sin[\boldsymbol{\omega}(i)t_m + \varphi_{ij}] + r_0 \quad (10)$$

式中, r_0 为常量, i 为调制系数编号, $j = 1, 2, 3, 4$ 表示尾翼散射中心的序号, 调制系数 k_{ij} 与 θ 和 β_L 有关, φ_{ij} 表示尾翼散射中心微多普勒信息的相位, 与 θ , α_L 有关, k_{ij} , φ_{ij} 的具体表示形式参考文献[11]。对式(10)进行 a 次求导, 得到尾翼散射中心 A_j 的 a 阶微距离。

$$\begin{aligned} r_{A_j}^{(a)}(t_m) &= \sum_{i=1}^4 k_{ij} \omega^a(i) \cos\left(\boldsymbol{\omega}(i)t_m + \varphi_{ij} + \frac{\pi}{2}(a \bmod 4)\right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, \bmod 为取余运算符。以同类型散射中心 A_1, A_2 的 a 阶微距离的比值为例:

$$\begin{aligned} \frac{r_{A_1}^{(a)}(t_m + \Delta t)}{r_{A_2}^{(a)}(t_m)} &= \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^4 k_{i1} \omega^a(i) \cos(\boldsymbol{\omega}(i)t_m + \varphi_{i1})}{\sum_{i=1}^4 k_{i2} \omega^a(i) \cos(\boldsymbol{\omega}(i)t_m + \varphi_{i2})}, & a \bmod 4 = 0, 2 \\ \frac{\sum_{i=1}^4 k_{i1} \omega^a(i) \sin(\boldsymbol{\omega}(i)t_m + \varphi_{i1})}{\sum_{i=1}^4 k_{i2} \omega^a(i) \sin(\boldsymbol{\omega}(i)t_m + \varphi_{i2})}, & a \bmod 4 = 1, 3 \end{cases}, \Delta t \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 若 A_1, A_2 为同一散射中心, 除 $r_{A_j}^{(a)}(t_m) = 0$ 的情况外, 同一散射中心在邻近时刻的 a 阶微距离变化趋势近似不变。同类型不同散射中心的 a 阶微距离变化趋势与 $\omega^a(i)$, θ , β_L , α_L 以及散射中心在参考坐标系中的初始位置有关^[11], 且随着阶数的上升, a 阶微距离的比值逐渐趋向于定

值^[9]。

锥顶散射中心 A_0 位于自旋轴上, 仅受锥旋频率 ω_c 的调制, 散射中心 A_0 的 a 阶微距离可以表示为^[11]

$$\begin{aligned} r_{A_0}^{(a)}(t_m) &= \cos \beta \sqrt{x_{A_0}^2 + y_{A_0}^2} \omega_c^a \\ &\cdot \cos\left(\omega_c t + \varphi + \frac{\pi}{2}(a \bmod 4)\right) \end{aligned} \quad (13)$$

进一步分析同一目标不同类型散射中心的 a 阶微距离比值, 以 A_j 与 A_0 为例

$$\begin{aligned} \frac{r_{A_j}^{(a)}(t_m)}{r_{A_0}^{(a)}(t_m)} &= \sum_{i=1}^4 \frac{k_{ij}}{\cos \beta \sqrt{x_{A_0}^2 + y_{A_0}^2}} \\ &\cdot \frac{\cos(\boldsymbol{\omega}(i)t_m + \varphi_{ij}) \omega^a(i)}{\cos(\omega_c t_m + \varphi) \omega_c^a} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $\varphi = -a \tan(x_{A_0}/y_{A_0}) - \alpha$, 从式(13)可以看出不同类型的散射中心对应的 a 阶微距离比值与 $\omega^a(i)/\omega_c^a$, θ , β_L , α_L , t_m 有关。选取适当的阶数 a , 不同类型散射中心的 a 阶微距离随时间的变化趋势存在较大的差异, 而相同类型散射中心呈现较为相似的变化特性, A_j 与 p, A_0 与 q 的 a 阶微距离比值同理^[9]。可通过比较不同散射中心微多普勒曲线的变化快慢, 来实现不同散射中心微多普勒曲线的分类标记。在此基础上, 设同类型散射中心距离像信息相交的点为“交叉点”, 利用微多普勒曲线的连续性, 对同一类型散射中心的微多普勒信息从“交叉点”处进行双向搜索, 实现分离。

3.2 幅度信息获取

根据式(13), 锥旋频率 ω_c 可表示为

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_m \left| \frac{\hat{r}_{A_0}^{(a+2)}(t_m)}{\hat{r}_{A_0}^{(a)}(t_m)} \right|^2} \quad (15)$$

将 $\hat{\omega}_c$ 代入式(11), 由式(11)可知 $r_{A_j}^{(a)}(t_m)$ 中, 自旋频率 ω_s 及系数 $k_{ij} \cos(\boldsymbol{\omega}(i)t_m + \varphi_{ij})$ 未知, 取阶数 $a + 2n'$, $a > 0, n' = 1, 2, 3, 4, 5$, 根据式(11)建立方程组可求得自旋频率 $\hat{\omega}_s$ 。

根据非线性最小二乘估计方法, 散射中心的幅度信息满足

$$\mathbf{B}_{r_l} = (\mathbf{B}_{pl}^T(\hat{\boldsymbol{\omega}}) \mathbf{B}_{pl}(\hat{\boldsymbol{\omega}}))^{-1} \mathbf{B}_{pl}^T(\hat{\boldsymbol{\omega}}) \mathbf{r}_{Bl} \quad (16)$$

4 有翼进动目标 3 维成像

有翼进动目标中, 主要包括锥顶散射中心 A_0 、尾翼散射中心 A_j 的匹配。在 3.2 小节中, 通过比较不同类型散射中心的幅度信息可以实现散射中心 A_0 的匹配, 而同一视角下, 尾翼散射中心 A_j 均匀分布在锥尾, 微多普勒曲线之间仅有相位的差别, 且其相位差也均匀恒定, 因此, 在雷达组网中, 通过

微多普勒曲线的频率、幅度、曲线的 a 阶微距离并不能直接将尾翼散射中心 A_j 区分开来。为实现尾翼散射中心 A_j 的匹配, 在锥顶散射中心 A_0 已匹配的条件下, 通过不同视角下 A_0 的幅度信息估计参考坐标系与本体坐标系的转换参数, 在此基础上, 利用同一时刻散射中心在不同视角上投影分量的差异, 实现尾翼散射中心 A_j 的匹配。

4.1 目标进动参数和结构参数解算

经化简, t_0 时刻 A_0 关于相位信息 $B_{pi}(\omega)$ 的前两个宽带雷达幅度信息可表示为

$$\left. \begin{aligned} \widehat{B}_{r_{A_0g}}(1) &= \mathbf{r}_{A_0g}^T (\mathbf{I} + \widehat{\mathbf{e}}_c^2)^T \mathbf{n}_g \\ \widehat{B}_{r_{A_0g}}(2) &= \mathbf{r}_{A_0g}^T (\widehat{\mathbf{e}}_c^2)^T \mathbf{n}_g \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中, $\mathbf{r}_{A_0g} = \mathbf{T}_c \mathbf{R}_{\text{mit}} \cdot (0, 0, h_s)^T$, 则式(17)中包含 4 个未知参量 $\alpha_c, \beta_c, \beta, h_s$, 选同一时刻的两部雷达观测到的幅度信息构成非线性方程组, 利用区间迭代法可解得对应参量^[12]。

根据 Rodrigues 方程, 自旋矢量可以表示为

$$\boldsymbol{\omega}_s = (\omega_{xX}, \omega_{xY}, \omega_{xZ}) = \frac{\mathbf{T}_c \mathbf{T}_s \mathbf{R}_{\text{mit}} \cdot (0, 0, \widehat{\omega}_s)^T}{\|\mathbf{T}_c \mathbf{T}_s \mathbf{R}_{\text{mit}} \cdot (0, 0, \widehat{\omega}_s)^T\|} \quad (18)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}_s$ 为自旋矢量, 表示自旋轴的方向。进动角 θ 为任意时刻自旋轴与锥旋轴的夹角, 选择雷达 g

初始时刻自旋轴的方向 $\boldsymbol{\omega}_{s0g} = \frac{\mathbf{R}_{\text{mit}} \cdot (0, 0, \widehat{\omega}_s)^T}{\|\mathbf{R}_{\text{mit}} \cdot (0, 0, \widehat{\omega}_s)^T\|}$ 进

行计算^[13], 将 $\widehat{\alpha}_c, \widehat{\beta}_c$ 代入 $\widehat{\mathbf{e}}_{\text{ON}}$, 锥旋矢量为 $\widehat{\boldsymbol{\omega}}_{cg} = \widehat{\boldsymbol{\omega}}_{cg} \widehat{\mathbf{e}}_{\text{ON}}$, 则根据第 2 节模型分析,

$$\theta = \frac{1}{G} \sum_g \arccos \frac{\langle \widehat{\boldsymbol{\omega}}_{s0g}, \widehat{\boldsymbol{\omega}}_{cg} \rangle}{\|\widehat{\boldsymbol{\omega}}_{s0g}\| \cdot \|\widehat{\boldsymbol{\omega}}_{cg}\|} \quad (19)$$

其中, G 为雷达组网中宽带雷达的数量。

4.2 尾翼散射中心的匹配

本体坐标系 $O-xyz$ 中, 尾翼散射中心 A_j 在 z 轴的初始纵坐标相同, 在 x, y 轴上的坐标关于坐标原点 O 中心对称, 若设 A_1 在本体坐标系中的坐标为 $(x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1})$, 则 A_2, A_3, A_4 在本体坐标系中的坐标可以表示为 $(x_{A_1}, -y_{A_1}, z_{A_1}), (-x_{A_1}, -y_{A_1}, z_{A_1}), (-x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1})$ 。根据式(2), A_1 在参考坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标为 $(x'_{A_1}, y'_{A_1}, z'_{A_1})$, 其中 $x'_{A_1} = \mathbf{M}(1,1)x_{A_1}, y'_{A_1} = \mathbf{M}(2,2)\cos\beta y_{A_1} + \mathbf{M}(2,3)\sin\beta z_{A_1}, z'_{A_1} = \mathbf{M}(3,3)\cos\beta z_{A_1} - \mathbf{M}(3,2)\sin\beta y_{A_1}, \mathbf{M} = \mathbf{T}_c \mathbf{T}_s$ 。设雷达 1, 雷达 2 的视线方向分别为 $\mathbf{n}_1 = (a_1, b_1, c_1), \mathbf{n}_2 = (a_2, b_2, c_2)$, 尾翼散射中心 A_1, A_3 和 A_2, A_4 为均匀分布的尾翼散射中心。设时间-距离像中, t' 时刻, A_1 在雷达 1 的视线

方向上投影到 O 点的长度的最大值为 $r_{11}(t')$, 此时 A_3 在雷达 1 的视线方向上投影到 O 点的长度记为 $r_{31}(t')$, A_2, A_4 的微距离相等, 记为 $r_{21}(t')$, 为, 即 $\overline{A_2 A_4}$ 与雷达视线方向垂直。代入本体坐标系坐标, 有

$$\left. \begin{aligned} r_{11}(t') &= a_1 \mathbf{M}(1,1)x_{A_1} \\ &\quad + b_1 (\mathbf{M}(2,2)\cos\beta y_{A_1} + \mathbf{M}(2,3)\sin\beta z_{A_1}) \\ &\quad + c_1 (\mathbf{M}(3,3)\cos\beta z_{A_1} - \mathbf{M}(3,2)\sin\beta y_{A_1}) \\ r_{31}(t') &= -a_1 \mathbf{M}(1,1)x_{A_1} \\ &\quad - b_1 (\mathbf{M}(2,2)\cos\beta y_{A_1} + \mathbf{M}(2,3)\sin\beta z_{A_1}) \\ &\quad + c_1 (\mathbf{M}(3,3)\cos\beta z_{A_1} + \mathbf{M}(3,2)\sin\beta y_{A_1}) \\ r_{21}(t') &= a_1 \mathbf{M}(1,1)x_{A_1} \\ &\quad - b_1 (\mathbf{M}(2,2)\cos\beta y_{A_1} + \mathbf{M}(2,3)\sin\beta z_{A_1}) \\ &\quad + c_1 (\mathbf{M}(3,3)\cos\beta z_{A_1} + \mathbf{M}(3,2)\sin\beta y_{A_1}) \\ r_{41}(t') &= -a_1 \mathbf{M}(1,1)x_{A_1} \\ &\quad + b_1 (\mathbf{M}(2,2)\cos\beta y_{A_1} + \mathbf{M}(2,3)\sin\beta z_{A_1}) \\ &\quad + c_1 (\mathbf{M}(3,3)\cos\beta z_{A_1} - \mathbf{M}(3,2)\sin\beta y_{A_1}) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

根据式(20)可得到 t' 时刻 A_1 在本体坐标系 $O-xyz$ 中的坐标 $(x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1})$, 进一步得到 A_1 在参考坐标系中的坐标 $(x'_{A_1}, y'_{A_1}, z'_{A_1})$, 则在雷达 2 视线方向上, A_1 对应的微距离为 $r_{A_12}(t') = a_2 \widehat{x}'_{A_1} + b_2 \widehat{y}'_{A_1} + c_2 \widehat{z}'_{A_1}, r_{A_12}(t')$ 表示雷达 2 上 t' 时刻散射中心 A_1 对应的投影分量, 从而根据投影分量找出 A_1 对应的微多普勒曲线, 实现不同视角下散射中心的匹配。

4.3 位置信息解算及 3 维成像

以尾翼散射中心 A_1 为例, 将估计得到的 $\widehat{\alpha}_c, \widehat{\beta}_c, \widehat{\beta}, \widehat{h}_s, \widehat{\theta}$ 代入式(17), 根据式(2), 式(3), 式(4), 式(9)可知方程中有 3 个未知数 $x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1}$, 选取至少 3 部雷达同一时刻的微多普勒幅度信息, 可估计得到尾翼散射中心 A_1 的瞬时空间位置, 同理求得锥顶散射中心 A_0 及尾翼散射中心 A_j 的瞬时空间坐标可实现目标的重构。

综上所述, 基于组网雷达的有翼进动目标 3 维成像步骤如下:

步骤 1 获取雷达组网中 G 部雷达的回波信息得到高分辨距离像。首先对距离像信息进行高斯平滑处理转化为二值像, 然后采用骨架提取方法抑制距离像旁瓣^[12], 接着比较任一时刻 a 阶微距离的大小, 分离不同类型散射中心的微多普勒信号并进行标记, 最后用 3.1 小节方法分离同类型散射中心。

分离后的结果在交叉项处存在“模糊”, 根据分离结果, 利用同一微多普勒曲线上的其他点进行拟合, 对交叉项位置的微多普勒信息进行估计;

步骤2 根据3.2小节方法估计自旋频率 $\hat{\omega}_s$ 及锥旋频率 $\hat{\omega}_c$, 在此基础上, 根据式(8), 式(16)获取散射中心的幅度、相位信息;

步骤3 不同视角下, 根据3.2小节方法分离出锥顶散射中心并进行匹配。采用4.1小节方法, 根据同一时刻 x 部雷达获取的幅度信息及微动特征的不变性, 将 $\hat{\omega}_c$ 代入式(17)建立非线性方程组, 估计目标的进动参数 $\hat{\theta}$ 及结构参数 \hat{h}_s , 获取坐标转换参数 $\hat{\alpha}_c, \hat{\beta}_c, \hat{\beta}$;

步骤4 从雷达1的时间-距离像中获取尾翼散射中心 A_j 关于 O 点在 t' 时刻的瞬时投影距离 $\hat{r}_{A_j,1}(t')$ ^[14], 根据步骤3得到的坐标转换参数, 用4.2小节方法估计同一时刻在雷达2视角下 A_j 关于 O 点的瞬时投影距离 $\hat{r}_{A_j,2}(t')$ 。根据 $\hat{r}_{A_j,2}(t')$ 找出雷达2视角下 A_j 对应的微多普勒曲线, 实现不同视角下散射中心的匹配;

步骤5 将步骤3得到的参数代入式(9), 取至少3部雷达同一时刻关于同一散射中心的微多普勒幅度信息, 解得对应散射中心的瞬时空间位置, 实现目标的3维重建。

5 仿真分析

组网雷达中, 假设有宽带雷达3部, 发射线性调频信号, 雷达1载频为10 GHz, 脉冲重复频率为2 kHz, 脉宽为50 μ s, 带宽为2 GHz。雷达2载频为12 GHz, 脉冲重复频率为2 kHz, 脉宽为40 μ s, 带宽为3 GHz。雷达3载频为10 GHz, 脉冲重复频率为3 kHz, 脉宽为50 μ s, 带宽为2.5 GHz。在实际工程中, 为满足中段反导的需要, 采用增加脉冲重复频率的方式解决测距模糊问题已得到大量运用^[15], 因此, 本文采用多重射频的工作方式解测距模糊。进动轴ON在参考坐标系 O -XYZ的方位角和俯仰角分别为 $\alpha_c = 10^\circ$ 和 $\beta_c = 60^\circ$, 欧拉角 $\beta = 10^\circ$ 。

雷达视线方向分别为 $\mathbf{n}_1 = (1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$, $\mathbf{n}_2 = (2/3, 2/3, 1/3)$, $\mathbf{n}_3 = (1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$, 已有研究表明低信噪比条件下, 高分辨雷达测角误差可控制在 $\pm 0.3^\circ$ ^[16], 同时受骨架精度提取影响, 测角精度对重构精度的影响在本文中可忽略不计, 因此在后续仿真分析中不讨论雷达测角精度对重构结果的影响。锥高 $H = 2.4$ m, 底面半径 $r = 0.5$ m, 目标质心 O 与顶点的距离为 $h_s = 1.5$ m, 锥旋频率 $\omega_c = 4\pi$ rad/s, 自旋频率 $\omega_s = 8\pi$ rad/s, 信噪比设为0 dB。图2(a)、图2(b)、图2(c)分别为组网雷达中雷达1, 雷达2, 雷达3的时间-距离像。尾翼散射中心由于主体遮挡, 仅在半个周期内存在回波。在时间-距离像中, A_1, A_3 的连线与雷达视线相垂直时, 两散射中心的微距离相交于“交叉点”, 而此时散射中心 A_2, A_4 的连线平行于雷达视线, 以该交叉点为中心, 记该交叉点两侧 A_2, A_4 连线垂直于雷达视线的两个连续的时刻为1个周期 T_Δ , 在“交叉点”所在的周期 T_Δ 内, A_2, A_4 关于该“交叉点”中心对称, 在此基础上, 可进行拼接处理实现遮挡效应的补偿^[17], 然后提取散射中心微多普勒曲线幅度、相位信息及后续输入参数。

为详细说明提取的微多普勒信息精度, 并量化其误差对微动参数估值的影响, 引入平均相对误差概念。设预设的锥顶散射中心及4个尾翼散射中心的微多普勒信息为 $\mathbf{X}_c = (x_{A_0}, x_{A_1}, x_{A_2}, x_{A_3}, x_{A_4})$, 估计的锥顶散射中心及4个尾翼散射中心的微多普勒信息为 $\hat{\mathbf{X}}_c = (\hat{x}_{A_0}, \hat{x}_{A_1}, \hat{x}_{A_2}, \hat{x}_{A_3}, \hat{x}_{A_4})$, 则平均相对误差可以表示为

$$E(i) = \frac{\|\hat{\mathbf{X}}_c(i,:) - \mathbf{X}_c(i,:)\|}{\|\mathbf{X}_c\|} \quad (21)$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5$$

式中, $\|\bullet\|$ 为2-范数, $\hat{\mathbf{X}}_c$ 为估计值, \mathbf{X}_c 为理论值。由于在本文中, 使用到的微多普勒信息仅集中在尾翼散射中心距离徙动范围较大的时间段, 将骨架提

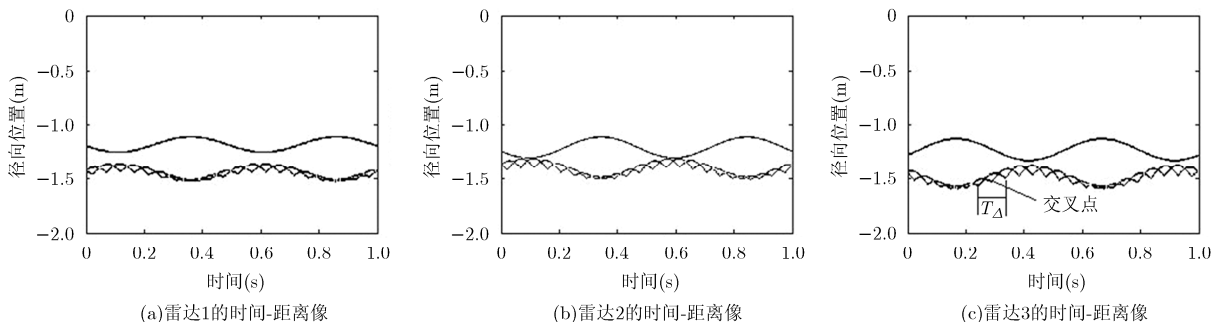


图2 组网雷达中的时间距离像

取中的断点部分计入骨架提取精度估计中,难以真实反映骨架提取进度对微动参数误差估计结果的影响,因此取尾翼散射中心距离徙动范围最大的时刻 $t_{\max} \pm 0.1$ s 内的微多普勒信息进行比较,设信噪比为 $-15 \sim 10$ dB,对雷达 1,雷达 2,雷达 3 获取的时间-距离像进行骨架提取。图 3 为信噪比为 0 dB 时对雷达 1 获取的时间距离像进行骨架提取得到的微多普勒曲线信息,图 4 为从骨架提取结果中得到的微多普勒信息点,图 5 为尾翼弹道目标的微多普勒信息在不同带宽 B 对应的平均相对误差随信噪比的变化。

从图 3、图 4 可以看出,尾翼散射中心的微多普勒曲线可以较为完整地提取出来,在微多普勒曲线交叉处提取的散射中心信息有部分模糊,4 条微多普勒曲线接近的地方存在断点。图 5 表明随着信噪比的提高,骨架提取的误差迅速下降,当信噪比大于 -5 dB,微多普勒信息的提取误差基本保持在 2%到 3%。且当雷达带宽大于 2 GHz 时,随着带宽的上升,提取精度提高。

根据 3.1 小节,分析散射中心的 a 阶微距离变化快慢程度,图 6 为 $a = 3$ 时,不同散射中心微多普勒曲线随时间变化的快慢程度。从图 6 可以看出, $a = 3$ 时,锥顶散射中心与底面边缘滑动散射中心的 a 阶微距离差距在 10^2 以上,而尾翼散射中心的 a 阶微距离远大于锥顶散射中心与底面边缘滑动散射中心,所以,根据 3.1 小节方法,3 种散射中心的微多普勒曲线可较准确地分离。在实际操作中,底面边

缘滑动散射中心的回波强度相对较弱,且在本文方法中,仅利用了锥顶散射中心 A_0 、尾翼散射中心 A_j 的微多普勒信息估计微动特征,为避免此弱信号分量对锥顶散射中心 A_0 、尾翼散射中心 A_j 的提取造成影响,在进行 4.3 小节步骤 1 处理之前,先采用基于极大值能量搜索的统计 Relax 算法估计弱目标信号并消除^[18]。

图 7 为尾翼散射中心微多普勒曲线骨架提取结果及拟合结果,对骨架提取方法在交叉项处“模糊”的部分通过拟合进行矫正。在此基础上,估计自旋频率 $\hat{\omega}_s$ 及锥旋频率 $\hat{\omega}_c$,其中,从雷达 1 获取的自旋频率 $\hat{\omega}_{s1} = 8.3133\pi$ rad/s、锥旋频率为 $\hat{\omega}_{c1} = 4.2009\pi$ rad/s,从雷达 2 获取的自旋频率 $\hat{\omega}_{s2} = 8.3029\pi$ rad/s、锥旋频率为 $\hat{\omega}_{c2} = 4.1321\pi$ rad/s,从雷达 3 获取的自旋频率 $\hat{\omega}_{s3} = 8.2989\pi$ rad/s、锥旋频率为 $\hat{\omega}_{c3} = 4.1300\pi$ rad/s,对组网雷达估计得到的参数统计平均,求得 $\hat{\omega}_c$ 、 $\hat{\omega}_s$ 与理论值的误差分别为 3.81%,3.86%。根据式(16)获取散射中心的幅度信息。表 1 为雷达 1 获取的各散射中心对应的幅度值。

由表 1 可以看出,锥顶散射中心 A_0 的幅度信息与尾翼散射中心 A_j 有较大区别,可以根据幅度信息实现散射中心 A_0 的匹配。雷达 1、雷达 2 获取的锥顶散射中心 A_0 对应的幅值信息分别为 $\hat{B}_{rA_01}(1)$ 、 $\hat{B}_{rA_01}(2)$ 、 $\hat{B}_{rA_02}(1)$ 、 $\hat{B}_{rA_02}(2)$,根据步骤 3,代入 $\hat{\omega}_c$ 建立非线性方程组,获取目标的微动特征 $\hat{\theta} = 27.98^\circ$,误差为 6.04%,结构特征 $\hat{h}_s = 1.55$ m,误差为

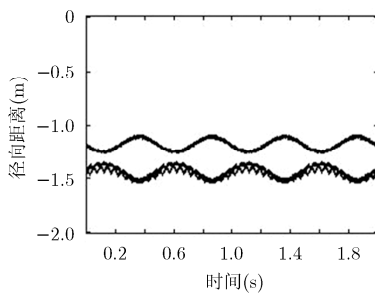


图 3 雷达 1 的骨架提取结果

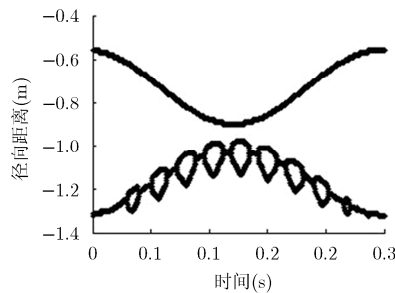


图 4 雷达 1 的时间-距离像信息点

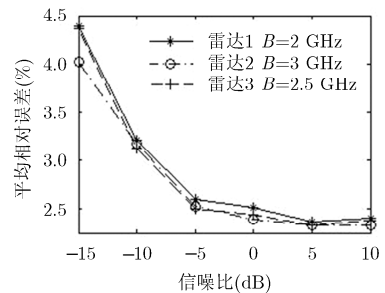


图 5 不同带宽下的平均相对误差

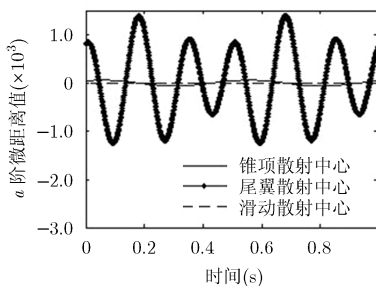
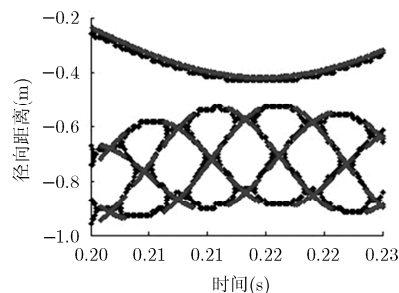
图 6 不同散射中心的 a 阶微距离

图 7 曲线“骨架”的拟合结果

表 1 雷达1获取的各散射中心对应的幅值

	$\hat{B}_{nl}(1)$	$\hat{B}_{nl}(2)$	$\hat{B}_{nl}(3)$	$\hat{B}_{nl}(4)$	$\hat{B}_{nl}(5)$	$\hat{B}_{nl}(6)$	$\hat{B}_{nl}(7)$	$\hat{B}_{nl}(8)$	$\hat{B}_{nl}(9)$
A_0	0.9017	-0.0449	0.2423	-0.2559	-0.0102	0.0014	-0.3110	0.0353	0.0070
A_1	-0.5328	-0.2411	-1.1305	1.1426	-0.1249	0.0573	0.0248	-0.1653	-0.0952
A_2	-0.5492	0.2950	0.8397	-0.8355	0.1371	-0.0591	0.3484	0.1229	0.0868
A_3	-0.5390	-0.0344	-1.6003	1.6109	0.0994	-0.2718	-0.0398	-0.2276	-0.1360
A_4	-0.5431	0.0883	1.3095	-1.3038	-0.0872	0.2700	0.4129	0.1852	0.1276

3.33%，进动轴在参考坐标中的方位角 $\hat{\alpha}_c = 10.62^\circ$ ，误差为 6.20%，俯仰角 $\hat{\beta}_c = 63.27^\circ$ ，误差为 5.45%，欧拉角 $\hat{\beta} = 10.59^\circ$ ，误差为 5.90%。在此基础上，根据步骤 4、步骤 5 代入求得的微动参数和坐标转换参数解算散射中心的瞬时空间位置，实现目标的重构。如图 8 所示，其中，空心圆指示预设的散射中心 3 维空间位置，* 指示重构的散射中心 3 维空间位置，目标散射中心 3 维坐标与预设值的平均相对误差为 5.43%。

为验证算法性能，表 2 列出了 $\alpha_c, \beta_c, \omega_s$ 均保持不变，不同微动参数及信噪比条件下参数的估计误差。

进动角 θ 的估计值由于误差的积累远大于其他参数，而 ω_c 的估计精度贯穿整个参数估计过程， ω_c

的估计精度受微多普勒曲线的提取精度限制。同时， ω_c, ω_s 以及微多普勒曲线的提取精度的越高，尾翼散射中心的匹配正确率越高。随着 β 的改变，进动角 θ 随之变化。参数的估计误差随 θ 的增大而减小，这是由于在一定范围内， θ 的增大使得散射中心在投影面上的分布范围变大，微多普勒曲线提取精度提高。 ω_c 的增大改变了进动周期及 ω_s/ω_c 的比值，随着 ω_c 增大，参数的估计误差增大。随着信噪比的上升，微动参数和结构参数的估计误差下降，在信噪比为 -5 dB 时，参数估计误差仍能控制在 10% 以内，证明了本文方法的可行性。

6 结束语

本文根据微多普勒曲线变化率的变化趋势，实现了有翼进动目标散射中心的分离及匹配，利用 3 部宽带雷达解算微动参数，实现了目标的空间重构，达到较高的精度。仿真验证了本文方法的可行性，且雷达间不需要进行相参处理^[19]，对时间同步、相位同步精度要求不高^[10]，具有广泛的适用性。实际应用中，宽带雷达主要应用于目标的精细监视与成像识别，占用信息处理资源较大，实时性不强，而窄带雷达实时性较好，探测范围较广，部署成本相对较低，如何充分发挥宽、窄带雷达的优势实现弹道目标的精确识别将是下一步研究的重点。

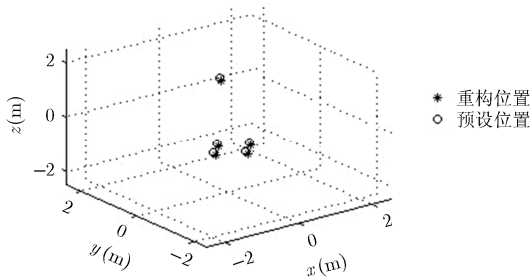


图 8 不同散射中心的 α 阶微距离

表 2 不同微动参数及信噪比条件下参数的估计误差

参数设置	SNR(dB)	-5	-5	-5	-5	0	0	0	0	5	5	5	5
ω_c (rad/s)		4π	4π	4π	6π	4π	4π	4π	6π	4π	4π	4π	6π
β (°)		-5	10	25	25	-5	10	25	25	-5	10	25	25
平均估计	ω_c	4.21	3.89	3.58	3.66	4.02	3.81	3.25	3.33	3.03	2.99	2.68	2.79
误差(%)	ω_s	4.56	4.22	4.13	4.19	4.21	3.86	3.72	3.99	3.27	3.23	3.11	3.42
	θ	7.88	6.98	7.27	8.32	7.34	6.04	6.91	7.98	7.26	6.02	6.22	7.26
	h_s	4.01	3.82	3.66	3.89	3.82	3.33	3.27	3.12	2.98	2.82	2.81	3.20

参考文献

[1] 袁斌, 徐世友, 刘洋, 等. 基于复数经验模式分解的非旋转对称空间进动目标回波分离及成像研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 1-7. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00851.
YUAN Bing, XU Shiyu, LIU Yang, et al. Echo separation

and imaging of spatial precession targets with unsymmetrical appendix parts based on CEMD[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 1-7. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00851.
[2] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟. 基于窄带雷达组网的空间锥体目标特征提取方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2956-2962. doi:

- 10.3724/SP.J.1146.2013.02037.
HAN Xun, DU Lan, and LIU Hongwei. Feature extraction of space cone-shaped target based on narrow-band radar networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(12): 2956–2962. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.02037.
- [3] 洪灵, 戴奉周, 刘宏伟, 等. 基于三维重构的空间目标进动参数估计方法[J]. *电波科学学报*, 2015, 30(2): 237–243. doi: 10.13443/j.cjors.2014051601.
- HONG Ling, DAI Fengzhou, LIU Hongwei, et al. Precession parameters estimation for space target based on 3D reconstruction[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(2): 237–243. doi: 10.13443/j.cjors.2014051601.
- [4] 胡晓伟, 童宁宁, 何兴宇, 等. 基于窄带雷达组网的高速自旋目标成像[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(4): 792–798. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.04.11.
- HU Xiaowei, TONG Ningning, HE Xingyu, et al. High-speed spinning target imaging based on narrow-band radar networks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(4): 792–798. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.04.11.
- [5] 丁小峰, 范梅梅, 魏玺章, 等. 空间进动锥体目标窄带雷达成像算法[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(6): 686–694. doi: 10.1007/s11431-010-0112-6.
- DING Xiaofeng, FAN Meimei and WEI Xizhang, et al. Narrowband imaging method for spatial precession cone-shaped targets[J]. *Science China Tech Sciences*, 2010, 40(6): 686–694. doi: 10.1007/s11431-010-0112-6.
- [6] 雷腾, 刘进忙, 李松, 等. 基于 MP 稀疏分解的弹道中段目标 ISAR 成像新方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(12): 2649–2654. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.15.
- LEI Teng, LIU Jingmang and LI Song, et al. A novel ISAR imaging method of ballistic midcourse targets based on MP sparse decomposition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(12): 2649–2654. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.15.
- [7] 梁必帅, 张群, 姜昊, 等. 基于微动特征关联的空间非对称自旋目标雷达三维成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1381–1388. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01147.
- LIANG Bishuai, ZHANG Qun, LOU Hao, et al. A method of three-dimensional imaging based on micro-motion feature association for spatial asymmetrical spinning targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1381–1388. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01147.
- [8] 胡晓伟, 童宁宁, 何兴宇, 等. 基于微动参数估计的非对称进动目标三维成像[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(3): 501–505. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.03.04.
- HU Xiaowei, TONG Ningning, HE Xingyu, et al. Three-dimensional imaging of precession targets with unsymmetrical appendixes based on micro-motion parameters estimation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(3): 501–505. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.03.04.
- [9] 李靖卿, 冯存前, 贺思三, 等. 基于最近邻域的弹道多目标分辨及 micro-Doppler 提取[J]. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45(12): 1640–1650. doi: 10.1360/N112014-00368.
- LI Jingqing, FENG Cunqian, HE Sisan, et al. Ballistic multi-target resolution and micro-Doppler extraction based on the nearest neighborhood[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2015, 45(12): 1640–1650. doi: 10.1360/N112014-00368.
- [10] 李靖卿, 冯存前, 孙宏伟, 等. 基于混合体制雷达网的弹道目标微特征及外形参数提取[J]. *航空学报*, 2016, 37(6): 1963–1973. doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0054.
- LI Jingqing, FENG Cunqian, SUN Hongwei, et al. Micro-motion feature and shape parameters extraction based on hybrid-scheme radar network for ballistic targets[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(6): 1963–1973. doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0054.
- [11] 雷腾, 刘进忙, 余付平, 等. 基于时间-距离像的弹道目标进动特征提取新方法[J]. *信号处理*, 2012, 28(1): 73–79.
- LEI Teng, LIU Jingmang, YU Fuping, et al. A new precession signature extraction method of ballistic target based on range-profile[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(1): 73–79.
- [12] 罗迎, 柏又青, 张群, 等. 弹道目标平动补偿与微多普勒特征提取方法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(3): 602–608. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00607.
- LUO Ying, BAI Youqing, ZHANG Qun, et al. Translational motion compensation and micro-Doppler feature extraction of ballistic targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 602–608. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00607.
- [13] LUO Ying, ZHANG Qun, YUAN Ning, et al. Three-dimensional precession feature extraction of space targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic System*, 2014, 50(2): 1969–1981. doi: 10.1109/TAES.2014.110545.
- [14] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 169–170.
- [15] 张有为, 李少洪. 雷达系统分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 233–236.
- [16] LI Baoguo, ZHAO Hongzhong, and FU Qiang. Research on high accuracy angle measuring technology of MMW monopulse radar[C]. *IEEE International Radar Conference*, Arlington, VA, USA, 2005: 753–756. doi: 10.1109/RADAR.2005.1435926.
- [17] 陈蓉, 冯存前, 许旭光, 等. 基于遮挡效应补偿的目标散射中心匹配[C]. 2017 全国复杂环境下雷达设计、干扰及防护学术交流大会, 北京, 2017: 409–414.
- [18] 张龙, 李亚超, 苏军海, 等. 一种统计 RELAX 方法的 ISAR 成像研究[J]. *西安电子科技大学学报*, 2010, 37(6): 1065–1070. doi: 10.3969/j.issn.1001.2400.2010.06.015.
- ZHANG Long, LI Yachao, SU Junhai, et al. Research on the ISAR imaging used statistical RELAX method[J]. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(6): 1065–1070. doi: 10.3969/j.issn.1001.2400.2010.06.015.
- [19] 冯存前, 李靖卿, 贺思三, 等. 组网雷达中弹道目标微动特征提取与识别综述[J]. *雷达学报*, 2015, 4(6): 609–620. doi: 10.12000/JR15084.
- FENG Cunqian, LI Jingqin, HE Sisan, et al. Micro-Doppler feature extraction and recognition based on netted radar for ballistic targets[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(6): 609–620. doi: 10.12000/JR15084.
- 冯存前: 男, 1975 年生, 教授, 研究方向为雷达信号处理与电子对抗.
- 陈蓉: 女, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理.
- 黄大荣: 男, 1988 年生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理和雷达成像与目标识别.
- 许旭光: 男, 1994 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理.