

一种基于二维运动重构的旋转对称目标拟规则进动参数估计方法

洪 灵 戴奉周* 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 在初始扰动和扭矩的作用下, 自旋稳定空间飞行器的运动形式是章动和进动合成的拟规则进动。拟规则进动目标运动参数的估计对于确定目标姿态和预测目标落点具有重要意义。针对拟规则进动的旋转对称目标, 该文提出一种基于宽带雷达观测的运动参数估计方法。首先推导了拟规则进动的运动学模型, 而后将基于多散射中心 1 维径向距离历程的目标运动 3 维重构方法扩展到旋转对称目标的 2 维运动重构, 然后基于 2 维运动的欧式重构采用序列二次规划和非线性最小二乘循环迭代的方法估计目标的章动和进动参数。最后, 利用电磁仿真数据验证了算法的有效性。

关键词: 宽带雷达; 旋转对称目标; 章动参数估计; 2 维运动重构

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)07-1538-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01310

An Approach for Quasi-regularized Precession Parameters Estimation of Rotation Symmetric Object Based on Two-dimensional Motion Reconstruction

Hong Ling Dai Feng-zhou Liu Hong-wei

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Under the effects of the initial perturbation and torque, the motion of the spin-stability spacecraft is the compound of nutation and precession, named quasi-regularized precession. The motion parameters estimation of the quasi-regularized precession object is important to the determination of the attitude and the reentry point of the object. This paper presents a novel method to estimate the motion parameters of the rotation symmetric object based on the measurements from wideband radar. Firstly, the kinematic model of the quasi-regularized precession is derived; and then the algorithm of 3D motion reconstruction from 1D radial range histories of multiple scatterers is extended to the 2D motion reconstruction of the rotation symmetric object; and thirdly based on the 2D Euclidian motion reconstruction result, the method of nutation and precession parameters estimation is proposed by using the cyclic iterative of sequential quadratic programming and nonlinear least square algorithm. The electromagnetic simulated data show that the proposed method is validated for its effectiveness.

Key words: Wideband radar; Rotation symmetric object; Nutation parameters estimation; Two-dimensional motion reconstruction

1 引言

航天器的姿态估计对于卫星稳定性和毁伤分析以及再入式飞行器的落点预测具有重要意义。目前, 对三轴稳定航天器的跟踪和姿态估计技术已较为成熟。但是, 还有相当数量的航天器采用了自旋稳定的方式。当前, 针对自旋稳定航天器的姿态估计的研究成果还不多见^[1]。

随着雷达技术的发展, 宽带跟踪成像雷达在空间目标监视和遥感领域发挥着越来越重要的作用^[2]。

近年来, 出于国家安全的需要, 国内多家单位开展了空间进动目标运动参数估计的研究, 有许多研究成果发表, 例如文献[3-5]研究了基于窄带雷达微多普勒分析的进动目标运动参数估计方法, 文献[6-8]则研究了基于宽带雷达测量的进动目标运动参数估计方法。以上方法都是针对特定形状的目标, 在进动参数估计时假设目标的形状是先验已知的。此外, 这些文献中所采用的运动模型都是目标无扭矩作用情况下的进动模型, 而对于实际的空间目标, 特别是在变轨或调整姿态阶段的目标, 扭矩对目标的作用是不能忽略的, 此时目标的运动模型可用拟规则进动来描述^[9]。但是对于同时存在章动和进动的目标, 由于其运动形式较为复杂, 研究尚不充分, 仅

2013-08-28 收到, 2014-01-27 改回

国家自然科学基金(61201285), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0630)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题

*通信作者: 戴奉周 fzdai@xidian.edu.cn

限于微多普勒谱的分析^[10,11]。

针对以上问题，本文提出了一种基于宽带雷达测量的拟规则进动旋转目标运动参数估计算法。首先经过推导得出了拟规则进动目标的运动学方程，并分析了拟规则进动光滑对称目标的散射特性，然后介绍了基于多个“滑动”散射中心的 1 维径向距离历程重构目标 2 维运动的算法，进而给出了基于目标 2 维运动欧式重构的结果估计目标拟规则进动参数的算法。该算法只需要利用 3 个或 3 个以上非共线“滑动”散射中心或位于目标自旋轴上的散射中心的径向距离历程，而无需利用目标形状的先验信息。

2 目标章动与 1 维径向距离历程模型

2.1 旋转对称目标拟规则进动模型

章动和进动在运动学与动力学中有不同的定义方式^[9]。对于航天器的章动和进动的描述通常采用动力学中的定义方式，即刚体的极轴绕动量矩的锥旋运动称为章动，而刚体的极轴随同动量矩矢量由于力矩作用而改变方位的运动称为进动^[9-13]。一般情况下，目标的进动必然伴随着高频微幅的章动。对一般刚体的章动和进动的严格描述十分复杂，需要求解一组欧拉方程^[9,10]。对于绕主轴旋转的旋转对称目标，进动可以看作是角动量矩矢量绕进动轴的锥旋运动，这种章动和进动叠加的运动形式称为“拟规则进动”^[9]。本文所研究的拟规则进动在部分研究相同问题的文献中被称为章动^[10,11]。

设有拟规则进动的旋转对称刚体目标，如图 1 所示。刚体自旋频率为 ω_s ，章动频率为 ω_N ，进动频率为 ω_p ，自旋轴与章动轴之间的夹角为 ψ ，章动轴与进动轴之间的夹角为 β 。分别建立以进动轴为 Z 轴的直角坐标系 $OXYZ$ 和以章动轴为 w 轴的直角坐标系 $Ouvw$ 。坐标系 $OXYZ$ 随着目标沿轨道运动，并且进动轴 Z 始终与目标的轨道运动的切线方向一致。在目标作章动和进动的过程中， u 轴始终垂直于章动轴和进动轴确定的平面。根据以上定义， w 轴在 $OXYZ$ 中的单位矢量为

$$\vec{w}(t) = [\cos \alpha(t) \sin \beta \quad \sin \alpha(t) \sin \beta \quad \cos \beta]^T \quad (1)$$

其中 $\alpha(t)$ 是 w 轴在 $OXYZ$ 中的方位角，因此 $\alpha(t) = \omega_p t + \alpha_0$ 。不失一般性，设 $\alpha_0 = 0$ ，由此定义了起始时刻 X 轴和 u 轴之间的关系。根据定义， u 轴始终垂直于 w 轴和 Z 轴，因此 u 轴在 $OXYZ$ 中的单位矢量为

$$\vec{u}(t) = \frac{\mathbf{M}_z \vec{w}(t)}{\|\mathbf{M}_z \vec{w}(t)\|} = [-\sin \alpha(t) \quad \cos \alpha(t) \quad 0]^T \quad (2)$$

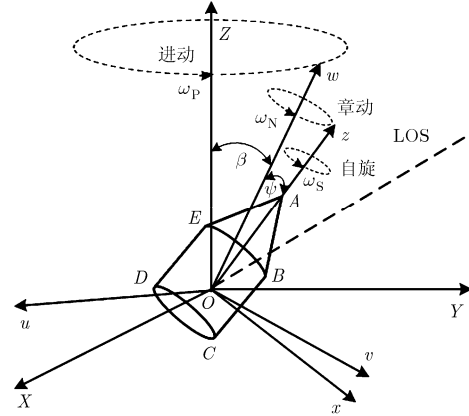


图 1 旋转对称目标拟规则进动示意图

$$\text{其中 } \mathbf{M}_z = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

由于 v 轴总是垂直于 u 轴和 w 轴，因此 v 轴在 $OXYZ$ 中的单位矢量为

$$\vec{v}(t) = \frac{\mathbf{M}_u \vec{w}(t)}{\|\mathbf{M}_u \vec{w}(t)\|} = [\cos \alpha(t) \cos \beta \quad \sin \alpha(t) \cos \beta \quad -\sin \beta]^T \quad (3)$$

$$\text{其中 } \mathbf{M}_u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cos \alpha(t) \\ 0 & 0 & \sin \alpha(t) \\ -\cos \alpha(t) & -\sin \alpha(t) & 0 \end{bmatrix}.$$

根据坐标系的转换原理，从坐标系 $Ouvw$ 到 $OXYZ$ 的旋转矩阵为

$$\mathbf{Q}(t) = \begin{bmatrix} \vec{u} & \vec{v} & \vec{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha(t) & \cos \alpha(t) \cos \beta & \cos \alpha(t) \sin \beta \\ \cos \alpha(t) & \sin \alpha(t) \cos \beta & \sin \alpha(t) \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

以下分析光滑旋转对称目标的散射特性。以光滑的旋转对称柱底锥目标为例，如图 1 所示。根据散射理论，在光学区，散射特性主要由锥顶点 A 以及入射面与目标锥体和柱体的衔接面的两个交点 B 和 E ，以及入射面与目标底面的两个交点 C 和 D 确定。散射中心 B, C, D 和 E 的位置并不随目标的自旋而变化，它们好像在目标的表面滑动，因此被称为“滑动”散射点^[14]。如果目标仅存在“滑动”散射点和位于自旋轴上的全局散射中心，如图 1 中的锥顶点 A ，则目标的自旋在雷达回波中是没有体现的。根据以上分析可知，对于作拟规则进动的光滑表面的旋转对称刚体目标，采用雷达观测时，散射中心的运动只是在入射面上的 2 维运动。

设 x 轴在入射面内，过 O 点且与 z 轴垂直，则

目标上任何一个“滑动”散射中心或位于自旋轴上的散射中心的位置都可通过2维直角坐标系 Oxz 的坐标对 (x, z) 确定。

如前所述,目标的自旋轴绕章动轴做锥旋运动,因此 z 轴在坐标系 $Ouvw$ 中的单位矢量为

$$\hat{z}(t) = [\cos \phi(t) \quad \sin \psi \sin \phi(t) \sin \psi \quad \cos \psi]^T \quad (5)$$

其中 $\phi(t)$ 是 z 轴在坐标系 $Ouvw$ 中的方位角,因此 $\phi(t) = \omega_N t + \phi_0$ 。

利用式(4)给出的坐标旋转矩阵, z 轴在坐标系 $OXYZ$ 中的单位矢量为

$$\tilde{z}(t) = \mathbf{Q}(t) \hat{z}(t) = \begin{bmatrix} \cos \alpha (\sin \beta \cos \psi + \cos \beta \sin \phi \sin \psi) - \sin \alpha \cos \phi \sin \psi \\ \sin \alpha (\sin \beta \cos \psi + \cos \beta \sin \phi \sin \psi) + \cos \alpha \cos \phi \sin \psi \\ \cos \beta \cos \psi - \sin \beta \sin \phi \sin \psi \end{bmatrix} \quad (6)$$

假设雷达视线方向(Line of Sight, LOS)矢量在坐标系 $OXYZ$ 中的方位角是 $\eta(t)$,俯仰角是 $\gamma(t)$ 。对于轨道目标,通常目标在进动周期内运动过的路程远小于其与雷达之间的距离,因此 $\eta(t)$ 和 $\gamma(t)$ 在这段时间内都可视为常数。则LOS在 $OXYZ$ 中的单位矢量为

$$\mathbf{l} = [\cos \eta \sin \gamma \quad \sin \eta \sin \gamma \quad \cos \gamma]^T \quad (7)$$

则雷达LOS与 z 轴,即目标自旋轴的夹角余弦为

$$\begin{aligned} h(t) &= \cos(\theta(t)) \\ &= \mathbf{l}^T(t) \tilde{z}(t) \\ &= \sin \gamma (\sin \beta \cos \psi + \cos \beta \sin \psi \sin \phi(t)) \\ &\quad \cdot \cos(\alpha(t) - \eta) \\ &\quad - \sin \gamma \cos \phi(t) \sin \psi \sin(\alpha(t) - \eta) \\ &\quad + \cos \gamma [\cos \beta \cos \psi - \sin \beta \sin \phi(t) \sin \psi] \end{aligned} \quad (8)$$

设目标上第 n 个“滑动”散射中心或位于自旋轴上的散射中心的坐标为 (x_n, z_n) ,假设目标质心的轨道运动已经被补偿,则当目标作拟规则进动时该散射中心的1维径向距离历程为

$$r_n(t) = x_n \sin \theta(t) + z_n \cos \theta(t) = \mathbf{s}_n^T \mathbf{c}(t) \quad (9)$$

其中 $\mathbf{s}_n = [x_n \quad z_n]^T$ 表示了目标散射中心的位置,而 $\mathbf{c}(t) = [\cos \theta(t) \quad \sin \theta(t)]^T$ 反映了目标的运动,包括章动和进动。

从式(8)可以看出,对于拟规则进动的表面光滑旋转对称刚体目标,所有的章动和进动参数都包含在雷达LOS与目标自旋轴的夹角余弦中,因此只要能得到 $h(t)$ 就可以估计出章动和进动参数。而雷达

可直接观测到的是由式(9)给出的各散射中心的1维径向距离历程,是由目标散射中心的位置和运动共同决定的。因为目标散射中心的位置也是未知的,因此需要将目标各散射中心1维径向距离历程中的 \mathbf{s}_n 和 $\mathbf{c}(t)$ 解耦,然后才能从 $\mathbf{c}(t)$ 中估计目标的运动参数。

3 基于2维运动重构的章动参数估计

3.1 2维运动重构算法

文献[15,16]研究了从多个散射中心的1维径向距离历程中重构目标的3维散射中心位置和雷达LOS在目标连体坐标系中的3维运动轨迹的方法。而通过上一节分析可知,对 \mathbf{s}_n 和 $\mathbf{c}(t)$ 的解耦可以看作是散射中心2维坐标和目标2维运动的重构。在此采用算法从3维重构算法降维而来,仅给出主要步骤。实现2维重构的条件需要3个或3个以上非共线散射中心的径向距离历程,这一条件的证明方法与文献[15]中对3维运动重构条件的证明完全相同。

设目标上有 N 个非共线的散射中心(仅包括“滑动”散射中心和位于自旋轴上的散射中心),它们在 Oxz 坐标系中的坐标组成的矩阵为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_N \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

设处理时间内共有 M 次雷达回波,则根据式(9),多个散射中心的径向距离历程可以写为以下矩阵形式

$$\underbrace{\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \cdots & r_M \end{bmatrix}}_{\mathbf{R}_{N \times M}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 & \mathbf{s}_2 & \cdots & \mathbf{s}_N \end{bmatrix}^T}_{\mathbf{S}_{2 \times N}^T} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 & \mathbf{c}_2 & \cdots & \mathbf{c}_M \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_{2 \times M}} \quad (11)$$

式(11)中 \mathbf{S} 称为目标的结构矩阵,而 \mathbf{C} 称为运动矩阵。设 $\mathbf{W}_{N \times M}$ 是 N 多个散射中心的 M 个径向距离测量的噪声矩阵,则径向距离历程测量值矩阵 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = \mathbf{R} + \mathbf{W} \quad (12)$$

目标结构和运动矩阵重构可归结为以下优化问题:

$$\min_{\hat{\mathbf{S}}, \hat{\mathbf{C}}} \|\mathbf{X} - \hat{\mathbf{S}} \hat{\mathbf{C}}\|_2^2 \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \text{diag}(\hat{\mathbf{C}}^T \hat{\mathbf{C}}) = \mathbf{1}_{M \times 1} \quad (14)$$

式(13)和式(14)中 $\hat{\mathbf{S}}$ 和 $\hat{\mathbf{C}}$ 分别是目标的结构矩阵和运动矩阵的估计, $\mathbf{1}_{M \times 1}$ 是全1 M 维列向量。

首先通过奇异值分解来完成仿射重构,即

$$\mathbf{X} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T \quad (15)$$

则目标的结构矩阵的仿射重构为 $\hat{\mathbf{S}}_A = \mathbf{U}$,运动矩阵的仿射重构为 $\hat{\mathbf{C}}_A = \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$ 。

设从仿射重构到欧氏重构的转换矩阵为 M ，则式(14)给出的约束条件可重写为

$$\text{diag}(\mathbf{C}_E^T \mathbf{C}_E) = \text{diag}(\mathbf{C}_A^T \mathbf{M}^T \mathbf{M} \mathbf{C}_A) = \mathbf{1}_{M \times 1} \quad (16)$$

令 $\mathbf{W} = \mathbf{M}^T \mathbf{M}$ ，则 \mathbf{W} 是一个 2×2 的对称矩阵。取出其中不同的 3 个元素，组成列向量 \mathbf{w} ，即

$$\mathbf{w} = [W_{11} \quad W_{12} \quad W_{22}]^T \quad (17)$$

构造一个 $M \times 3$ 的矩阵 $\mathbf{D}_{M \times 3}$

$$\mathbf{D}_{M \times 3} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{C}}_{A1} \odot \hat{\mathbf{C}}_{A1} \\ 2\hat{\mathbf{C}}_{A1} \odot \hat{\mathbf{C}}_{A2} \\ \hat{\mathbf{C}}_{A2} \odot \hat{\mathbf{C}}_{A2} \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

其中 $\hat{\mathbf{C}}_{Ai}$, $i = 1, 2$ 是运动仿射重构矩阵 $\hat{\mathbf{C}}_A$ 的第 i 行。则式(16)可重写为

$$\mathbf{D}\mathbf{w} = \mathbf{1}_{M \times 1} \quad (19)$$

\mathbf{w} 的最小二乘解为

$$\mathbf{w}_{LS} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{1}_{M \times 1} \quad (20)$$

将 \mathbf{w}_{LS} 中的各元素取出，构成矩阵 \mathbf{W} ，并对 \mathbf{W} 进行矩阵的平方根分解，得到从仿射重构到欧氏重构的转换矩阵 \mathbf{M} 。将其与运动矩阵的仿射重构相乘，即可得到运动矩阵的欧氏重构。

$$\hat{\mathbf{C}}_E = \mathbf{M} \hat{\mathbf{C}}_A \quad (21)$$

对于任意的 2 维正交矩阵 $\mathbf{O}_{2 \times 2}$ 都有 $\mathbf{W} = \mathbf{M}^T \mathbf{M} = \mathbf{M}^T \mathbf{O}^T \mathbf{O} \mathbf{M}$ ，因此运动矩阵的欧氏重构 $\hat{\mathbf{C}}_E$ 和真实的运动矩阵之间存在一个未知的任意旋转，即

$$\mathbf{C} = \mathbf{O} \hat{\mathbf{C}}_E \quad (22)$$

3.2 基于 2 维运动欧式重构结果的章动和进动参数估计

根据以上分析，从目标的运动矩阵中估计目标的章动和进动参数需要消除运动矩阵的欧氏重构 $\hat{\mathbf{C}}_E$ 和真实的运动矩阵 \mathbf{C} 之间的未知任意旋转矩阵 \mathbf{O} 。在此，本文提出一种基于迭代优化的目标章动和进动参数与旋转矩阵 \mathbf{O} 的联合估计算法。

定义函数

$$F(a, \omega_p, \omega_N, \beta, \psi, \phi_0, \eta, \gamma; m) = \mathbf{o}_2^T \tilde{\mathbf{c}}_m - h(m T_r) \quad (23)$$

其中 $\tilde{\mathbf{c}}_m$ 是运动矩阵欧氏重构的第 m 列， \mathbf{o}_2 分别是未知旋转矩阵 \mathbf{O} 的第 2 行的转置，则 \mathbf{o}_2 和目标运动的参数可以通过求解以下优化问题来完成。

$$\min_{\mathbf{o}_2, \omega_C, \omega_N, \beta, \psi, \phi_0, \eta, \gamma} \sum_{m=0}^{M-1} \|F(a, \omega_p, \omega_N, \beta, \psi, \phi_0, \eta, \gamma; m)\|^2 \quad (24)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{o}_2^T \mathbf{o}_2 = 1 \quad (25)$$

对章动和进动参数的估计是一个最小二乘拟合的问题，而对 \mathbf{o}_2 的估计则是一个带约束的凸规划问题，因此本文提出了一种基于双迭代的求解算法，在迭代过程中的每一步都采用不同的算法分别求解

\mathbf{o}_2 和运动参数。估计算法的流程图如图 2 所示。

关于运动参数估计的算法有以下几点说明：

(1) 目标章动频率 ω_N 和进动频率 ω_p 的初值需要通过通过对散射中心的 1 维径向距离历程的谱分析来获得。

(2) 当给定目标的运动参数时，估计 \mathbf{o}_2 的过程中，目标函数是一个凸函数，而式(25)给出的约束条件是定义在单位圆上的，因此是非凸的；为了方便求解，将约束条件松弛为 $\mathbf{o}_2^T \mathbf{o}_2 \leq 1$ ，这样目标函数和约束条件都是凸的，可采用序列二次规划^[16]算法求解，然后再通过 $\mathbf{o}_2 = \mathbf{o}_2 / \|\mathbf{o}_2\|_2$ 将优化结果投影到单位圆上。

(3) 在给定旋转矩阵参数 \mathbf{o}_2 ，求解目标运动参数的阶段，参数求解问题是一个非线性最小二乘问题，在此采用了 Levenberg-Marquardt 算法^[17]求解。

4 仿真实验结果

为了验证本文所提出的拟规则进动光滑对称体运动参数估计算法的有效性，本文采用电磁仿真工具软件 CST STUDIO SUITE 2011 产生全极化目标回波。仿真的雷达参数设置为：频率范围 9~11 GHz，201 个频点，全极化。目标采用简化的自旋卫星模型，其形状和尺寸参数如图 3 所示，材质为理想良导体(Perfect Electric Conductor, PEC)。目标章动

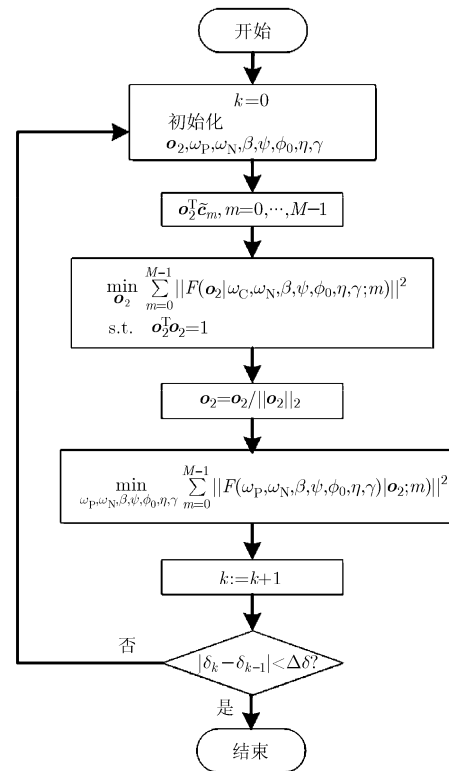


图 2 目标运动参数估计算法流程图

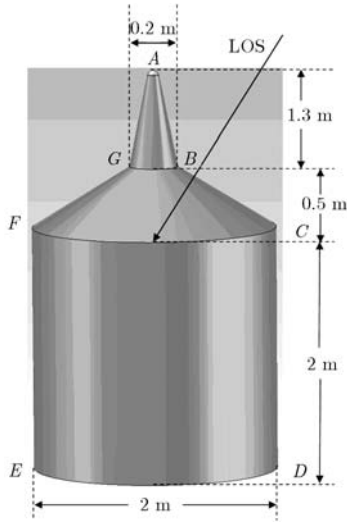


图 3 目标模型及尺寸

参数设置为：自旋频率 $\omega_s = 3\pi \text{ rad/s}$ ，章动频率 $\omega_N = 6\pi \text{ rad/s}$ ，进动频率 $\omega_C = \pi \text{ rad/s}$ ，自旋轴与章动轴之间的夹角 $\psi = 1^\circ$ ，章动轴与进动轴之间的夹角 $\beta = 8^\circ$ ，目标自旋轴在坐标系 $Ouvw$ 中的初始方位角 $\phi_0 = 36^\circ$ 。雷达视线方向矢量在坐标系 $OXYZ$ 中的方位角 $\eta = 120^\circ$ ，俯仰角 $\gamma = 30^\circ$ 。由式(8)的反余弦得到的目标对称轴和 LOS 之间的夹角随时间变化的曲线如图 4 所示。

图 5 给出了利用全极化 MUSIC 算法^[18]对 CST STUDIO SUITE 2011 产生的全极化宽带数据处理得到的目标高分辨距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)序列的 2 维灰度图。从图中可以看出，可以清晰地分辨出目标上 A, B, C, D 和 F 5 个散射中心的 1 维径向距离历程，而散射中心 E 和 G 的回波则由于遮挡效应而不可见，这与对目标散射中心分布的分析是一致的。

从图 3 给出的目标模型可以看出，散射中心 A, B, C, D 和 F 是非共线的，满足第 3.1 节给出的 2

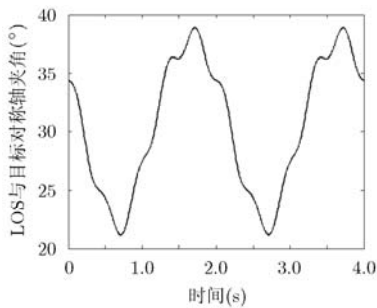


图 4 LOS 与目标自旋轴夹角

维运动重构条件，因此可采用本文所提出的算法来估计目标的章动和进动参数。

本文所提出的算法利用了目标上多个散射中心 1 维径向距离历程，因此参数估计的精度是由每个散射中心的径向距离估计精度决定的。根据信号的估计理论，距离估计的误差与雷达发射信号的带宽成反比，而与信噪比成正比。但是每个散射中心的回波强度是不同的，因此在性能评估时我们将信噪比定义为所有散射中心的回波功率之和与噪声能量之比。图 6 给出了目标回波信噪比在 32 dB 到 42 dB 之间变化时 7 个运动参数估计值的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)随信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)的变化曲线，曲线是通过 100 次独立的实验结果平均得到的。

从图 6 可以看出，各个参数的估计结果的均方根误差总体上随信噪比的增加而降低。由于算法需要利用多个散射中心的径向距离历程，而只有在目标总回波的信噪比较高时才能保证较弱的散射中心的径向距离也有较高的估计精度，因此该算法在较高的信噪比条件下可以取得较好的估计结果。

5 结束语

本文针对自旋稳定空间目标的姿态估计问题，提出了一种基于宽带雷达观测的拟规则进动参数估计算法。该算法首先利用目标上至少 3 个非共线“滑动”散射中心或位于目标对称轴上的散射中心的 1 维径向距离历程进行 2 维运动欧式重构，然后以目标的章动和进动模型为基础，交替采用序列二次规划和非线性最小二乘算法消除目标 2 维运动欧式重构中的任意旋转矩阵并估计目标的章动和进动参数。利用电磁仿真软件得到的全极化宽带目标回波对算法进行了验证，实验结果表明，本文所提出的方法在满足信噪比要求的条件下可以较为准确地估计拟规则进动目标的运动参数。

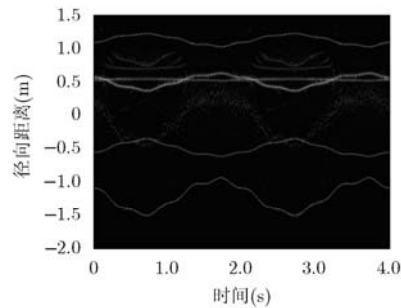


图 5 利用全极化 MUSIC 方法估计的目标 HRRP 序列

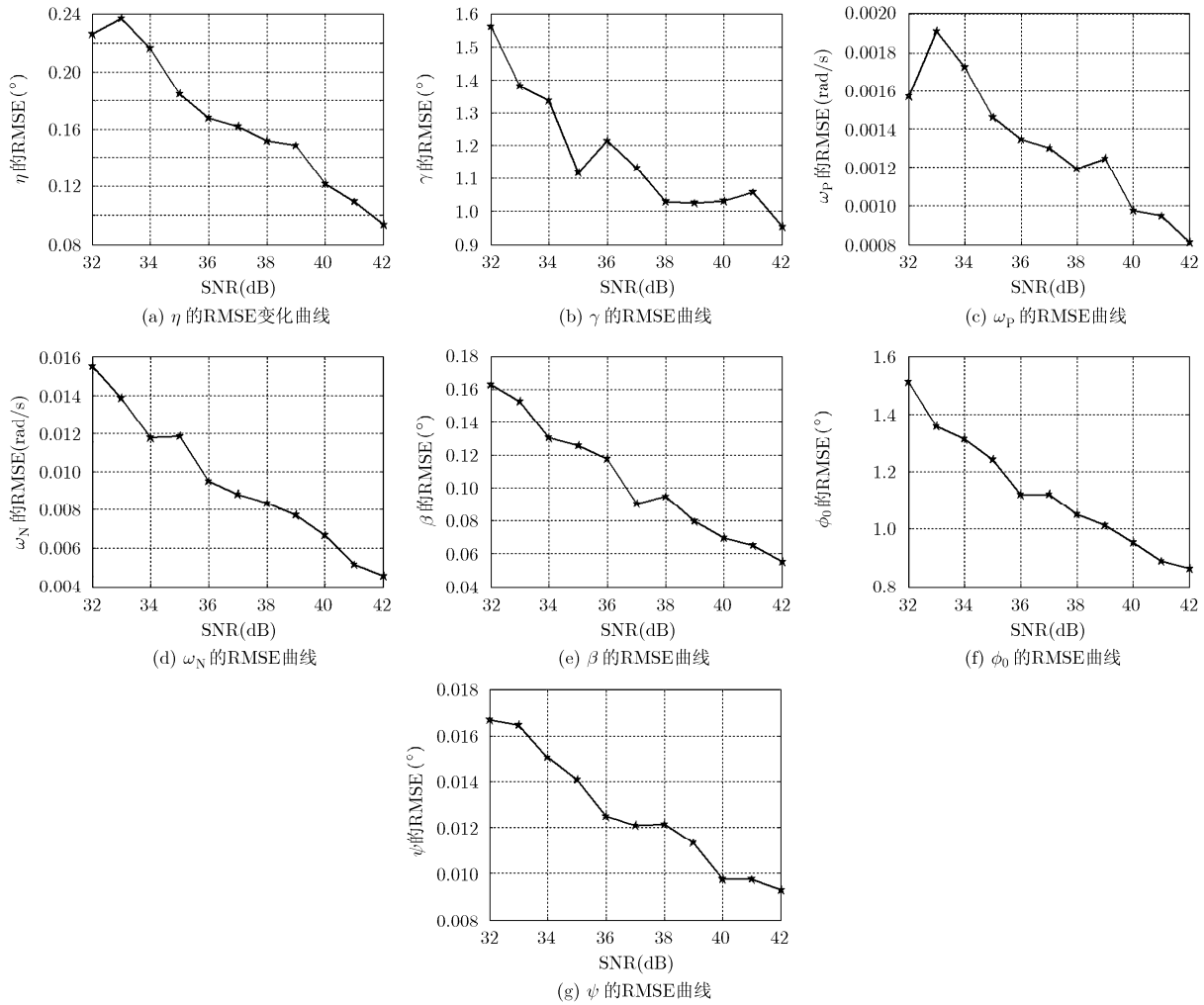


图 6 参数估计均方根误差随信噪比的变化曲线

参 考 文 献

[1] Rosebrock J. Absolute attitude from monotonic radar measurements of rotating objects[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3737-3744.

[2] Stambaugh J J, Lee R K, and Cantrell W H. The 4 GHz bandwidth millimeter-wave radar[J]. *MIT Lincoln Laboratory Journal*, 2012, 19(2): 64-76.

[3] 邹小海, 艾晓峰, 李永祯, 等. 基于微多普勒的圆锥弹头进动与结构参数估计 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2413-2419.
Zou Xiao-hai, Ai Xiao-feng, Li Yong-zhen, et al. Precession and structure parameter estimation of the cone-shaped warhead based on the micro-Doppler[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2413-2419.

[4] 邹小海, 艾晓峰, 李永祯, 等. 进动圆锥弹头双基地微多普勒特性分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 609-615.
Zou Xiao-hai, Ai Xiao-feng, Li Yong-zhen, et al. Bistatic micro-Doppler feature of the precessing cone-shaped warhead [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 609-615.

[5] 关永胜, 左群声, 刘宏伟, 等. 空间进动目标微动参数估计方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2427-2432.
Guan Yong-sheng, Zuo Qun-sheng, Liu Hong-wei, et al. Micro-motion parameters estimation of space precession targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2427-2432.

[6] 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方法研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 1-7.
Yuan Bin, Xu Shi-you, 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.

[7] 姚汉英, 孙文峰, 马晓岩. 基于高分辨距离像序列的锥柱体目标进动和结构参数估计[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 537-544.
Yao Han-ying, Sun Wen-feng, and Ma Xiao-yan. Precession and structure parameters estimation of cone-cylinder target based on the HRRPs[J]. *Journal of Electronics & Information*

- Technology*, 2013, 35(3): 537-544.
- [8] 艾晓峰, 邹小海, 李永祯, 等. 基于时间-距离像分布的锥体目标进动与结构特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2083-2088.
Ai Xiao-feng, Zou Xiao-hai, Li Yong-zhen, et al. Feature extraction of precession and structure of cone-shaped object based on time-HRRP distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2083-2088.
- [9] 刘延柱. 陀螺力学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 41-42.
- [10] Chen V C. The Micro-Doppler Effect in Radar[M]. Boston: Artech House, 2010: 127-139.
- [11] Gao Hong-wei, Xie Liang-gui, Wen Shu-liang, et al. Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1969-1982.
- [12] Walter U. Astronautics: The Physics of Space Flight[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co.KGaa, 2012: 513-536.
- [13] 周军. 航天器控制原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001: 80-85.
- [14] Aull A M, Gabel R A, and Gobick T J. Real-time radar image understanding: a machine-intelligence approach[J]. *MIT Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5(2): 195-222.
- [15] Ferrara M, Arnold G, and Stuff M. Shape and motion reconstruction from 3D-to-1D orthographically projected data via object-image relations[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(10): 1906-1912.
- [16] 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): 2076-2082.
Zhang Ying-kang, Xiao Yang, and Hu Shao-hai. Method of scattering center associated and 3D reconstruction for non-cooperative radar target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2076-2082.
- [17] 袁亚湘. 非线性优化计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 197-210.
- [18] 肖顺平, 王雪松, 代大海, 等. 极化雷达成像处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 83-93.
- 洪 灵: 女, 1986年生, 博士生, 研究方向为稀疏信号重构在雷达信号处理中的应用.
- 戴奉周: 男, 1978年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为雷达信号与信息处理.
- 刘宏伟: 男, 1971年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统、雷达信号处理、雷达自动目标识别等.