

弹道目标宽带雷达干涉式三维成像与微动特征提取

胡 健^{*①②} 罗 迎^{①②③} 张 群^{①②} 孙玉雪^{①②} 胡 超^①

^①(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

^②(信息感知技术协同创新中心 西安 710077)

^③(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要: 基于微多普勒效应理论的弹道目标 3 维成像与 3 维微动特征提取技术可为目标识别, 导弹防御提供重要特征信息。该文将干涉式逆合成孔径雷达(InISAR)中多天线干涉处理的思想引入到弹道目标 3 维成像与 3 维微动特征提取研究中, 将微多普勒效应理论与多天线干涉处理技术相结合, 重构出散射点在各时刻的 3 维坐标, 实现弹道目标的真实 3 维成像, 并在此基础上解算出弹道目标的微动参数与结构参数。仿真实验验证了所提方法的有效性与鲁棒性。

关键词: 宽带雷达; 弹道目标; 干涉式 3 维成像; 微动特征提取

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)08-1865-07

DOI: 10.11999/JEIT161134

Three-dimensional Interferometric Imaging and Micro-motion Feature Extraction of Ballistic Targets in Wideband Radar

HU Jian^{①②} LUO Ying^{①②③} ZHANG Qun^{①②} SUN Yuxue^{①②} HU Chao^①

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

^②(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xi'an 710077, China)

^③(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The Three-Dimensional (3-D) imaging and 3-D micro-motion feature extraction techniques for ballistic targets based on the micro-Doppler (m-D) effect theory can provide significant information for target recognition and ballistic missile defense. The idea of multi-antenna interferometry processing from Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar (InISAR) is introduced into the 3-D imaging and 3-D micro-motion feature extraction of ballistic targets in the paper. Based on the integration of m-D effect theory and multi-antenna interferometry processing technology, the true 3-D image of target is obtained. The parameters of micro-motion and target structure are extracted by utilizing the reconstructed 3-D coordinates of target. Simulations are given to validate the effectiveness and robustness of the proposed algorithm.

Key words: Wideband radar; Ballistic target; 3-D interferometric imaging; Micro-motion feature extraction

1 引言

现代战争中, 弹道导弹已经成为杀手锏武器, 也是实现高精度中远程打击的主导武器, 因此建立强大的反导系统具有重要的国防意义。从诱饵, 假目标和弹体碎片等构成的威胁云团中识别出真弹头实施有效的拦截是导弹防御问题的关键。微动特征是雷达目标微运动的精细刻画, 常常是目标独特运

动状态的反映, 提取弹道目标的微动特征能够为其分类与识别提供重要依据^[1,2]。

从目前的研究现状来看, 现有空间目标 3 维成像与 3 维微动特征提取方法主要分为两类: 一是基于单基雷达的方法, 即通过分析和提取目标回波的微多普勒特征参数来获得目标上各微动散射点的 3 维结构和运动特征^[3-6]。然而, 由于单基雷达仅能观测到目标在雷达径向距离上的微动分量, 因此这类方法所获得的 3 维成像结果并不能确定目标散射点的真实空间位置, 均需要利用目标相对于雷达的姿态信息才能实现对成像结果的准确定标, 但是仅利用单基雷达很难准确获得目标相对于雷达的姿态信息^[7]。二是基于双/多基雷达的方法, 即利用分布

收稿日期: 2016-10-25; 改回日期: 2017-04-05; 网络出版: 2017-05-11

*通信作者: 胡健 hujianinstar@163.com

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

在不同视角的多个雷达观测到的目标特征差异,通过关联处理来获得目标的3维成像结果^[7-9]。尽管这类方法在理想条件下可以重构目标散射点在空间的真实3维分布,也能够准确反演出目标真实的3维微动特征,但在实际应用中,目标上散射中心的各向异性以及散射点相互之间的遮挡效应将使得各雷达回波的联合处理变得异常复杂和困难,现有方法在实际应用中的有效性还有待进一步检验。

InISAR成像获得的3维图像与目标的物理尺寸一致,能够反映出雷达目标不受运动姿态影响的稳健特征信息^[10,11],因此可为目标识别提供准确依据。但是对于空间微动目标,当采用普通的距离-多普勒算法进行ISAR成像时,由于雷达发射信号的PRF有限,目标的微动使得在成像所需转角时间内回波脉冲数量过少,导致ISAR成像质量不理想,无法进行后续的干涉处理。若采用其他的一些ISAR成像方法,如基于Radon-Wigner变换或者基于经验模式分解(EMD)的成像方法等,则因为在成像处理中破坏了用于干涉处理的相位信息,也无法实现干涉3维成像。基于此,本文将InISAR中多天线干涉处理的思想引入到弹道目标宽带雷达3维成像与3维微动特征提取研究中,采用对目标距离-慢时间像进行干涉处理的方法实现了宽带雷达中弹道目标的真实3维成像,并利用成像获取的3维坐标解得了目标的进动周期,进动角等目标微动特征以及目标长度与底面半径等结构参数,最后仿真验证了所提算法的有效性与鲁棒性。

2 弹道目标微动特性分析

假设目标为带尾翼的锥形刚体,实际中由于遮挡效应,其等效多散射中心大部分情况下只有锥顶散射点和近雷达视线的锥底散射点可见^[12],由此构建弹道目标散射模型如图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 和接收天线 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 , M_1, M_2 分别为基线 AB, AC 的中点。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 (X_0, Y_0, Z_0) 。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 $\mathbf{v}$ 平动的同时,以角速度 $\hat{\omega}_s = (\omega_{sU}, \omega_{sV}, \omega_{sW})^T$ 绕 z 轴做自旋运动,以角速度 $\hat{\omega}_c = (\omega_{cU}, \omega_{cV}, \omega_{cW})^T$ 绕空间某定向轴做锥旋运动。

雷达发射线性调频(LFM)信号,则在 t_m 时刻天线 A 收到目标上某散射点的回波信号为

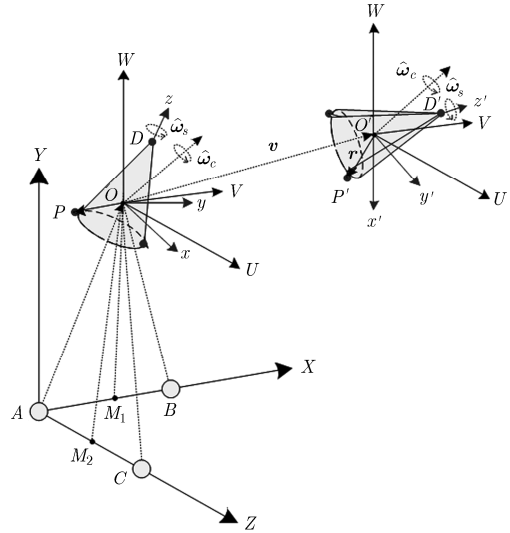


图1 雷达与弹道目标几何关系示意图

$$S_A(t_k, t_m) = \sigma_A \text{rect} \left[\frac{t_k - 2r_A(t_m)/c}{T_p} \right] \cdot \exp \left\{ 2j\pi f_c \left[t_k - \frac{2r_A(t_m)}{c} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ j\pi \mu \left[t_k - \frac{2r_A(t_m)}{c} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式中, t_k, t_m 为快时间与慢时间, c 为光速, T_p 是脉冲宽度, f_c 是载频, μ 是调频率, σ_A 为该散射点对应于天线 A 的散射系数, $r_A(t_m)$ 为 t_m 时刻该散射点到天线 A 的距离。

以 O 点到天线 A 的距离为参考距离 $R_{\text{ref}}(t_m)$ 对回波 $S_A(t_k, t_m)$ 进行解线频调(Dechirp)处理后,关于快时间做傅里叶变换,去除剩余视频相位(RVP)项和包络斜置项,得到回波信号在快时间-频率域的表达式:

$$S_{dA}(f_k, t_m) = \sigma_A T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left[f_k + \frac{2\mu}{c} R_{\Delta}(t_m) \right] \right\} \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta}(t_m) \right] \quad (2)$$

其中, $R_{\Delta}(t_m) = r_A(t_m) - R_{\text{ref}}(t_m)$, $|S_{dA}(f_k, t_m)|$ 即为散射点的1维距离像。通过关系式 $f_k = -2\mu R_{\Delta}(t_m)/c$ 将 $|S_{dA}(f_k, t_m)|$ 在快时间频率-慢时间平面上的峰值频率 f_k 转化为径向距离 $R_{\Delta}(t_m)$,则 f_k 随 $R_{\Delta}(t_m)$ 的变化反映的就是散射点的微动特征。也就是说,在宽带条件下我们可以在距离-慢时间平面上对目标的微多普勒效应进行分析,此时将1维距离像称作距离-慢时间像,将距离-慢时间像中由散射点微动变化的曲线称为微多普勒特征曲线,简称m-D曲线^[1]。

同样地,对 B, C 天线接收的回波进行Dechirp

处理可以获得该散射点的另外两幅距离-慢时间像 $S_{\text{dBQ}}(R_{\Delta}(t_m), t_m)$, $S_{\text{dCQ}}(R_{\Delta}(t_m), t_m)$ 。这里需要注意的是, 为了更好地保全相位信息, 提高干涉处理精度, 本文选择目标到各天线的距离作为参考距离, 而不是传统的采用同一参考距离对3组天线进行处理。

式(2)中 $R_{\Delta}(t_m)$ 表示散射点的微动量, 但它对于锥顶和锥底散射点有不同含义: 锥顶散射点 D 位于自旋轴上, 其微动形式仅为锥旋运动, 远场近似条件下, 根据图1中雷达与目标之间的几何关系有

$$R_{\Delta}(t_m) = r_A(t_m) - R_{\text{ref}}(t_m) \approx [\mathbf{R}_c(t_m) \mathbf{r}_{\text{OD}}]^T \mathbf{n} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{R}_c(t_m) = \mathbf{I} + \hat{\omega}'_c \sin(\Omega_c t_m) + \hat{\omega}_c'^2 [1 - \cos(\Omega_c t_m)]$ 为3维锥旋矩阵, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, $\mathbf{r}_{\text{OD}}$ 为初始时刻 D 点在参考坐标系中坐标对应的向量, $\mathbf{n}$ 为雷达视线方向的单位向量。

对于锥底散射点 P , 其既不在自旋轴上, 也不在锥旋轴上, 它的微动形式表现为自旋和锥旋合成的进动运动, 此时

$$R_{\Delta}(t_m) = r_A(t_m) - R_{\text{ref}}(t_m) \approx [\mathbf{R}_s(t_m) \mathbf{R}_c(t_m) \mathbf{r}_{\text{OP}}]^T \mathbf{n} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{R}_s(t_m) = \mathbf{I} + \hat{\omega}'_s \sin(\Omega_s t_m) + \hat{\omega}_s'^2 [1 - \cos(\Omega_s t_m)]$ 为3维自旋矩阵, $\mathbf{r}_{\text{OP}}$ 为初始时刻 P 点在参考坐标系中坐标对应的向量。

3 弹道目标干涉式3维成像

在单基多天线雷达条件下, 从每个天线的回波中仅能提取出目标的径向微动特征, 且由于各天线对目标的观测视角近似相同, 从每个天线所获得的目标径向微动特征也近似相同^[12]。但是, 各天线位置的差异导致目标上散射点到各天线之间存在细微的距离差异, 从而使得各天线回波之间具有特定的相位差。因此利用目标上各散射点径向微动特征的差异分离散射点回波, 再通过干涉处理提取各散射点的相位差值信息, 结合目标与雷达的几何关系, 就可以获得目标上各散射点的3维坐标, 即实现目标3维成像。

设 t_m 时刻目标上任一散射点 Q 在本地坐标系中的坐标为 (x, y, z) , 以目标质心 O 为参考点, R_{AO} , R_{BO} , R_{AQ} , R_{BQ} 为点 O 与点 Q 到天线 A , B 的距离, R_1 , R_2 , R_{M1} , R_{M2} 为点 O 与点 Q 到基线中点 M_1 , M_2 的距离。假设回波信号都已完成平动补偿, 对 A , B 天线接收到的 Q 点回波在距离-慢时间域进行干涉处理, 可得干涉相位:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{AB}} &= \text{angle}(S_{\text{dAQ}}^*(R_{\Delta}(t_m), t_m) \cdot S_{\text{dBQ}}(R_{\Delta}(t_m), t_m)) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_c} (R_{\Delta\text{AQ}} - R_{\Delta\text{BQ}}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\text{angle}(\cdot)$ 表示取干涉相位差的弧度值, $R_{\Delta\text{AQ}} = R_{AQ} - R_{AO}$, $R_{\Delta\text{BQ}} = R_{BQ} - R_{BO}$, λ_c 为雷达波长。在远场近似条件下, 根据目标与雷达的几何关系有

$$R_{\Delta\text{AQ}} - R_{\Delta\text{BQ}} = \frac{L(X_0 + x) - L^2}{2R_{M1}} - \frac{LX_0 - L^2}{2R_1} \quad (6)$$

把式(6)代入式(5)即可解得散射点 Q 在 X 轴上的投影坐标为

$$x = \left[\frac{\lambda_c \varphi_{\text{AB}}}{2\pi L} + \frac{2X_0 - L}{2R_1} \right] \cdot R_{M1} - X_0 + \frac{L}{2} \quad (7)$$

为使干涉相位不发生模糊, 应保证 $|\varphi_{\text{AB}}| < \pi$ 。同理, 对 A , C 天线接收到的回波在距离-慢时间域进行干涉处理, 即可解得散射点 Q 在 Z 轴上的投影坐标:

$$z = \left[\frac{\lambda_c \varphi_{\text{AC}}}{2\pi L} + \frac{2Z_0 - L}{2R_2} \right] \cdot R_{M2} - Z_0 + \frac{L}{2} \quad (8)$$

其中, φ_{AC} 为 A , C 天线的干涉相位差, $|\varphi_{\text{AC}}| < \pi$ 。

在远场正视条件下, 散射点的 Y 轴坐标与其到 A 天线的斜距近似相等, 可以通过距离-慢时间像上各散射点所在距离单元坐标获得。至此, 已得到散射点的3维空间坐标, 即实现了对目标的3维成像。

由上述分析不难发现, 有效保持干涉相位信息是实现目标真实3维成像的关键。当目标上有多个散射点时, 比如本文模型中有两个散射点, 就需要对散射点进行准确分离, 对不同散射点对应的相位分别进行干涉, 以避免有相同微多普勒频移的散射点引起的干涉处理错误。容易证明由式(3)和式(4)中 $R_{\Delta}(t_m)$ 确定的 m -D 曲线方程的导函数是关于 t_m 的连续函数, 这说明各散射点对应的 m -D 曲线是光滑的, 因此可利用曲线的光滑性来实现各条 m -D 曲线的分离。当散射点的微多普勒曲线有交点时, 由于交点处的相位值是几个散射点相位值的和, 无法分辨出各散射点在该位置处对应的相位, 为避免引起干涉处理错误, 本文在处理时将交点剔除。

4 目标微动特征提取

4.1 锥旋周期、进动周期、自旋周期提取

由式(3)和式(4)给出的锥旋矩阵和自旋矩阵表达式可以看出, 锥顶散射点的 m -D 曲线是随时间变化的正弦曲线, 且曲线周期即为锥旋周期 $T_c = 2\pi/\Omega_c$ 。锥底散射点的微多普勒受到锥旋和自旋两个矩阵的调制, 其在距离-慢时间平面上的变化曲线不再是简单的正弦曲线, 而是表现为复杂的曲线形式^[1], 但不难证明该曲线也是周期性的, 且周期为锥旋周期和自旋周期的最小公倍数。

本文采用文献[13]提出的循环平均幅度差函数(CAMDF)方法对距离-慢时间像完成数学形态学图

像处理和曲线分离之后的结果进行求解,估计目标的进动周期 T_r 与锥旋周期 T_c ,进而求得自旋周期^[14]:

$$T_s = \frac{T_r T_c}{N_r T_c - T_r} \quad (9)$$

其中, N_p 为一个进动周期内 $R_\Delta(t_m)$ 曲线的极大值点个数。

4.2 进动角及目标结构参数提取

对弹道目标进行干涉式3维成像,获取的是能够反映散射点每个时刻真实3维散射分布信息的瞬时像,该瞬时像与目标的物理尺寸一致,可用于提取目标的结构参数。图2所示为弹头目标的微动模型示意图, O 点为本地坐标系原点, γ 为目标半锥角, ε 为目标自旋轴与锥旋轴的夹角,即进动角。 D 点为锥顶散射点,其微动形式只有锥旋运动,其运动轨迹为垂直于锥旋轴的圆,圆心是 D 点在锥旋轴上的投影 D' 。

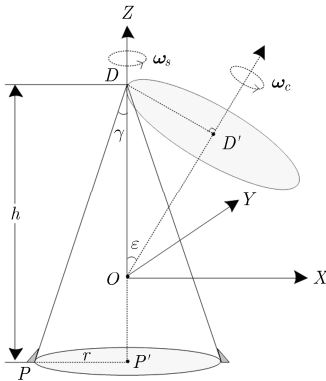


图2 弹道目标微动模型示意图

在轨迹圆上任取 E, F, G 3点,则向量 $\mathbf{FE}$ 与向量 $\mathbf{FG}$ 的外积可写为

$$\mathbf{a} = \mathbf{FE} \times \mathbf{FG} \quad (10)$$

容易知道 $\mathbf{a}$ 是 E, F, G 3点所确定的平面的一个法向量,且 $\mathbf{a}$ 必然与锥旋轴平行同向,而此时 $\mathbf{OF}$ 也与自旋轴平行且同向,则有进动角

$$\varepsilon = \arccos \frac{\mathbf{OF} \cdot \mathbf{a}}{\|\mathbf{OF}\| \|\mathbf{a}\|} \quad (11)$$

以上是从几何角度进行分析的,在实际操作中根据不同时刻任取3点即可,但是当取的点不在同一个周期内时,需要注意把计算结果换算到主值区间 $(0, \pi/2)$ 。

同理,假设某一时刻在锥顶和锥底散射点的微动轨迹上各取一点,分别为 D, P ,那么这两点所构成的向量 $\mathbf{DP}$ 必然与锥体目标的母线平行,且 $\|\mathbf{DP}\|$ 与母线的长度相等,此时有半锥角

$$\gamma = \arcsin \frac{\|\mathbf{DP} \times \mathbf{DO}\|}{\|\mathbf{DP}\| \|\mathbf{DO}\|} = \arccos \frac{\mathbf{DP} \cdot \mathbf{DO}}{\|\mathbf{DP}\| \|\mathbf{DO}\|} \quad (12)$$

同时可以解得目标长度 $h = \frac{\mathbf{DP} \cdot \mathbf{DO}}{\|\mathbf{DO}\|}$,底面半径

$r = \frac{\|\mathbf{DP} \times \mathbf{DO}\|}{\|\mathbf{DO}\|}$ 。在实现了目标的真实3维成像以

后,散射点在各时刻的3维坐标已知,上述向量皆可求,进而即可求得进动角与目标各结构参数。

5 仿真分析

5.1 有效性验证

假设雷达发射信号的载频 $f_c = 20.5$ GHz,脉宽为50 μ s,带宽为3 GHz,脉冲重复频率为1000 Hz,回波信号时长为2 s。本地坐标系原点 O 在雷达坐标系中的坐标为(0,500,0) km,基线长度 $L = 200$ m。目标自旋角速度 $\Omega_s = 2\pi$ rad/s,自旋周期 $T_s = 1$ s,锥旋角速度 $\Omega_c = 4\pi$ rad/s,锥旋周期 $T_c = 0.5$ s。进动角为 $\pi/18$ rad。目标上有两个散射点,锥顶散射点 D 在本地坐标系中的坐标为(0,0,1) m,锥底散射点 P 在本地坐标系中的坐标为(0.5,0,-0.5) m,目标长度为1.5 m,底面半径为0.5 m。

图3(a), 3(b), 3(c)分别为 A, B, C 3组天线接收回波所成的两个散射点的距离-慢时间像,直观上看,3幅图像几乎没有差别,这是因为基线长度相对于目标到雷达的距离而言很小,其对频率的影响也因此很微弱,体现在距离-慢时间像上难以直观地观察到,所以在提取曲线路径时,可以任选一幅进行处理,本文采用图3(a)。

根据前文分析,在干涉处理之前需要先进行曲线分离,以保证干涉相位的准确、完整。为了提高精度,在分离之前,先筛选出图3(a)中幅度大于最大值20%的数据作为后续处理的基础,以消除杂波和旁瓣的影响,再采用数学形态学图像处理方法对筛选点进行图像平滑、去除毛刺、骨架提取^[1]等预处理。根据第3节所述方法完成曲线分离以后,经过干涉处理获得干涉相位,再由式(7)与式(8)就能分别解得各个时刻散射点在 X 维与 Z 维的坐标。散射点在 Y 维的坐标通过距离-慢时间像求出,重构的3维坐标分别如图3(d), 3(e), 3(f)所示,图中断点是处理时剔除微多普勒曲线交点导致的。从重构的坐标曲线上可以看到,效果并不是十分理想, X 维与 Z 维都有不同程度的波动,而 Y 维更是出现了明显的台阶,这是由于距离-慢时间像旁瓣与距离分辨率的影响造成的。显然这样的结果不管是用于成像还是后续的微动特征提取都是不可取的,因此本文借助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, 结果如图 3(g), 3(h), 3(i)所示, 可以清楚地看到拟合后的曲线与图 3(j), 3(k), 3(l)所示

的理论坐标值曲线吻合度很高, 说明本文的干涉式 3 维成像算法是正确有效的。图 3(m)为 3 维成像重

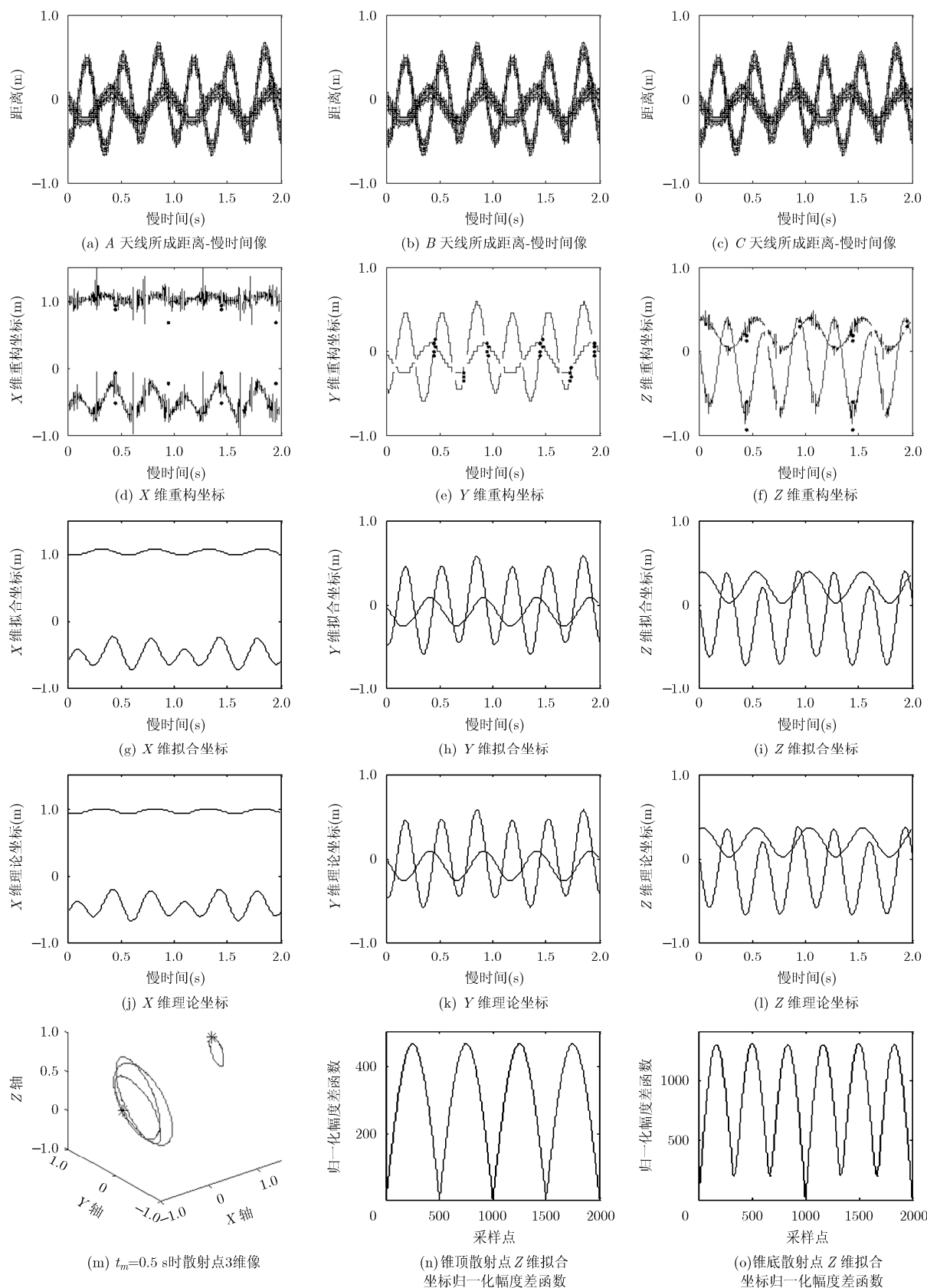


图 3 散射点干涉成像结果及 Z 维拟合坐标曲线 CAMDF

构出的锥顶与锥底散射点的微动轨迹示意图, 图中星标示出的是 $t_m = 0.5$ s 时锥顶和锥底散射点对应的 3 维像。

图 3(n), 3(o)所示为由 CAMDF 方法求出的重构的锥顶和锥底散射点 Z 轴坐标拟合曲线的归一化幅度差函数, 由图可见 CAMDF 在整数倍曲线周期的位置上呈现显著的谷值点特征, 据此结合式(9)即可解得目标的微动周期参数。实现目标真实 3 维成像以后, 有了散射点各时刻的 3 维坐标, 根据 4.2 节所述方法就可解算出目标的其他微动参数和结构参数。

在实现目标干涉 3 维成像的过程中将不可避免地引入误差, 而 3 维坐标的估计误差必然会影响到目标微动参数与结构参数的求解精度。为了平滑引入误差对参数提取的影响, 本文在仿真过程中于不同间隔、不同时刻抽取了 800 组点数据进行计算, 以其平均值作为最终的估计结果。为了考察和分析误差的影响, 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。采用 Monte-Carlo 方法进行 500 次仿真, 所有参数估计结果及误差如表 1 所示, 可以看出, 估计值与真实值的误差很小, 说明本文微动特征提取算法有效, 且参数估计精度相当高。

5.2 鲁棒性分析

为分析本文算法的抗噪性能, 考察噪声对各参数估计精度的影响, 在 3 组回波数据中分别加入随机高斯白噪声, 采用 Monte-Carlo 方法进行 500 次

仿真, 各参数归一化绝对误差随信噪比的变化如表 2 所示。由表可见, 当 $\text{SNR} \geq -5$ dB 时参数估计精度都比较高 ($|\rho| \leq 0.05$), 但是进动角, 半锥角, 目标长度及半径的估计误差相比微动周期的估计误差偏大, 这是因为周期估计是对预处理之后的数据直接进行求解, 而其他参数的估计则受误差积累的影响。

综上所述, 本文提出的弹道导弹目标宽带雷达干涉式 3 维成像与微动特征提取算法正确有效, 实现了目标的真实 3 维成像, 且算法运算简单, 系统实现容易, 能够提取的目标参数较多, 精度较高, 具有较好的抗噪性能, 有一定的应用优势。

6 结束语

提取弹道目标的微动特征能够为目标分类与识别提供重要依据, 反演微动参数是弹道目标防御的重要组成部分。本文首先建模分析了弹道目标的微动特性, 提出一种弹道目标干涉式 3 维成像的方法, 并在此基础上利用获得的散射点真实 3 维坐标解算出了目标的微动参数与结构参数, 仿真实验表明本文算法正确有效, 且抗噪性能较好。本文方法克服了单基雷达仅能提取目标在雷达视线方向上微动分量的局限, 丰富了弹道目标微动特征提取方法。但是目前本文仅针对正视(目标在雷达电轴附近)条件下的非滑动散射模型进行了研究, 而斜视时(目标偏离雷达电轴)将引入相位缠绕, 成像畸变等问题, 滑动散射模型的中间变量及微动参数的估计提取也将更加困难, 相关的研究工作有待进一步开展。

表 1 目标微动参数及结构参数估计结果

	锥旋周期 T_c (s)	自旋周期 T_s (s)	进动周期 T_r (s)	进动角 ε (rad)	半锥角 γ (rad)	目标长度 h (m)	目标底面半径 r (m)
真实值	0.5000	1.0000	1.0000	0.1745	0.3218	1.5000	0.5000
估计值	0.5000	1.0030	1.0010	0.1680	0.3251	1.5707	0.5221
$ \rho $	0.0000	0.0030	0.0010	0.0371	0.0103	0.0471	0.0442

表 2 不同信噪比下参数估计归一化误差 $|\rho|$

信噪比 (dB)	锥旋周期 T_c (s)	自旋周期 T_s (s)	进动周期 T_r (s)	进动角 ε (rad)	半锥角 γ (rad)	目标长度 h (m)	目标底面半径 r (m)
10	0.0020	0.0040	0.0010	0.0330	0.0106	0.0453	0.0436
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0358	0.0120	0.0462	0.0446
0	0.0020	0.0040	0.0010	0.0360	0.0138	0.0464	0.0455
-5	0.0020	0.0040	0.0000	0.0395	0.0156	0.0459	0.0469
-10	0.0020	0.0040	0.0000	0.3051	0.0329	0.0480	0.0491

参 考 文 献

- [1] 张群, 罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 47-64.
ZHANG Qun and LUO Ying. Micro-Doppler Effect of Radar Targets[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 47-64.
- [2] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟. 基于窄带微多普勒调制的锥体目标参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 961-968. doi: 10.11999/JEIT140814.
HAN Xun, DU Lan, and LIU Hongwei. Parameter estimation of cone-shaped target based on narrowband micro-Doppler modulation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 961-968. doi: 10.11999/JEIT140814.
- [3] WANG Qi, XING Mengdao, LU Guangyue, *et al.* High-resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 22-30. doi: 10.1109/TGRS.2007.909086.
- [4] XING Mengdao, WANG Qi, WANG Genyuan, *et al.* A matched-filter-bank-based 3-D imaging algorithm for rapidly spinning targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2106-2113. doi: 10.1109/TGRS.2008.2010499.
- [5] ZHANG Lei, XING Mengdao, QIU Chengwei, *et al.* Two-dimensional spectrum matched filter banks for high-speed spinning-target three-dimensional ISAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 368-372. doi: 10.1109/LGRS.2009.2013487.
- [6] BAI Xueru, XING Mengdao, ZHOU Feng, *et al.* High-resolution three-dimensional imaging of spinning space debris[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2352-2362. doi: 10.1109/TGRS.2008.2010854.
- [7] BAI Xueru, XING Mengdao, ZHOU Feng, *et al.* Scaling the 3-D image of spinning space debris via bistatic inverse synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 430-434. doi: 10.1109/LGRS.2009.2038286.
- [8] AI Xiaofeng, HUANG Yan, ZHAO Feng, *et al.* Imaging of spinning targets via narrow-band T/R-R bistatic radars[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 362-366. doi: 10.1109/LGRS.2012.2205893.
- [9] LUO Ying, ZHANG Qun, YUAN Ning, *et al.* Three-dimensional precession feature extraction of space targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 1313-1329. doi: 10.1109/TAES.2014.110545.
- [10] CHEN Qianqian, XU Gang, ZHANG Lei, *et al.* Three-dimensional interferometric inverse synthetic aperture radar imaging with limited pulses by exploiting joint sparsity[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(6): 692-701. doi: 10.1049/iet-rsn.2014.0275.
- [11] 刘承兰. 干涉逆合成孔径雷达(InISAR)三维成像技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2012: 16-37.
LIU Chenglan. Research on inteferometric inverse synthetic aperture radar three-dimensional imaging[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2012: 16-37.
- [12] 肖金国, 杜兰, 韩勋, 等. 基于参数化时频分析的进动锥裙目标瞬时微多普勒频率提取方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 90-96. doi: 10.11999/JEIT150505.
XIAO Jinguo, DU Lan, HAN Xun, *et al.* Micro-Doppler frequency extraction for cone-skirt shaped target with precession based on parameterized time-frequency analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 90-96. doi: 10.11999/JEIT150505.
- [13] 孙静. 一种基于改进 AMDF 的进动周期估计方法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(27): 152-158.
SUN Jing. Estimation of precession period based on improved circular AMDF[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(27): 152-158.
- [14] 罗迎, 张群, 李松, 等. 基于分布式组网雷达的弹道目标三维进动特征提取[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1080-1085. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.002.
LUO Ying, ZHANG Qun, LI Song, *et al.* Three-dimensional precession feature extraction of ballistic targets in distributed radar networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(6): 1080-1085. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.002.

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。

孙玉雪: 女, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为雷达成像与雷达目标微多普勒效应。