

空间旋转目标窄带雷达干涉式三维成像与微动特征提取

胡健^{*①②} 罗迎^{①③④} 张群^{①③④} 康乐^{①③} 何其芳^{①⑤}

^①(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

^②(95633部队 邛崃 611531)

^③(信息感知技术协同创新中心 西安 710077)

^④(复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室 上海 200433)

^⑤(93534部队 天津 301700)

摘要: 该文根据干涉式逆合成孔径雷达(InISAR)中多天线干涉处理的思想,提出一种基于L型3天线模型的空间旋转目标3维成像与3维微动特征提取方法。将微多普勒效应理论与多天线干涉处理技术相结合,在时频面上通过Viterbi算法分离散射点并进行干涉处理获取目标在各时刻沿基线方向的2维投影坐标;根据目标微动特性,采用非迭代椭圆拟合方法重构出散射点的高度维信息,实现目标的真实3维成像,并在成像过程中提取目标的3维微动特征参数。仿真实验验证了所提方法的有效性与鲁棒性。

关键词: 窄带雷达;干涉式3维成像;空间目标;微动特征提取

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0270-08

DOI: [10.11999/JEIT180372](https://doi.org/10.11999/JEIT180372)

Three-dimensional Interferometric Imaging and Micro-motion Feature Extraction of Rotating Space Targets Based on Narrowband Radar

HU Jian^{①②} LUO Ying^{①③④} ZHANG Qun^{①③④} KANG Le^{①③} He Qifang^{①⑤}

^①(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

^②(95633 PLA Troop, Qionglai 611531, China)

^③(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xi'an 710077, China)

^④(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China)

^⑤(93534 PLA Troop, Tianjin 301700, China)

Abstract: Inspired by the idea of multi-antenna interferometric processing in Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar (InISAR), by utilizing an L-shaped three-antenna imaging model, a Three-Dimensional (3-D) interferometric imaging and micro-motion feature extraction method for rotating space targets is proposed. Based on the integration of micro-Doppler (m-D) effect theory and multi-antenna interferometry processing technology, the m-D curves corresponding to different scatterers are obtained on the time-frequency plane and separated via Viterbi algorithm effectively, and then the projected coordinates of scatterers along the direction of baselines are reconstructed by interferometric processing. The height information of scatterers is solved by ellipse fitting, and 3-D imaging for the rotating space target is realized. Meanwhile, some 3-D micro-motion features are exactly extracted during imaging. Simulation results validate the effectiveness and the robustness of the method.

Key words: Narrowband radar; 3-D interferometric imaging; Space target; Micro-motion feature extraction

收稿日期: 2018-04-23; 改回日期: 2018-11-01; 网络出版: 2018-11-12

*通信作者: 胡健 hujianinstar@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571457, 61471386), 陕西省青年科技新星计划项目(2016KJXX-49)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571457, 61471386), The Youth Science and Technology Nova Program of Shaanxi Province (2016KJXX-49)

1 引言

利用现代雷达信号处理技术，通过雷达成像与微动特征提取等方式可以获得空间目标的速度、外形、体积、表面物理参数等目标运动与结构特性，从而为目标识别提供丰富可靠的特征信息^[1]。目前已有的关于空间目标成像的研究多是基于宽带雷达。利用宽带雷达观测目标微动在距离像上的调制变化对雷达带宽要求很高，这对现阶段雷达系统来说实现难度较大。另外，雷达带宽较高也会带来信噪比降低的问题，对于远距离空间目标则需要更高的发射功率。实际上当前窄带雷达的应用还比较广泛，并且宽带雷达也往往工作在宽窄交替的模式下，因此研究基于窄带雷达的空间目标成像问题是有积极现实意义的。

文献[2]提出一种单距离多普勒干涉(SRDI)的方法，通过窄带雷达实现了自旋空间碎片的2维成像；文献[3]提出一种单距离匹配滤波(SRMF)的成像方法，相比于SRDI, SRMF能获得更好的分辨率，并且计算量更小。文献[4]根据空间自旋目标的窄带雷达回波特性，提出一种后向复值投影2维成像方法。2维图像获取的是目标沿雷达视线方向的特征，相比于2维图像，3维立体图像增加了目标垂直于成像平面的高度信息，是目标3维几何结构分布的体现，且对目标姿态的变化不敏感，能为目标识别提供更加完整、稳健的结构、形状与属性信息。基于此，本文将InISAR成像^[5,6]中多天线干涉处理的思想引入到微动目标3维成像研究中，提出一种基于L型3天线结构的窄带雷达空间旋转目标干涉式3维成像与微动特征提取方法。相较于已有3维成像方法，本文的创新在于：(1)仅用单基3天线窄带雷达就重构出了空间旋转目标散射点的真实3维分布；(2)高精度获取了目标的3维微动特征。

2 目标微动特性分析

为方便描述目标相对于雷达的空间3维运动，本文建立3个坐标系。如图1所示，(X, Y, Z)为雷达坐标系，雷达静止于坐标系原点A，收发一体的天线A与接收天线B, C构成沿X轴和Z轴方向相互垂直的干涉基线，基线长度均为L。参考坐标系(U, V, W)平行于雷达坐标系，其原点O在雷达坐标系中的坐标为(X₀, Y₀, Z₀)。目标在Y轴附近，其本地坐标系为(x, y, z)，原点为目标质心O，与参考坐标系相同。目标在以速度v平动的同时，以角速度ω_r = (ω_U, ω_V, ω_W)^T绕对称轴z轴在参考坐标系中做旋转运动。

雷达发射单频信号，天线A收到目标上任一散

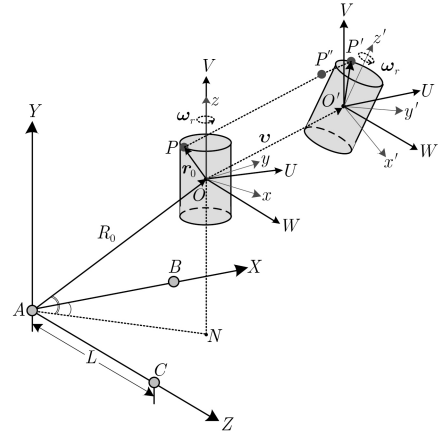


图1 目标与雷达之间的几何关系示意图

射点P的基带回波信号可写为

$$s_{Ab}(t) = \sigma_A \exp \left[j \frac{4\pi f_c}{c} r_A(t) \right] \quad (1)$$

式中，σ_A为P点对应于天线A的散射系数，c为光速，f_c是发射信号载频，r_A(t)为P点到天线A的距离。经过t时间，目标由O点运动到O'点，同时散射点P由P''旋转到P'处，则P点到雷达的距离可写作

$$r_A(t) = \| \mathbf{R} + \mathbf{v}t + \mathbf{R}_r \hat{\mathbf{r}} \| \quad (2)$$

式中，R为O点到天线A的位移矢量，R_r = I + ω'_r sin(Ω_rt) + ω'_r² [1 - cos(Ω_rt)]为3维旋转矩阵，Ω_r = ||ω_r||。ω'_r = ω_r/Ω_r = (ω'_U, ω'_V, ω'_W)，ω'_r =

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega'_W & \omega'_V \\ \omega'_W & 0 & -\omega'_U \\ -\omega'_V & \omega'_U & 0 \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{r}} = (r_U, r_V, r_W)^T \text{ 为P点在}$$

参考坐标系中对应的位置向量。那么，散射点回波的多普勒频率为

$$f_{dA} = \frac{2f_c}{c} \frac{d}{dt} r_A(t) = \frac{2f_c}{c} \left[\mathbf{v} + \frac{d}{dt} (\mathbf{R}_r \hat{\mathbf{r}}) \right]^T \mathbf{n} \quad (3)$$

其中，n为雷达视线方向的单位向量。式(3)右边第1项为由目标平动引起的多普勒频率，第2项为由散射点旋转引起的微多普勒频率，即

$$\begin{aligned} f_{m-DA} &= \frac{2f_c}{c} \left[\frac{d}{dt} (\mathbf{R}_r \hat{\mathbf{r}}) \right]^T \mathbf{n} \\ &= \frac{2\Omega_r f_c}{c} \left\{ [\hat{\omega}'_r{}^2 \sin(\Omega_r t) + \hat{\omega}'_r \cos(\Omega_r t)] \hat{\mathbf{r}} \right\}^T \mathbf{n} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)就是散射点旋转运动的引起的微多普勒效应的解析表达式，可以看出，旋转运动的微多普勒频率是时变的，其变化规律表现为正(余)弦曲线形式。

3 时变2维成像

与A天线类似, B天线接收到的散射点P的基带回波信号可写为

$$s_{Bb}(t) = \sigma_B \exp \left\{ j \frac{2\pi f_c}{c} [r_A(t) + r_B(t)] \right\} \quad (5)$$

式中, σ_B 为P点对应于天线B的散射系数, $r_B(t)$ 为P点到天线B的距离。对A, B天线接收到的散射点P的基带回波信号进行干涉有

$$\begin{aligned} s_{Ab}^*(t) s_{Bb}(t) &= \sigma_A^* \sigma_B \exp \left\{ j \frac{2\pi f_c}{c} [r_A(t) - r_B(t)] \right\} \\ &= \sigma_A^* \sigma_B \exp [j \Delta \varphi_{AB}(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\Delta \varphi_{AB}(t)$ 为A, B天线回波间的相位差。在远场近似条件下, 根据目标与雷达之间的几何关系有^[5]

$$\Delta \varphi_{AB}(t) \approx \frac{2\pi}{\lambda_c} L \frac{x(t)}{R_0} \quad (7)$$

式中, λ_c 为发射信号的波长, $x(t)$ 为散射点在参考坐标系下x维的实时坐标, R_0 为参考坐标系原点O到天线A的距离。则P点的x维坐标可写为

$$x(t) = \frac{\lambda_c R_0 \Delta \varphi_{AB}(t)}{2\pi L} + \frac{L}{2} \quad (8)$$

由于B, C天线是对称配置, 所以对A, C天线接收回波进行干涉可得P点的z维坐标为

$$z(t) = \frac{\lambda_c R_0 \Delta \varphi_{AC}(t)}{2\pi L} + \frac{L}{2} \quad (9)$$

其中, $\Delta \varphi_{AC}(t)$ 是A, C天线回波间的相位差。式(8), 式(9)中 $L/2$ 项的存在是为了将相对于基线中点电轴的坐标校正为雷达坐标系的坐标, 事实上, 这种整体的偏移并不影响目标散射点的相对几何位置, 可以不予考虑。另外, 需要注意的是, 由于相位差是以 2π 为周期, 所以应使得 $x(t), z(t) \in \left[-\frac{\lambda_c R_0}{2L}, \frac{\lambda_c R_0}{2L} \right]$ 以避免模糊。

根据式(8), 式(9)不难发现, 干涉成像的关键在于有效获取各散射点对应的相位差 $\Delta \varphi_{AB}(t)$ 与

$\Delta \varphi_{AC}(t)$ 。实际情况中, 目标上不止有一个散射点, 直接进行干涉散射点无法各自区别, 而只有对各散射点对应的回波分别进行干涉才能获得正确可用的相位差, 因此在干涉之前必须要进行散射点保相分离。窄带雷达不能像InISAR那样利用ISAR像的方位向高分辨来区别同一个距离单元的散射点^[7], 但是对于微动目标, 可以根据其微动特性差异来实现散射点分离。在窄带雷达中, 目标的时变微多普勒信号局限在其所在距离单元内, 无法直接通过传统的傅里叶分析方法观测微多普勒频率随时间的变化情况, 此时需要采用高分辨的时频分析方法来进行处理。

Gabor变换是一种稳健常用的线性类时频分析方法, 当目标散射点较多时, 非线性时频分布由于交叉项的干扰导致聚焦性能下降, 而Gabor变换能表现出较好的时频聚焦性能, 特别是Gabor变换不受交叉项影响, 不会破坏信号用于干涉的相位信息, 是实际应用中的首选。如图2所示, 在距离-多普勒域抽取目标所在距离单元的回波进行Gabor变换即可清晰地观测到散射点的微动变化。当有多个散射点时, 目标回波是各散射点子回波的和, 回波时频分析结果也是各子回波时频分析的和^[8]。如图2(b)所示, 多个微动散射点的回波在时频域表现为多条微多普勒曲线, 各散射点对应不同的曲线。所以, 在窄带雷达中可以在时频域通过微多普勒曲线分离来进行散射点分辨。本文采用信号隐状态估计的Viterbi算法, 通过估计瞬时频率的方式在时频域实现曲线分离。

以A天线接收回波的时频分析结果 $S_{AGabor}(t, f)$ 为例, 其最小频率估计路径可写为

$$\hat{k}(n) = \arg \left\{ \min_{k(n) \in K} \left[\sum_{n=1}^{N-1} h(k(n), k(n+1)) + \sum_{n=1}^N g(S_{AGabor}(n, k(n))) \right] \right\} \quad (10)$$

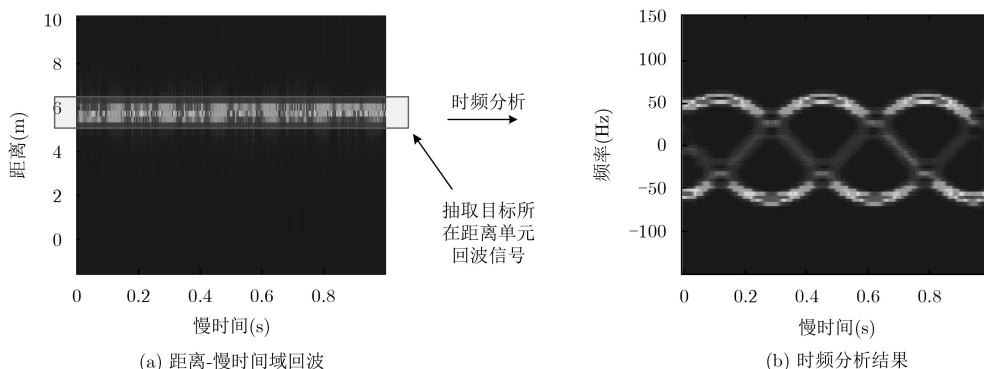


图2 窄带雷达中自旋目标微多普勒信号分析示意图

其中, N 表示采样点数, $h(k(n), k(n+1)) = h(|k(n) - k(n+1)|)$ 是对 $|k(n) - k(n+1)|$ 的惩罚函数, 表征相邻离散时刻瞬时频率的变化程度, $g(\cdot)$ 是定义在 $S_{AGabor}(n, k(n))$ 上用来表征频点重要程度的惩罚函数。根据式(10)即可在时频面上依次抽取出各散射点对应的曲线路径, 从而完成散射点分离。需要注意的是, 当存在多个散射点时, 其对应的微多普勒曲线可能相交, 交点处的相位值是几个散射点相位值的和, 无法分辨, 所以为了避免干涉错误, 应将交点剔除。

经过Gabor变换, 完成了散射点分离以后, 在时频域对天线 A, B 回波进行干涉有

$$\Delta\varphi_{AB}(t) = \text{angle}[S_{AGabor}^*(t, f) \cdot S_{BGabor}(t, f)] \quad (11)$$

同理, 在时频域对天线 A, C 回波进行干涉有

$$\Delta\varphi_{AC}(t) = \text{angle}[S_{AGabor}^*(t, f) \cdot S_{CGabor}(t, f)] \quad (12)$$

其中, $\text{angle}[\cdot]$ 表示取干涉相位差的弧度值, $S_{BGabor}(t, f)$ 和 $S_{CGabor}(t, f)$ 分别表示天线 B, C 所接收回波的Gabor变换结果。将式(11)、式(12)解出的相位差分别代入式(8)、式(9)就可以解出散射点在各个时刻沿基线 AB 和 AC 方向的坐标, 即实现了目标的时变2维成像。

4 高度维成像与微动特征提取

假设 $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$, 此时式(4)可重写为

$$\begin{aligned} f_{m-DA} &= \frac{2\Omega_r f_c}{c} \left\{ \left[\hat{\omega}'_r \sin(\Omega_r t) + \hat{\omega}'_r \cos(\Omega_r t) \right] \hat{\mathbf{r}} \right\}^T \mathbf{n} \\ &= \frac{2\Omega_r f_c}{c} \sqrt{A_M^2 + B_M^2} \sin(\Omega_r t + \phi) \end{aligned} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{aligned} \phi &= \arctan(A_M/B_M) \\ A_M &= -n_x r_V \omega'_W + n_x r_W \omega'_V + n_y r_U \omega'_W \\ &\quad - n_y r_W \omega'_U - n_z r_U \omega'_V + n_z r_V \omega'_U \\ B_M &= -n_x r_U \omega'_W^2 - n_x r_U \omega'_V^2 + n_x r_V \omega'_U \omega'_W \\ &\quad + n_x r_W \omega'_U \omega'_W + n_y r_U \omega'_U \omega'_V - n_y r_V \omega'_W^2 \\ &\quad - n_y r_V \omega'_U^2 + n_y r_W \omega'_V \omega'_W + n_z r_U \omega'_U \omega'_W \\ &\quad + n_z r_V \omega'_V \omega'_W - n_z r_W \omega'_V^2 - n_z r_W \omega'_U^2 \end{aligned} \quad (14)$$

式(13)中, $M_a = 2\Omega_r f_c \sqrt{A_M^2 + B_M^2}/c$ 为散射点旋转所引起的微多普勒频率的振幅, 其由 $f_c, \Omega_r, \hat{\omega}'_r, \hat{\mathbf{r}}$ 和 \mathbf{n} 共同决定。向量 $\hat{\mathbf{r}} = (r_U, r_V, r_W)^T$ 包含着散射点在参考坐标系中的3维坐标信息, 据第3节分析可以发现, 通过干涉处理获取的是散射点在参考坐标系中沿基线方向的坐标, 也就是 $r_U = x, r_W = z$, 而要实现散射点3维成像, 还需要解算其高度维信息 r_V 。其实, 当确定雷达与目标之间的相对位置

后, 雷达视线方向 \mathbf{n} 已知, 而幅度 M_a 与旋转角速度 Ω_r 可以通过Hough变换^[9]精确地从微多普勒频谱中提取出来, 所以此时只要能获得旋转角速度单位向量 $\hat{\omega}'_r$, 就能够从 M_a 中解出 r_V , 从而实现散射点高度维成像。

散射点 P 绕目标对称轴旋转, 其运动轨迹是一个圆, 为方便起见, 记 $X-Z$ 平面为 α 平面, 轨迹圆所在平面为 β 平面, 两平面之间的关系如图3所示, 其中, FD 是轨迹圆上任意一条直径, J 和 H 分别为点 F 和 D 在 α 平面上的投影, GE 是与 FD 垂直的另一条直径。可以证明, 轨迹圆 $FGDE$ 在 α 平面上的投影 $JGHE$ 是一个长轴 $GE = 2a$, 短轴 $JH = 2b$ 的椭圆。当实现了时变2维成像以后, 即获得了散射点在 α 平面上各个时刻的投影, 基于这些投影点通过椭圆拟合的方法可以解出 $JGHE$ 的一般表达式。根据文献^[10]提出的非迭代方法, 假设拟合出的椭圆 $JGHE$ 的方程为 $Ax^2 + Bxz + Cz^2 + Dx + Ez + 1 = 0$, 那么该椭圆的长轴倾角和几何中心可分别写作

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \frac{B}{A - C} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} X_c &= \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ Z_c &= \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

据此可以解算出椭圆的长短半轴分别为

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= \frac{2(AX_c^2 + CZ_c^2 + BX_cZ_c - 1)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \\ b^2 &= \frac{2(AX_c^2 + CZ_c^2 + BX_cZ_c - 1)}{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

如图3所示, 假设角速度 ω_r 的方位角与俯仰角分别为 φ 和 η , 则有 $\hat{\omega}'_r = [\cos \eta \cos \varphi, \sin \eta, \cos \eta \sin \varphi]$ 。由于椭圆长短轴相互垂直, 根据式(15)可以解出方位角 φ 。因为 $\hat{\omega}'_r$ 必然与 β 平面垂直, 所以 $O'H$ 与 $O'D$ 之间的夹角为 $\theta = \pi/2 - \eta$, 那么 $\theta = \arccos(b/a)$, 则根据式(17)即可解出俯仰角 η 。需要注意的是,

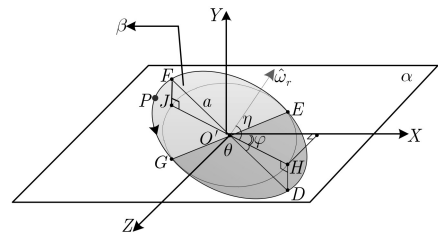


图3 散射点旋转轨迹及其在 $X-Z$ 平面上投影的对应关系

由于 $a > 0, b > 0$, 因此在区间 $(-\pi/2, \pi/2)$ 内可以解出两个 θ 值, 此时要根据散射点微动与微多普勒频率之间的关系来确定正确的俯仰角。有了方位角 φ 和俯仰角 η , 可以解出 $\hat{\omega}_r$, 进而即可通过 Hough 变换提取到的幅度值 M_a 求解 r_V 实现高度维成像。至此, 各散射点在各个时刻的 3 维坐标都已解出, 也即完成了目标的真实 3 维成像。另外不难发现, 除了在成像过程中提取到的散射点微多普勒信息, 所求解的长半轴值 a 也就是散射点的旋转半径, 同时根据提取到的 Ω , 还可以解出目标的 3 维旋转角速度, 从而实现目标的 3 维微动特征提取。

5 仿真分析

5.1 有效性验证

为了验证所提方法的有效性, 进行以下仿真实验, 参数设置如下: 载频 $f_c = 1 \text{ GHz}$, $\text{PRF} = 2000 \text{ Hz}$,

雷达照射目标 2 s , 目标在雷达坐标系中的位置为 $(0, 500, 0) \text{ km}$, 基线长度 $L = 150 \text{ m}$, 目标在雷达坐标系中的旋转角速度为 $(2\pi, 2\pi, 2\pi) \text{ rad/s}$, 假设目标上有两个散射点, 初始时刻散射点 1 和散射点 2 在本地坐标系中的坐标分别为 $(3.0, 1.5, 1.5) \text{ m}$ 和 $(-1.0, -0.5, -1.0) \text{ m}$ 。

图 4(a), 图 4(b) 所示为天线 A, B 接收回波所对应的时频分析结果, 直观上看两幅图像几无差别, 这是因为基线的长度远远小于目标到雷达的距离, 所以这种由天线位置造成的回波频率差异在时频域很难观察到。天线 C 回波也同样如此, 鉴于篇幅其时频图像没有给出。尽管几幅图像频率一样, 但是信号相位中包含着的各散射点的位置信息却不相同, 经过干涉处理与椭圆拟合, 重构出的散射点 3 维坐标如图 4(c)–图 4(e) 所示, 图中出现的尖峰是微多普勒曲线交点所导致的。为了平滑其不良影

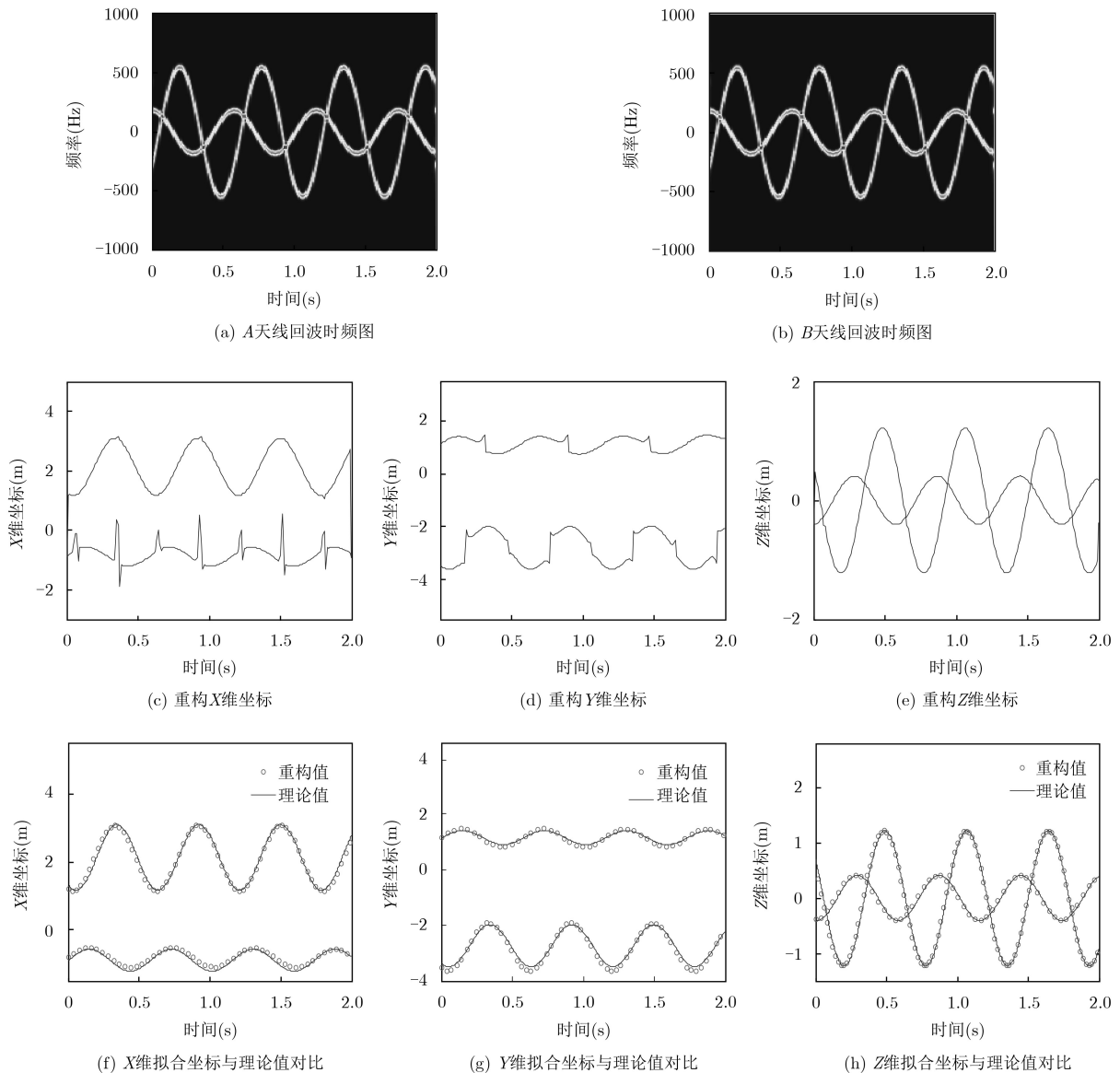


图 4 3 维干涉成像仿真结果

响，仿真中在剔除交点之后借助MATLAB曲线拟合工具箱对重构的坐标曲线进行正弦函数类拟合。如图4(f)—图4(h)所示，拟合后的曲线与散射点的理论坐标曲线非常吻合。同时，如表1所示，成像过程中还有一些有用的微动特征被提取出来，其中 M_{a_j} 与 r_j , $j = 1, 2$ 分别对应着散射点1, 2的微多普勒频率幅度与旋转半径，定义绝对误差 $\rho = \|\hat{Y} - Y\|$ 用以分析参数估计性能，其中 \hat{Y} 表示估计值， Y 表示理论值。以上结果表明，本文所提空间旋转目标

窄带雷达干涉式3维成像与微动特征提取算法可行有效，并且具有较高的精度。

5.2 鲁棒性验证

为了验证所提方法的鲁棒性，在回波中加入高斯噪声进行实验。同时，由于散射点分离是成像算法的关键，因此仿真中还增加了散射点数目来进一步验证，假设初始时刻散射点3, 4在本地坐标系中的坐标分别为 $(-3.0, -2.0, -3.0)$ m和 $(0.3, -0.5, 0.3)$ m。图5给出了信噪比SNR = 5 dB时的仿真结果，图5(a)

表 1 3维微动特征提取结果与估计误差

参数	M_{a1} (Hz)	M_{a2} (Hz)	Ω_r (rad/s)	r_1 (m)	r_2 (m)	ω_r (rad/s)
理论值	546.3059	182.1020	10.8828	3.6742	1.5000	[6.6908, -8.5830, -0.0121]
估计值	546.2000	182.4000	10.8900	3.6786	1.4166	[6.6980, -8.5774, -0.0151]
绝对误差	0.1059	0.2980	0.0072	0.0044	0.0834	0.0287

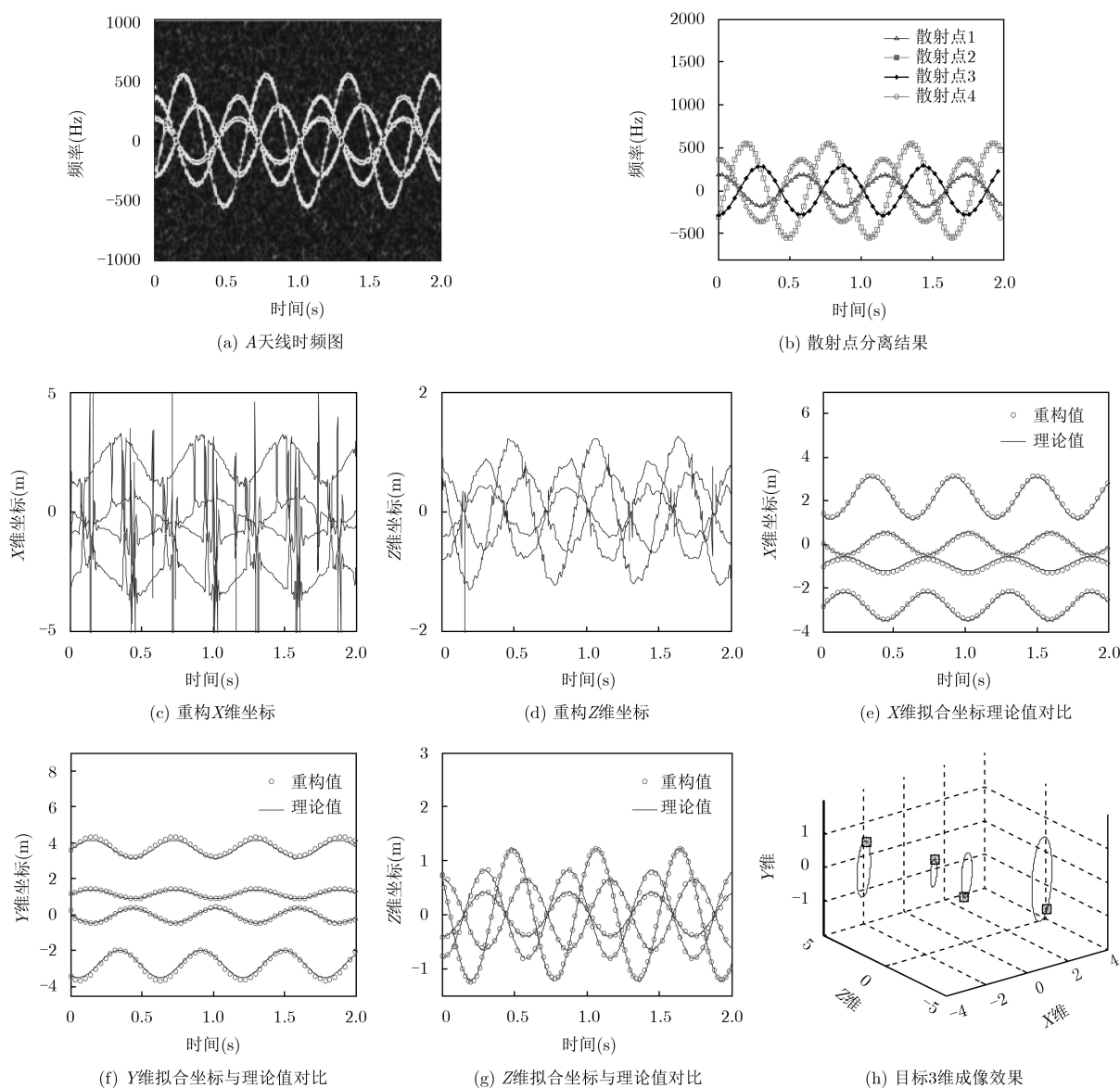


图 5 SNR = 5 dB时的3维干涉成像仿真结果

所示为4天线接收回波的时频图,可以看到明显的噪声污染,但是如图5(b)所示,得益于Viterbi算法的优越性能,此时依然能够准确地提取出各微多普勒曲线的路径从而实现散射点分离。经过干涉处理即可获得各散射点沿两基线方向的坐标,如图5(c),5(d)所示,可见重构的2维平面坐标都有不同程度的波动,这是噪声对相位的影响造成的。由于高度维坐标是基于重构的2维坐标来解算的,经过误差累积,其将出现更大程度的波动。为了消除误差影响,在实现2维成像以后即采用曲线拟合的方式对波动进行平滑,然后根据平滑后的结果求解散射点高度维信息,图5(e)–图5(g)所示为最终重构的散射点3维坐标曲线与其理论坐标曲线的对比,图5(h)给出了目标散射点的3维成像结果及其在 $t = 0.5$ s时所成的像,其中星标所示为重构值,方框所示为理论值,以上结果都表明在噪声条件下本文所提方法也能表现出较好的性能。为了方便分析,图6给出了不同信噪比下微动参数估计的绝对误差,可以看到(为了清楚,只给出了散射点1,2的幅度和旋转半径的估计误差),在 $\text{SNR} = 0$ dB时部分特征的估计出现了巨大的误差,这是因为此时回波信号的相位信息已经被噪声破坏;但是当 $\text{SNR} \geq 5$ dB时本文方法都能获得较好的特征提取结果。

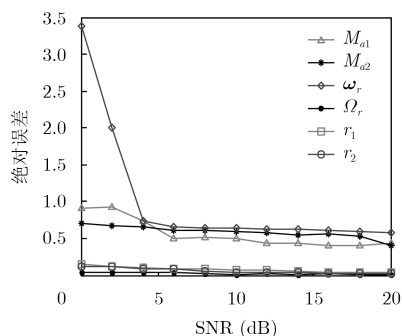


图6 不同信噪比下的微动特征提取绝对误差

6 结束语

本文将InISAR中多天线干涉处理的思想引入到空间目标3维成像中,基于L型3天线窄带雷达,结合目标微多普勒特性,提出一种空间旋转目标干涉式3维成像与3维微动特征提取方法。首先建模分析了空间旋转目标的微动特性,然后通过在时频面上进行干涉处理获取目标散射点沿基线方向的投影坐标,最后利用椭圆拟合的方法解算出散射点的高度维坐标,同时提取了目标的3维微动特征,仿真实验验证了所提方法的有效性与鲁棒性。与现有的空间目标3维成像方法^[11,12]需要采用双/多基宽带雷

达体制才能实现目标的3维成像相比,所提方法仅利用单部多天线窄带雷达即可获得空间旋转目标的真实3维散射分布信息与3维微动特征,且具有较高的精度,可以明显降低系统实现的复杂度和对雷达信号带宽的要求,并为目标识别提供更丰富全面的特征信息。但是由于在高度维成像中利用了目标的旋转特性,对目标微动形式提出了要求,一定程度上限制了所提方法的应用范围,因此下一步工作将对普适的成像方法展开研究。

参考文献

- [1] ZHANG Qun, LUO Ying, and CHEN Yongan. Micro-Doppler Characteristics of Radar Targets[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016: 3–54.
- [2] SATO T. Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 1000–1005. doi: 10.1109/36.752218.
- [3] WANG Qi, XING Mengdao, LU Guangyue, et al. Single range matching filtering for space debris radar imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(4): 576–580. doi: 10.1109/LGRS.2007.903059.
- [4] BAI Xueru, SUN Guangcai, WU Qisong, et al. Narrow-band radar imaging of spinning targets[J]. *Science China (Information Science)*, 2011, 54(4): 873–883. doi: 10.1007/s11432-011-4182-2.
- [5] ZHANG Qun, YEO T S, DU Gan, et al. Estimation of three-dimensional motion parameters in interferometric ISAR Imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(2): 292–300. doi: 10.1109/TGRS.2003.815669.
- [6] MA Changzheng, YEO T S, ZHANG Qun, et al. Three-dimensional ISAR imaging based on antenna array[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 504–515. doi: 10.1109/TGRS.2007.909946.
- [7] 胡健, 罗迎, 张群, 等. 弹道目标宽带雷达干涉式三维成像与微动特征提取[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(8): 1865–1871. doi: 10.11999/JEIT161134.
- [8] HU Jian, LUO Ying, ZHANG Qun, et al. Three-dimensional interferometric imaging and micro-motion feature extraction of ballistic targets in wideband radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1865–1871. doi: 10.11999/JEIT161134.
- [9] SURESH P, THAYAPARAN T, OBULESU T, et al. Extracting micro-Doppler radar signatures from rotating targets using Fourier-Bessel transform and time-frequency analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3204–3210. doi: 10.1109/TGRS.

- 2013.2271706.
- [9] ZHANG Qun, 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. doi: [10.1109/TGRS.2007.907105](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.907105).
- [10] FITZGIBBON A, PILU M, and FISHER R B. Direct least squares fitting of ellipses[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(5): 476–480. doi: [10.1109/34.765658](https://doi.org/10.1109/34.765658).
- [11] 梁必帅, 张群, 娄昊, 等. 基于微动特征关联的空间自旋目标宽带雷达三维成像[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(9): 2133–2140. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01537](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01537).
LIANG Bishuai, ZHANG Qun, LOU Hao, *et al.* Three-dimensional broadband radar imaging of space spinning targets based on micro-motion parameter correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(9): 2133–2140. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01537](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01537).
- [12] 梁必帅, 张群, 娄昊, 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01147).
- 胡 健: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为雷达成像与雷达目标微多普勒效应.
- 罗 迎: 男, 1984年生, 副教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像与目标识别、雷达目标微多普勒效应、认知雷达.
- 张 群: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像、目标识别与电子对抗.
- 康 乐: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为雷达成像与目标识别.
- 何其芳: 女, 1993年生, 助理工程师, 研究方向为雷达信号处理与目标识别.