

## 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

梁必帅<sup>\*①②</sup> 张群<sup>①</sup> 娄昊<sup>①③</sup> 罗迎<sup>①</sup> 李开明<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

<sup>②</sup>(68205部队72分队 中卫 755100)

<sup>③</sup>(武警工程大学信息工程系 西安 710086)

**摘要:** 由于非对称自旋目标在不同视角下宽带雷达观测到的散射点分布存在较大差异,因而需要单独研究其组网雷达成像算法。该文利用位于不同位置的两部宽带雷达获得的自旋目标1维距离像序列,基于非对称自旋目标多个散射中心的微动特征不变性,实现了自旋目标同一散射中心的关联,进而得到与目标真实尺寸相一致的3维像。仿真结果表明该算法重构精度高,对于散射中心的遮挡效应及RCS闪烁均不敏感。

**关键词:** 宽带雷达; 3维成像; 微动; 特征关联

**中图分类号:** TN957.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2014)06-1381-08

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2013.01147

## A Method of Three-dimensional Imaging Based on Micro-motion Feature Association for Spatial Asymmetrical Spinning Targets

Liang Bi-shuai<sup>\*①②</sup> Zhang Qun<sup>①</sup> Lou Hao<sup>①③</sup> Luo Ying<sup>①</sup> Li Kai-ming<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

<sup>②</sup>(68205 PLA Troop 72 Section, Zhongwei 755100, China)

<sup>③</sup>(Information Engineering Department, Engineering University of Armed Police Force, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** Owing to the differences among scatterer distributions observed by wideband radars with different viewing angles, it is necessary to research the network radars imaging algorithm for asymmetrical spinning targets. By making use of the range profile series of spinning target obtained by two wideband radars at different locations, the scatterer association is accomplished based on the micro-motion feature invariability of asymmetrical spinning target. Then, the three-dimensional image, which can provide the real size of the target, is obtained. The simulation demonstrates the high precision of the proposed algorithm, and insensitivity to sheltering effects and RCS fluctuation of scatterers.

**Key words:** Wideband radar; Three-dimensional imaging; Micro-motion; Feature association

### 1 引言

为了避免空间碎片等目标(如残留在地球轨道的卫星碎片和火箭末级设备)引起的危害,必须对其进行有效地监测和识别。目前,地基雷达由于受到时间和功率等因素限制较小,可以全天候地获取目标的运动特征和物理特征,是进行低轨道空间碎片监测的有力工具。传统上,窄带雷达通过测量目标的RCS来估计其尺寸与形状,并进行目标归类与识别。由于空间碎片等目标的尺寸普遍较小,误差较大<sup>[1]</sup>。而随着高分辨雷达的出现,基于1维距离像的空间目标成像技术得到较快发展,这使得进一步获

得目标形状和结构的细节信息,提高目标识别能力成为可能。然而,1维距离像实质上是目标散射中心在雷达视线上的投影分布,携带的信息不够充分并且对姿态变化很敏感。近年来,空间目标的雷达2维,3维成像成为了研究的热点;如果能获得目标真实尺寸3维像,将对空间目标识别分类具有重大意义。

现有的雷达目标3维散射中心成像方法中,常用的方法是利用散射中心在雷达视线上的几何投影关系,由多个姿态下1维散射中心的距离数据重建目标散射中心的3维模型,其中将多姿态下的1维散射中心进行正确关联是成像的关键<sup>[2]</sup>。典型的散射中心关联方法为采用已知姿态下投影几何约束的关联方法,该方法通过穷举所有姿态下1维散射中心的任意关联组合来提取真实3维散射中心的空间位置,其工作量和资源消耗均较大<sup>[3,4]</sup>。并且,一旦空

2013-07-30 收到, 2013-11-15 改回

国家自然科学基金(61201369, 61102109)和陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2013JQ8008)资助课题

\*通信作者: 梁必帅 liang1323957@126.com

间目标散射中心较多，这类方法需要的视角数急剧增多，实际上也就需要很多部不同视角的雷达进行观测。

实际上空间碎片等目标由于外界扰动等原因，在自身作平动运动的同时还伴随有一些自旋、进动等微动运动<sup>[5,6]</sup>。微动会对回波形成特有的调制，反映了目标的特点，可以利用这些特征用来进行目标成像和目标识别<sup>[7-9]</sup>。文献[10]针对传统逆合成孔径雷达(ISAR)成像中的平动补偿方法，利用经验模式分解(EMD)结果中的趋势项分量完成目标回波的平动补偿，并通过分析 EMD 分解结果获得了目标的自旋频率、锥旋频率等特征信息。文献[11]首先利用时频分析得到回波的时频分布，然后将目标的时频曲线看作机动目标的航迹，利用多目标跟踪技术跟踪其时频曲线，实现了提取各等效散射中心的微多普勒频率。在 2 维成像方面，文献[12]针对激光雷达包含旋转部件的目标，对主体回波信号和旋转部件回波信号进行分离，完成对目标主体的 2 维成像。文献[13]通过多基地雷达目标速度的过完备字典补齐了目标空间的反射信号，实现运动目标的成像。总的来说，目前针对目标微动的研究主要集中于特征提取和成像，且成像多是 2 维像，少数有关 3 维成像的研究，如文献[14]研究了弹道目标 3 维进动特征的提取计算方法，但对散射点数量有明确要求；文献[15]采用 GRT-CLEAN 算法对自旋目标回波处理，获得了目标的 3 维成像结果，但该 3 维像是目标真实尺寸的投影，不能反映目标的真实尺寸。文献[16]对空间自旋目标 3 维成像进行了研究，获得了空间自旋目标的真实 3 维雷达像。但该文要求雷达对目标全部散射中心的观测不能全部丢失，并且要求至少有 3 部以上雷达同时观测才能获得成像结果。本文在此基础上，从不同方位的两部宽带雷达对非对称自旋目标获取的 1 维距离像序列出发，提取目标微动特征中的相似信息，实现了散射中心的关联，最终实现了自旋目标的 3 维微动特征获取和 3 维真实像重构。本文方法仅利用两部雷达即可实现 3 部雷达才能获取的 3 维像，且对于目标中一些散射中心观测的永久丢失不敏感，具有明显优势。仿真结果证明了本文方法的有效性和鲁棒性。

## 2 几何模型

如图 1 所示，(U,V,W)为全局坐标系，设有两部雷达对非对称自旋目标进行观测，坐标分别为(U<sub>i</sub>,V<sub>i</sub>,W<sub>i</sub>), i=1,2。自旋目标的几何中心位于 O 点，(x,y,z)为目标本地坐标系(简称本地坐标系)，目标以角速度 ω 绕本地坐标系的 z 轴自旋，同时以

速度 v 在全局坐标系中作匀速平动。参考坐标系(X,Y,Z)平行于全局坐标系且随目标一起平动，原点为 O。

P 是自旋目标上某一点，起始时刻在本地坐标系(x,y,z)下对应坐标为 r<sub>0</sub>=(r<sub>x0</sub>,r<sub>y0</sub>,z<sub>0</sub>)<sup>T</sup>。r<sub>xy0</sub>=(r<sub>x0</sub>,r<sub>y0</sub>,0)<sup>T</sup>，r<sub>xy0</sub>是 r<sub>0</sub>在本地坐标系 xOy 面上的分量，z<sub>0</sub>=(0,0,z<sub>0</sub>)<sup>T</sup>，z<sub>0</sub>是 r<sub>0</sub>在 z 轴上的分量，r<sub>xy0</sub>+z<sub>0</sub>=r<sub>0</sub>。P 在参考坐标系坐标为 r̂<sub>0</sub>=(r̂<sub>0X</sub>,r̂<sub>0Y</sub>,r̂<sub>0Z</sub>)<sup>T</sup>，r̂<sub>0</sub>=R<sub>init</sub>r<sub>0</sub>，R<sub>init</sub>为欧拉(Euler)旋转矩阵。目标运动时间 t 之后，目标中心平动到 O'，本地坐标系运动到(x',y',z')的位置，P 运动到 P'，在本地坐标系(x,y,z)中坐标为 r=(r<sub>x</sub>,r<sub>y</sub>,r<sub>z</sub>)<sup>T</sup>，参考坐标系(X,Y,Z)中相应地变为 r̂=(r̂<sub>X</sub>,r̂<sub>Y</sub>,r̂<sub>Z</sub>)<sup>T</sup>=R<sub>init</sub>r。在参考坐标系下 P 的转动可以用 r̂=r̂<sub>rot</sub>r̂<sub>0</sub>描述。则

$$R_{rot} = \exp(\Omega \hat{\omega} t) = I + \hat{\omega}' \sin(\Omega t) + \hat{\omega}'^2 [1 - \cos(\Omega t)] \quad (1)$$

其中 Ω=||ω||=||ω||，ω 为自旋目标在参考坐标系下的旋转矢量，ω' 为 ω 对应的单位向量，ω'²=ω'/Ω=(ω'<sub>X</sub>,ω'<sub>Y</sub>,ω'<sub>Z</sub>)<sup>T</sup>，ω' 为 ω' 对应的斜对角阵。

第 i 部宽带雷达发射信号形式为

$$p_i(t_k) = \text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t_k + \frac{1}{2}\mu t_k^2\right)\right) \quad (2)$$

其中

$$\text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & -T_p/2 \leq t_k \leq T_p/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

f<sub>c</sub>为载频，T<sub>p</sub>为脉冲宽度，μ为调频率，t<sub>k</sub>为快时间，用来描述目标与雷达的距离。

基于“走-停”处理方式，将目标中心 O' 的回波(假设目标已完成平动补偿)作为参考信号，在快时间上进行 Dechirp 处理，经去除剩余视频相位(RVP)、去除包络“斜置”项后<sup>[17]</sup>，得到目标在第 i 部雷达频率域(f<sub>k</sub>域)的 1 维距离像表达式为

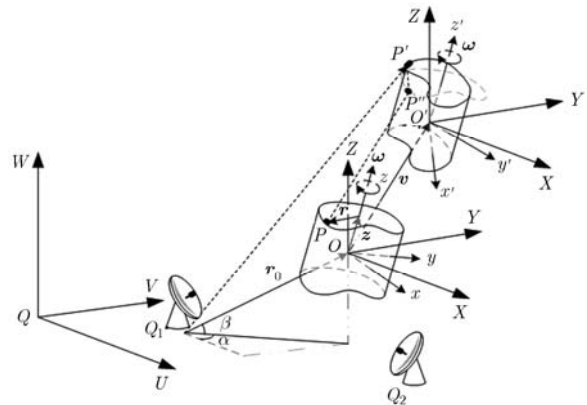


图1 雷达与自旋目标空间示意图

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

式中  $c$  为光速,  $t_m$  为慢时间, 用来描述目标运动的时间, 它与快时间  $t_k$  及全时间  $t$  的关系为  $t = t_m + t_k$ 。  $R_{i\Delta}(t_m) = r_i(t_m) - R_{\text{ref}}(t_m)$  为 1 维距离像,  $r_i(t_m)$  为  $t_m$  时刻  $P$  点到雷达的距离,  $R_{\text{ref}}(t_m)$  为  $t_m$  时刻目标中心  $O'$  到雷达的距离。从“1 维距离像-慢时间平面”(也称为“距离-慢时间像”)上能看出, 距离像峰值的位置随  $R_{i\Delta}(t_m)$  变化, 能够反映  $P$  点的微动特征。因此在宽带条件下, 目标微动特征可以用“距离-慢时间像”来描述。

如图 2 所示, 在远场条件下, 存在

$$R_{i\Delta}(t_m) = r_i(t_m) - R_{\text{ref}}(t_m) \approx \overline{O'P'} \cdot \mathbf{n}_i = (\mathcal{R}_{\text{rot}}(t_m) \mathbf{r}_0)^T \mathbf{n}_i \quad (5)$$

其中  $\mathbf{n}_i$  为对应于  $Q_i$  雷达的目标视线(LOS)方向  $\overline{Q_iP'}$  的单位向量,  $r_i(t_m)$  对应  $P'$  到雷达的距离,  $R_{\text{ref}}(t_m)$  为目标中心  $O'$  到雷达的距离。  $G$  为  $P'$  的旋转圆心,  $HG$  平行于  $Q_iP'$ 。  $\mathbf{r}_0$  在  $(x, y, z)$  中  $z$  轴上分量为  $z_0$ ,  $z_0$  在 LOS 方向的投影为  $\|\overline{HG}\| = z_0 \cdot \mathbf{n}_i$ , 则

$$R_{i\Delta}(t_m) = (\mathcal{R}_{\text{rot}}(t_m) \mathbf{r}_0)^T \mathbf{n}_i = \|\overline{HG}\| + \mathbf{r}_{xy0}^T \mathbf{n}_i = z_0^T \mathbf{n}_i + \mathbf{r}_{xy0}^T \mathbf{n}_i \quad (6)$$

又因为

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_i &= (n_x, n_y, n_z)^T \\ &= (\sin(\varepsilon_i) \cos(\Omega t_m + \psi_i), \\ &\quad \sin(\varepsilon_i) \sin(\Omega t_m + \psi_i), \cos(\varepsilon_i))^T \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $\psi_i$  为 LOS 在  $(x, y, z)$  坐标系下的方位角,  $\varepsilon_i$  为  $\mathbf{n}_i$  与  $\boldsymbol{\omega}$  的夹角。则

$$\mathbf{z}_0^T \mathbf{n}_i = (0, 0, z_0)^T \cdot (n_x, n_y, n_z)^T = z_0 \cos(\varepsilon_i) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{xy0}^T \mathbf{n}_i &= (r_{x0}, r_{y0}, 0)^T \cdot (n_x, n_y, n_z)^T \\ &= (r_{x0} \cos(\Omega t_m + \psi_i) + r_{y0} \sin(\Omega t_m + \psi_i)) \\ &\quad \cdot \sin(\varepsilon_i) \end{aligned} \quad (9)$$

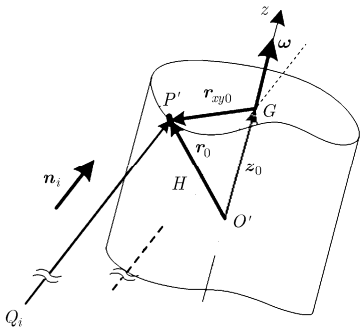


图2 自旋目标 1 维距离像空间位置关系

以 LOS 方向与自旋轴方向所在平面为  $xoz$  平面, 自旋轴所在方向为  $oz$  方向建立坐标系, 则

$$\mathbf{r}_{xy0}^T \mathbf{n}_i = (\|\mathbf{r}_{xy0}\| \cos(\Omega t_m + \psi_i)) \sin(\varepsilon_i) \quad (10)$$

令  $r = \|\mathbf{r}_{xy0}\|$ , 将式(8)和式(10)代入式(6)得

$$R_{i\Delta}(t_m) = z_0 \cos \varepsilon_i + r \cos(\Omega t_m + \psi_i) \sin \varepsilon_i \quad (11)$$

式(11)表明自旋目标在“距离-慢时间平面”上的微动特征曲线为一条余弦曲线, 其中  $z_0 \cos \varepsilon_i$  为该余弦曲线的基线,  $r \sin \varepsilon_i$  和  $\psi_i$  分别对应其振幅和初相。曲线基线、初相及振幅包含了散射中心的分布信息。因此获得目标回波微动特征曲线的  $z_0$ ,  $r$  及  $\psi_i$  3 个参数就可对目标进行真实尺寸的 3 维重构。根据式(11), 为了得到目标的各散射点的  $z_0$ ,  $r$  及  $\psi_i$ , 必须获得  $\sin \varepsilon_i$  和  $\cos \varepsilon_i$ ; 而  $\varepsilon_i$  由目标姿态及雷达的相对位置决定, 因此只靠单部雷达无法重构目标散射中心的真实空间位置。由于不同方位的雷达对应不同的  $\varepsilon_i$ , 因此尝试通过对目标进行多方位雷达观测进行解决。

### 3 非对称自旋目标 3 维成像原理

#### 3.1 散射中心关联原理

为了对自旋目标进行 3 维成像, 首先需要提取“距离-慢时间平面”余弦曲线的基线、初相和振幅。提取余弦曲线参数的方法较多, 有 Hough 变换, 逆 Radon 变换等, 这些算法都比较成熟。假设已经对目标余弦微动特征曲线完成了参数估计, 得到了曲线的基线, 振幅和初相。

$N$  部雷达对有  $M$  个散射中心的目标进行观测, 第  $i$  部雷达 ( $i = 1, 2$ ) 对于自旋目标的第  $k$  个散射中心 ( $k = 1, 2, \dots, M$ ) 的观测有如下关系:

$$\begin{aligned} R_{i\Delta 1}(t_m + \Delta t_i + \Delta t_{im}) &= (z_{01} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i \\ &\quad + r_1 \cos(\Omega t_m + \psi_i) \sin \varepsilon_i \\ R_{i\Delta 2}(t_m + \Delta t_i + \Delta t_{im}) &= (z_{02} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i \\ &\quad + r_2 \cos(\Omega t_m + \psi_i + \Delta \psi_2) \sin \varepsilon_i \\ &\quad \vdots \\ R_{i\Delta k}(t_m + \Delta t_i + \Delta t_{im}) &= (z_{0k} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i \\ &\quad + r_k \cos(\Omega t_m + \psi_i + \Delta \psi_k) \sin \varepsilon_i \\ &\quad \vdots \\ R_{i\Delta M}(t_m + \Delta t_i + \Delta t_{im}) &= (z_{0M} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i \\ &\quad + r_M \cos(\Omega t_m + \psi_i + \Delta \psi_M) \sin \varepsilon_i \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $(z_{0k} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i$  为第  $k$  个散射点的自旋中心在第  $i$  部雷达 LOS 上的投影位置,  $r_k$  为第  $k$  个散射点的旋转半径,  $\Delta \psi_k$  为第  $k$  个散射点相对于第 1 个散射点的相位差(对于第 1 个散射点,  $\Delta \psi_1 = 0$ )。

由于很难精确估计雷达到目标中心的距离，因此引入  $\Delta d_i$  表示目标中心  $O$  到各雷达距离的误差，引入  $\Delta t_i$  表示各雷达之间的时钟同步误差。此外，当雷达与目标距离较远时，应当引入  $\Delta t_{im}$  对慢时间进行精确校正。如图 3 所示， $r_1$  为  $Q_1$  雷达到散射中心  $P$  的距离， $t_m$  时刻雷达观测到数据时，实际上回波已经传播了  $r_1$ ，因此  $t_m$  时刻的观测是  $\Delta t_{im} = r_1/c$  之前的目标的情况，即  $P$  位于  $P'$  时的情况。

假设各雷达已经完成了时间的精确同步，校正了  $\Delta t_i$ ，并对  $\Delta t_{im}$  进行了校正，第  $i$  部雷达 ( $i = 1, 2$ ) 的观测结果为

$$\left. \begin{aligned} R_{i\Delta 1}(\hat{t}_m) &= (z_{01} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i \\ &\quad + r_1 \cos(\Omega t_m + \psi_i) \sin \varepsilon_i \\ R_{i\Delta 2}(\hat{t}_m) &= (z_{02} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i \\ &\quad + r_2 \cos(\Omega t_m + \psi_i + \Delta \psi_2) \sin \varepsilon_i \\ &\quad \vdots \\ R_{i\Delta k}(\hat{t}_m) &= (z_{0k} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i \\ &\quad + r_k \cos(\Omega t_m + \psi_i + \Delta \psi_k) \sin \varepsilon_i \\ &\quad \vdots \\ R_{i\Delta M}(\hat{t}_m) &= (z_{0M} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i \\ &\quad + r_M \cos(\Omega t_m + \psi_i + \Delta \psi_M) \sin \varepsilon_i \end{aligned} \right\} (13)$$

可以看出，不同雷达估计得到的同一散射中心对应的  $\Delta \psi_k$  是相同的，对应的振幅  $r_k \sin \varepsilon_i$  ( $i = 1, 2$ ) 是成正比例的，而对应的基线  $(z_{0k} + \Delta d_i) \cos \varepsilon_i$  成线性关系。对于非对称散射中心目标，可根据这些原理实现不同散射中心的关联。

基于以上分析，同时对初相、振幅、基线进行关联搜索，以期求得  $\psi_2 - \psi_1$ ， $\sin \varepsilon_2 / \sin \varepsilon_1$ ， $\cos \varepsilon_2 / \cos \varepsilon_1$  和  $\Delta d_2 - \Delta d_1$ 。由于是对 4 个参数进行搜索，计算复杂度和运算量较多，采用先对第 1 部雷达与第 2 部雷达的初相差  $\psi_2 - \psi_1$  及  $r_k \sin \varepsilon_2 / r_k \sin \varepsilon_1$  进行搜索，然后再对  $\cos \varepsilon_2 / \cos \varepsilon_1$  和  $\Delta d_2 - \Delta d_1$  进行搜索。

**算法 1** 搜索初相差  $\psi_2 - \psi_1$  和振幅比值  $r_k \sin \varepsilon_2 / r_k \sin \varepsilon_1$  的步骤如下：

步骤 1 求得第 1 部雷达和第 2 部雷达所获得

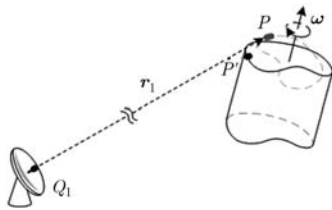


图 3 雷达观测结果的滞后

的目标所有散射中心微多普勒曲线的振幅最大、最小值： $A_{1\max}$ ， $A_{1\min}$  和  $A_{2\max}$ ， $A_{2\min}$ ；

步骤 2 确定第 1 部雷达振幅的缩放区间  $[A_{2\min} / A_{1\max}, A_{2\max} / A_{1\min}]$ ；

步骤 3 在极坐标下，将第 1 部雷达获得的  $M_1$  个散射中心振幅  $A_{1l}$  和初相  $\psi_{1l}$  ( $l = 1, 2, \dots, M_1$ )，进行振幅缩放与初相旋转得  $T_r(A_{1l})$  和  $T_\psi(\psi_{1l})$ ，求得极坐标下该雷达获得的第  $l$  个散射中心的  $T_r(A_{1l})$  和  $T_\psi(\psi_{1l})$  到第 2 部雷达所获得  $M_2$  个散射中心的  $A_{2m}$  和  $\psi_{2m}$  ( $m = 1, \dots, M_2$ ) 的最小空间距离

$$d_l = \min \left( \left\| \left( T_r(A_{1l}), T_\psi(\psi_{1l}) \right) - (A_{2m}, \psi_{2m}) \right\| \right), \quad m = 1, 2, \dots, M_2 \quad (14)$$

而后对全部  $M_1$  个最小空间距离求和

$$D_1 = \sum_{l=1}^{M_1} d_l \quad (15)$$

步骤 4 确定第  $i$  部雷达振幅的缩放步长  $d_A$  和初相搜索步长  $d_\psi$ ，获取振幅缩放区间  $[A_{2\min} / A_{1\max}, A_{2\max} / A_{1\min}]$  及初相旋转区间  $[0, 2\pi]$  中最小的  $\min(D_1)$  所对应的  $T_r(A_{1l})_{\min}$  和  $T_\psi(\psi_{1l})_{\min}$ 。

此时即得到两部雷达散射中心重合度最好的振幅比值和初相旋转量。

**算法 2** 搜索基线偏移量  $\Delta d_2 - \Delta d_1$  和比值  $\cos \varepsilon_2 / \cos \varepsilon_1$  的步骤如下：

步骤 1 求得第 1 部雷达和第 2 部雷达的基线最大、最小值： $B_{1\max}$ ， $B_{1\min}$  和  $B_{2\max}$ ， $B_{2\min}$ ；

步骤 2 确定第 1 部雷达基线的缩小区间  $[(B_{2\max} - B_{2\min}) / (B_{1\max} - B_{1\min}), 1]$  或它的放大区间  $[1, (B_{2\max} - B_{2\min}) / (B_{1\max} - B_{1\min})]$ ；

步骤 3 确定第 1 部雷达基线的平移区间  $[B_{2\min} - (B_{1\max} + B_{1\min}) / 2, B_{2\max} + (B_{1\max} + B_{1\min}) / 2]$ ；

步骤 4 将第 1 部雷达获取到的  $M_1$  个散射中心基线进行平移与缩放得  $T_B(B_{1l})$ ；

步骤 5 在算法 1 搜索的基础上，在柱坐标系下，求第 1 部雷达第  $l$  个散射中心柱坐标  $(T_r(A_{1l})_{\min}, T_\psi(\psi_{1l})_{\min}, T_B(B_{1l}))$  到第 2 部雷达的  $M_2$  个散射中心的柱坐标  $(A_{2m}, \psi_{2m}, B_{2m})$  最小空间距离；

$$d_{Bl} = \min \left( \left\| \left( T_r(A_{1l})_{\min}, T_\psi(\psi_{1l})_{\min}, B_{1l} \right) - (A_{2m}, \psi_{2m}, B_{2m}) \right\| \right), \quad m = 1, 2, \dots, M_2 \quad (16)$$

步骤 6 求第 1 部雷达全部  $M_1$  个散射中心的最小空间距离之和

$$D_{B1} = \sum_{l=1}^{M_1} d_{Bl} \quad (17)$$

步骤 7 确定第 1 部雷达基线缩放步长  $d_B$  和平移搜索步长  $d_{\Delta d}$ ，获取基线缩小区间  $[(B_{2\max} - B_{2\min}) / (B_{1\max} - B_{1\min}), 1]$  (或它的放大区间  $[1, (B_{2\max}$

$-B_{2\min})/(B_{1\max} - B_{1\min})]$ 及平移区间 $[B_{2\min} - (B_{1\max} + B_{1\min})/2, B_{2\max} + (B_{1\max} + B_{1\min})/2]$ 中最小的  $\min(D_{B1})$ 。

经过以上算法，得到两部雷达对非对称目标散射同一中心的微动特征曲线振幅比  $r_k \sin \varepsilon_2 / r_k \sin \varepsilon_1 = k_{r1}$ ，初相差  $\psi_2 - \psi_1 = k_{\psi1}$ ，基线偏移量  $\Delta d_2 - \Delta d_1 = k_{d1}$  和基线缩放比  $\cos \varepsilon_2 / \cos \varepsilon_1 = k_{B1}$ 。

### 3.2.3 维成像原理

如图 4 所示， $Q_1, Q_2$  两部雷达对目标的观察形成一个 3 条边已知的三角形，进而可获得  $\cos \angle Q_1 P Q_2 (= \cos \eta)$ 。

设  $Q_1$  和  $Q_2$  雷达的雷达视线对应的单位向量分别为  $\mathbf{n}_1$  和  $\mathbf{n}_2$ ，则

$$\cos \eta = \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2 \quad (18)$$

经慢时间校正之后，结合式(7)可得

$$\begin{aligned} \cos \eta &= (\sin(\varepsilon_1) \cos(\Omega \hat{t}_m + \psi_1), \\ &\quad \sin(\varepsilon_1) \sin(\Omega \hat{t}_m + \psi_1), \cos(\varepsilon_1))^T \\ &\quad \cdot (\sin(\varepsilon_2) \cos(\Omega \hat{t}_m + \psi_2), \\ &\quad \sin(\varepsilon_2) \sin(\Omega \hat{t}_m + \psi_2), \cos(\varepsilon_2))^T \\ &= \cos(\psi_2 - \psi_1) \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2 + \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \quad (19) \end{aligned}$$

设散射中心已经完成关联，则存在以下关系

$$\left. \begin{aligned} \sin \varepsilon_2 / \sin \varepsilon_1 &= k_{r1} \\ \cos \varepsilon_2 / \cos \varepsilon_1 &= k_{B1} \\ \cos(\psi_2 - \psi_1) \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2 + \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 &= \cos \eta \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

进一步可得

$$\cos(\psi_2 - \psi_1) \sin^2 \varepsilon_2 k_{r1} + (1 - \sin^2 \varepsilon_2) k_{B1} = \cos \eta \quad (21)$$

其中  $\sin \varepsilon_2$  为待求未知数， $k_{r1}$  为估计得到的两雷达微动特征曲线的振幅之比， $k_{B1}$  为基线缩放之比， $\psi_2 - \psi_1$  为估计得到的微动特征曲线的初相差。求得  $\sin \varepsilon_2$  即可根据式(11)重构出目标散射点的真实空间分布。

## 4 仿真实验

### 4.1.3 维成像精度分析方法

由于所成的 3 维像为目标真实尺寸的 3 维像，相同尺寸的 3 维像在空间可任意旋转和平移，有无数种情况。为了检验该方法的成像精度，需要消除旋转和平移带来的影响，因此先利用最小二乘法求得旋转矩阵和平移矩阵，再将所成 3 维像进行旋转平移至对应的空间，求各对应散射中心的误差。

假设目标共有  $N$  个散射中心，其中第  $i$  个散射中心精确坐标为  $\mathbf{X}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ 。重构的散射中心坐标为  $\tilde{\mathbf{X}}_i = (\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i)^T$ 。由于 3 维像对应目标真实尺寸，则散射中心的像坐标与精确坐标存在如下关系：

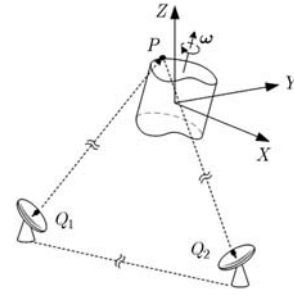


图 4 两部雷达对自旋目标的观测

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= \mathbf{A} \tilde{\mathbf{X}}_1 + \mathbf{B} \\ \mathbf{X}_2 &= \mathbf{A} \tilde{\mathbf{X}}_2 + \mathbf{B} \\ &\vdots \\ \mathbf{X}_N &= \mathbf{A} \tilde{\mathbf{X}}_N + \mathbf{B} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

其中  $\mathbf{A}$  为像坐标在空间旋转时对应的旋转矩阵， $\mathbf{B}$  为像坐标旋转后对应的平移向量。不妨设

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{B} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]^T \quad (24)$$

解  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  各元素的方程组

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_1 & \tilde{y}_1 & \tilde{z}_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{x}_1 & \tilde{y}_1 & \tilde{z}_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{x}_1 & \tilde{y}_1 & \tilde{z}_1 \\ & & & & & & & & & & & \vdots \\ \tilde{x}_N & \tilde{y}_N & \tilde{z}_N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{x}_N & \tilde{y}_N & \tilde{z}_N & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{x}_N & \tilde{y}_N & \tilde{z}_N \\ & & & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [a_{11} \quad a_{12} \quad a_{13} \quad b_1]^T \\ [a_{21} \quad a_{22} \quad a_{23} \quad b_2]^T \\ [a_{31} \quad a_{32} \quad a_{33} \quad b_3]^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ \vdots \\ x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} \quad (25)$$

得到  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$ 。将像坐标  $\tilde{\mathbf{X}}_i$  代入  $\bar{\mathbf{X}}_i = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{X}}_i + \mathbf{B}$ ，可求得旋转平移后的像坐标  $\bar{\mathbf{X}}_i$ ，由于计算等误差，这时  $\bar{\mathbf{X}}_i$  与精确坐标  $\mathbf{X}_i$  不会完全重合，利用像坐标与精确坐标误差的平均值和最大误差来衡量 3 维像的成像精度。平均误差为

$$\delta_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\bar{\mathbf{X}}_i - \mathbf{X}_i\| \quad (26)$$

最大误差为

$$\delta_2 = \max(\|\bar{\mathbf{X}}_i - \mathbf{X}_i\|) \quad (27)$$

## 4.2 仿真结果

由于分布式雷达对空间目标的观测容易造成某些目标散射中心的丢失,因此仿真了雷达观测所得的散射中心丢失情况。目标有 10 个散射中心,仿真 1: 1 号雷达观测到全部 10 个散射中心,2 号雷达也观测到全部 10 个散射中心;仿真 2: 1 号雷达观测到 7 个散射中心,2 号雷达也观测到 7 个散射中心,但两部雷达只有 4 个散射中心是同一散射中心,其余的散射中心另一部雷达观测不到。采用两部雷达成像,1 号雷达坐标(-200,200,0) km 载频 30 GHz,2 号雷达坐标(300, 300, 0) km 载频 35 GHz。这两部

雷达的带宽均为 4 GHz,对应距离分辨率 0.0375 m,

PRF 为 500 Hz。现有超高分辨雷达的带宽已经高达 8 GHz[18],国内也有带宽为 3.2 GHz 的雷达宽带激励源的公开报道[19],故这一设定是合理的。目标自旋频率为 0.8 Hz,目标中心坐标(0,0,200) km,目标包含 10 个散射中心,其中自旋半径最大为 1.2 m,自旋半径最小为 0.2 m,其空间分布如图 5 所示。图 6 为两部雷达观察的散射中心全部可关联时所得到的关联结果,图 7 为两雷达只有 4 个散射中心可关联时得到的关联结果。

图 8 和图 9 分别为 RCS 没有闪烁和存在闪烁时的“距离-慢时间”像。

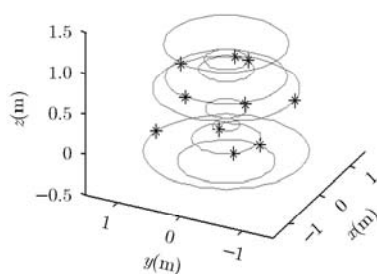


图 5 自旋目标空间散射点的分布情况

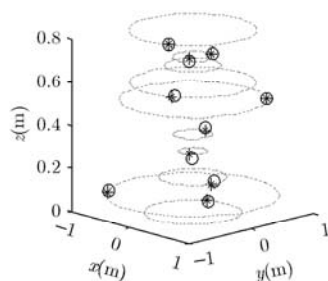


图 6 两部雷达散射中心可全部同一关联时关联结果

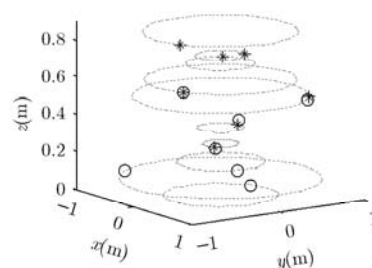
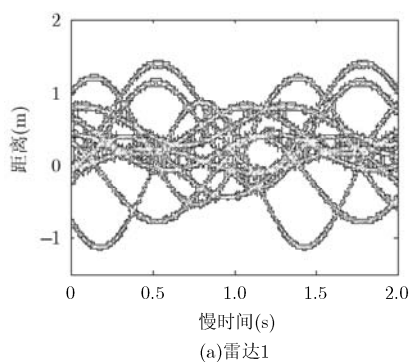
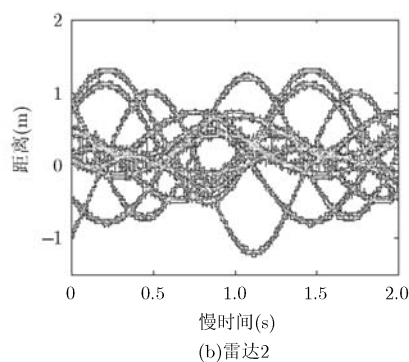


图 7 两部雷达散射中心 4 个散射中心可同一关联时关联结果

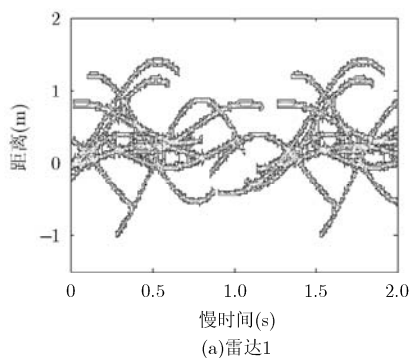


(a)雷达1

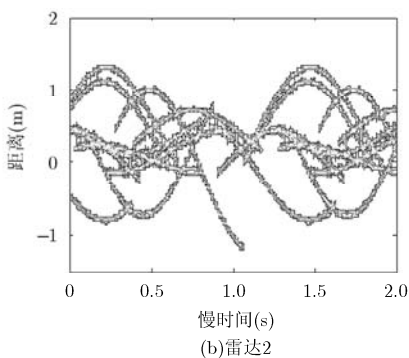


(b)雷达2

图 8 无 RCS 闪烁时两雷达获取的“距离-慢时间”像



(a)雷达1



(b)雷达2

图 9 RCS 存在闪烁时两雷达获取的“距离-慢时间”像

从图 6 可以看出算法的鲁棒性较好, 对于雷达散射中心的丢失不敏感, 可实现正确关联。对于 0.0375 m 分辨率的雷达, 表 1 和表 2 表明该 3 维成像算法重构精度较好, 较坏情况的重构精度约等于雷达的距离分辨率。

## 5 结束语

本文根据自旋目标在高分辨雷达 1 维距离像的

微动特征特点, 利用两部雷达实现非对称自旋目标真实尺寸的 3 维成像。该方法成像精度较高, 且不需要两部雷达的相参处理, 实现较为容易。仿真结果表明, 该算法对两部雷达散射中心丢失和自旋目标 RCS 闪烁所造成的不利条件, 其重建精度均较好。

表 1 散射中心没有 RCS 起伏时空间分布的平均误差和最大误差

误差	10 个散射中心全部关联	7 个散射中心 4 个可以关联
平均误差 $\delta_1$ (m)	0.0129	0.0190
最大误差 $\delta_2$ (m)	0.0285	0.0367

表 2 散射中心 RCS 在 3/4 自旋周期可观测时空间分布的平均误差和最大误差

误差	10 个散射中心全部关联	7 个散射中心 4 个可以关联
平均误差 $\delta_1$ (m)	0.0154	0.0223
最大误差 $\delta_2$ (m)	0.0292	0.0387

## 参考文献

- [1] 唐辉, 宋正鑫, 胡卫东, 等. 空间碎片的低分辨雷达二维成像及其运动补偿算法[J]. 信号处理, 2007, 23(5): 718-721.  
Tang Hui, Song Zheng-xin, Hu Wei-dong, et al. A 2D low-resolution radar imaging and motion compensation method of space debris[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(5): 718-721.
- [2] 刘永祥, 吕玉增, 黎湘, 等. 多姿态角下的目标散射中心关联与成像方法研究[J]. 信号处理, 2008, 24(2): 168-171.  
Liu Y X, Liu Y Z, Li X, et al. Scattering centers association and imaging based on multi-aspect measurement[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(2): 168-171.
- [3] 张颖康, 肖扬, 胡绍海. 非合作雷达目标散射中心关联和三维重建算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2076-2081.  
Zhang Ying-kang, Xiao Yang, and Hu Shao-hai. Method of scattering centers association and 3D reconstruction for non-cooperative radar target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2076-2081.
- [4] 张颖康, 肖扬, 胡绍海. 基于散射中心关联的三维成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 1988-1993.  
Zhang Ying-kang, Xiao Yang, and Hu Shao-hai. New method of 3D imaging based on scattering centers association[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(9): 1988-1993.
- [5] 马超, 许小剑. 空间进动目标的宽带雷达特征信号研究[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 636-642.  
Ma Chao and Xu Xiao-jian. Modeling of wideband radar signature for precession space objects[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 636-642.
- [6] 高红卫, 谢良贵, 文树梁, 等. 摆动锥体目标微多普勒分析和提取[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2498-2502.  
Gao Hong-wei, Xie Liang-gui, Wen Shu-liang, et al. Analysis and extraction of micro-Doppler induced by cone-shaped target's wobbling[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(12): 2498-2502.
- [7] He S S, Zhou J X, Zhao H Z, et al. Analysis and extraction of stepped frequency radar signature for micro-motion structure[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 3(5): 484-492.
- [8] Li J and Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 284-291.
- [9] Zhang Qun, Soon Yeo tat, Tan Hwee siang, 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.
- [10] 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.  
Luo Ying, Bai You-qing, 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.
- [11] 邵长宇, 杜兰, 李飞, 等. 基于多目标跟踪的空间锥体目标微多普勒频率提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2972-2977.  
Shao Chang-yu, Du Lan, Li Fei, et al. Micro-Doppler extraction from space cone target based on multiple target

- tracking[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2972-2977.
- [12] 何劲, 张群, 邓冬虎, 等. 基于 ISAL 的含旋转部件目标成像及微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1284-1290. He Jin, Zhang Qun, Deng Dong-hu, *et al.*. Imaging and motion feature extraction for the targets with rotating parts in ISAL[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(6): 1284-1290.
- [13] Stojanovic I and Karl W C. Imaging of moving targets with multi-static SAR using an overcomplete dictionary[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1): 164-176.
- [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): 1079-1085. 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): 1079-1085.
- [15] Wang Qi, Xing Meng-dao, *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.
- [16] 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. Liang Bi-shuai, 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.
- [17] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 24-28.
- [18] MIT Lincoln Laboratory 2011 Annual Report[OL]. <http://www.ll.mit.edu>. 2011.
- [19] 贾颖新, 王岩飞. 超高分辨率机载 SAR 宽带激励源设计与实现[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 77-85. Jia Ying-xin and Wang Yan-fei. Design and implementation of wideband exciter for an ultra-high resolution airborne SAR system[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 77-85.
- 梁必帅: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向雷达成像、雷达信号处理.
- 张群: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向雷达成像、雷达目标识别、雷达对抗等.
- 娄昊: 男, 1984年生, 讲师, 研究方向雷达信号处理、目标识别.
- 罗迎: 男, 1984年生, 讲师, 研究方向雷达信号处理、雷达成像与目标识别.
- 李开明: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向雷达信号处理、目标识别.