

基于天基光雷图像融合的空间目标瞬时状态 参数估计方法

李微微, 姜义成*, 张 云

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 太空环境的日益复杂使得对空间目标进行瞬时参数估计及威胁评估成为了空间态势感知领域的研究热点. 目前空间目标成像监视主要由地基雷达或天基光学单一传感器完成, 存在观测视角单一、时效性不足、目标状态参数难以估计等问题. 为此本文首先构建了天基逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 与光学相机成像融合模型, 推导出空间目标在光学及 ISAR 成像平面上的几何投影与瞬时姿态、动力学参数之间的关系表达式. 在此基础上, 基于鲸鱼迁徙优化算法 (Whale Migration Algorithm, WMA) 提出了天基光学图像与雷达 ISAR 图像融合的空间目标瞬时状态参数估计方法, 最后利用融合估计得到等效旋转角速度和角加速度, 实现空间目标几何定标及异动判断. 本文所提方法将光雷融合应用于天基空间目标成像感知领域, 不仅不受传统地基观测方法对观测范围的限制, 同时也避免了天基单传感器单一观测视角的局限性, 可适用于具有复杂运动的空间目标的瞬时状态参数估计. 仿真实验结果表明所提方法可准确估计空间目标瞬时状态参数, 从而有效实现 ISAR 图像方位几何定标及空间目标异动判断.

关键词: 光学-雷达图像融合; 天基探测; 瞬时状态参数估计; 方位几何定标; 异动判断

基金项目: 国家自然科学基金 (No.62401183, No.61971163)

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)08-2624-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250380

Instantaneous State Parameters Estimation of Space Targets Based on Spaceborne Optical-and-Radar Image Fusion

LI Wei-wei, JIANG Yi-cheng*, ZHANG Yun

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The increasing complexity of the space environment has made threat assessment and instantaneous parameter estimation of space objects a research hotspot in the field of space situational awareness (SSA). Current monitoring methods predominantly rely on ground-based radar or space-based optical single sensor, and there are drawbacks such as unidimensional observation angle, insufficient timeliness, and difficulty in estimating target state parameters. To address these issues, this paper first establishes a unified imaging model for spaceborne inverse synthetic aperture radar (ISAR) and optical cameras. The equations correlating the geometric projections of space targets on optical and ISAR imaging planes with their instantaneous attitude and dynamic parameters are derived. Then, based on the whale migration algorithm (WMA), a space target instantaneous state parameter method by fusing spaceborne optical-and-radar images is proposed. Finally, the equivalent rotational angular velocity and angular acceleration, obtained from the fusion estimation, are used to realize the geometric calibration and anomalies detection. The method proposed in this paper applies spaceborne optical and radar fusion to space targets imaging and perception field. It overcomes the constraints of traditional ground-based observation methods on observation range as well as the limitation of spaceborne single-sensor observation angle, suitable for instantaneous state parameter estimation of most space targets with complex motions. Simulation results demonstrate that the proposed method accurately estimates the instantaneous state parameters of space targets, thereby enabling effective geometric calibration of ISAR images and detection of anomalous motions in space objects.

Key words: optical-and-radar image fusion; spaceborne detection; instantaneous state parameter estimation; cross-range geometric calibration; anomaly detection

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62401183, No.61971163)

1 引言

随着空间碎片和在轨航天器数量的持续增加以及太空竞争带来的卫星监视、袭扰与拦截隐患逐渐增强,我国空间资产安全受到了严重威胁.因此,对非合作空间目标进行持续跟踪成像及状态监测,得到其动力学参数、姿态参数等关键信息,并据此分析环境态势、调整卫星自身运行状态、降低碰撞风险,具有重要的现实意义和应用价值^[1-4].

利用地基雷达对低轨空间目标的跟踪、动态监测及高分辨成像技术已较为完善. Duan 等人^[5,6]首次提出利用单站 ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) 图像几何序列识别空间中无先验信息非合作目标的异常运动,提出一种自动化深度神经网络架构,通过稀疏自编码器网络与长短期记忆网络相结合自动提取地基 ISAR 图像序列中的几何特征流,从而快速识别异常动态. 周叶剑等人^[7]提出一种利用地基单站 ISAR 图像序列估计自旋卫星动态参数的方法,通过隐马尔科夫模型描述目标几何结构在 ISAR 图像序列中的投影变化,进而利用 Viterbi 算法解码目标姿态序列,最终采用粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 求解目标瞬时姿态及自旋角速度. 另外, Zhou 等人^[8]还提出利用同步的地基光学图像和 ISAR 图像估计自旋卫星动态参数的新方法,基于投影原理得到目标动态参数与线性特征之间的显式表达式,再利用 PSO 算法完成动态参数估计,可得到相比于仅基于雷达图像序列的传统方法效率和精度更高的估计结果. 而后 Du 等人^[9]又提出将地基多站 ISAR-光学联合观测系统应用于空间目标瞬时姿态估计,并证明了该系统的有效性和鲁棒性. 针对姿态估计过程中线性几何结构提取部分, Cui 等人^[10]提出了一种基于 ISAR 图像峰值积累值的线性几何结构提取方法,可有效提高提取效率和精度. 然而地基雷达位置固定、雷达与空间目标相对距离较远,导致地基雷达对高轨空间目标探测存在着回波信噪比较低、信号传输时延较长、观测范围及过顶时间有限、易受气候环境条件影响等问题,因此地基雷达在空间环境态势评估领域应用上存在不足^[11].

利用星载传感器对空间目标进行跟踪监测可在一定程度上避免地基探测存在的上述问题. 星载传感器对空间目标探测时信号传播距离更短,拥有更大的观测视野和更高的使用频段^[12];同时,面对周围的突发高动态轨道威胁具有更高的处理效率和更强的主动避让风险的运控能力. 在星载 ISAR 对空间目标成像方面,

天基空间目标探测不受目标过顶时间限制,并且能够在更近的距离获得更灵活的观测视角和更大的成像积累角度,可获得分辨率更高的雷达图像. Chen 等人^[13]提出一种基于二维谱和 SIHR 技术的星载 SAR 与 ISAR 混合成像方法,有效解决了对高速运动空间目标高分辨率成像问题. Yuan 等人^[14]将高频太赫兹应用于天基 ISAR 成像,提出一种可用于复杂非刚性振动补偿的 ISAR 成像框架. Liu 等人^[15]也提出了基于最小熵优化的星载 ISAR 高分辨成像方法. 在天基空间目标态势感知方面, Zhou 等人^[16]建立双站星载 ISAR 同步成像系统,基于 ResNet 框架建立特征提取网络,采用混沌蝗虫优化算法求解得到目标姿态参数及自旋运动参数. 进而, Zhou 等人^[17]又提出利用星载光学相机和地面雷达设备同步成像估计卫星动态参数的方法,设计了基于循环对抗策略的雷达到光学特征转换网络,使用 UNET 网络提取投影长度,并利用 PSO 算法得到目标瞬时姿态和自旋速度. 除此之外,天基传感器对空间目标探测应用于目标定轨、目标识别等方面均可实现较好的处理效果^[18-21].

目前常用的空间目标成像监测方法主要集中于地基探测或天基光学单传感器探测,存在时效性不足、观测视角单一、观测范围受限、天基光学传感器易受光照影响等问题,对空间目标的瞬时状态参数估计存在一定局限性.

针对上述问题,本文构建了天基 ISAR 与光学相机成像融合观测模型,利用二者信息的互补性推导出空间目标在光学及 ISAR 成像平面上的几何投影与瞬时姿态、动力学参数之间的关系表达式,并在此基础上基于鲸鱼迁徙优化算法 (Whale Migration Algorithm, WMA) 提出了天基光学图像与雷达 ISAR 图像融合的空间目标瞬时状态参数估计方法,先后得到空间目标上典型结构的尺寸和姿态角以及空间目标的等效旋转角速度、角加速度等瞬时状态参数,最后提出利用融合估计得到的等效旋转角速度和角加速度实现空间目标方位维几何定标及异动判断. 本文提出的融合观测模型以及瞬时状态参数融合估计方法具有更灵活的观测视角和更高的时效性,可获取更丰富的空间目标信息,进而得到更准确的状态参数估计结果. 所提方法对空间目标的瞬时状态参数估计准确度高、稳定性好,并且利用参数估计结果可有效完成定标及异动判断,在空间态势感知领域具有应用价值.

2 天基光雷融合空间目标观测模型

在天基光雷融合观测中,光学相机及成像雷达搭载于观测卫星上,目标卫星和观测卫星分别同时绕地球高速运行.根据空间目标的行为意图及二者相对距离的不同,观测卫星与目标卫星之间的相对运动场景可分为远程、掠飞及异常抵近三种.远程场景下相对距离较远可视为不存在碰撞风险;掠飞场景下相对距离变近,威胁程度提高;异常抵近场景下相对距离快速缩短,碰撞风险极高,此时需对目标卫星连续监测并在必要时实施自主避碰以保证本星安全.本文主要针对掠飞及异常抵近场景下的近距离空间目标进行观测及参数估计,对应的天基观测模型如图1所示.

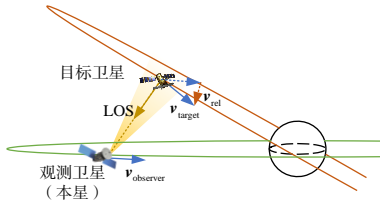


图1 空间目标天基观测模型

假设观测卫星和目标卫星分别以相对于地球中心的速度 $\mathbf{v}_{\text{observer}}$ 和 $\mathbf{v}_{\text{target}}$ 在轨运行,速度矢量方向与轨道相切,那么二者之间的相对速度 \mathbf{v}_{rel} 可表示为

$$\mathbf{v}_{\text{rel}} = \mathbf{v}_{\text{target}} - \mathbf{v}_{\text{observer}} \quad (1)$$

以目标卫星为中心建立笛卡尔坐标系, X 轴始终指向地心, Y 轴为目标卫星速度方向, Z 轴按照右手定则设置为目标轨道平面的法线方向.在该坐标系下,定义雷达视线方向 LOS 从目标卫星指向观测卫星,用单位方向矢量 \mathbf{k} 描述.

$$\mathbf{k} = (\cos \theta(t_s) \sin \varphi(t_s), \cos \theta(t_s) \cos \varphi(t_s), \sin \theta(t_s))^T \quad (2)$$

其中, t_s 代表成像时刻, $\theta(t_s)$ 和 $\varphi(t_s)$ 分别为 t_s 时刻视线方向 \mathbf{k} 在目标坐标系中对应的俯仰角和方位角.

相对运动参数的几何模型如图2所示.其中, $\boldsymbol{\omega}_{\text{LOS}}$ 为视线角速度矢量,与视线方向 \mathbf{k} 垂直.相对速度 \mathbf{v}_{rel} 可分解得到沿视线方向的分量 $\mathbf{v}_{\text{rel}\parallel}$ 和垂直于视线方向的分量 $\mathbf{v}_{\text{rel}\perp}$.其中 $\mathbf{v}_{\text{rel}\parallel}$ 为目标相对径向速度,将用于运动补偿; $\mathbf{v}_{\text{rel}\perp}$ 为相对于观测卫星旋转的瞬时切向速度,其与 $\boldsymbol{\omega}_{\text{LOS}}$ 的关系式如下,式中 R 为两星之间的瞬时相对距离.

$$\mathbf{v}_{\text{rel}\perp} = \boldsymbol{\omega}_{\text{LOS}} \times \mathbf{R}_{\text{LOS}} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{\text{LOS}} = R \cdot \mathbf{k} \quad (4)$$

若目标存在绕自身某一转轴的自旋,目标与雷达之间相对转动的影响因素除上文所提的视线角速度 $\boldsymbol{\omega}_{\text{LOS}}$ 外,将新增自旋角速度 $\boldsymbol{\omega}_{\text{rot}}$,其垂直于 \mathbf{k} 的有效转动分量 $\boldsymbol{\omega}_{\text{rot}\perp}$ 将与多普勒频率相关.

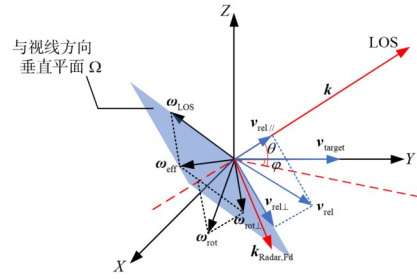


图2 相对运动参数几何模型

在本文中,雷达所在卫星和目标卫星均保持三轴稳定在轨运动,二者之间的相对转动关系如图3所示.在成像积累时间内,目标相对于雷达从初始位置 T_1 运动到终止位置 T_2 ,卫星的相对运动轨迹可分解为 T_1 到 T_2' 绕雷达的转动、 T_2' 到 T_2 沿雷达视线的平动,以及在 T_2' 点处目标绕垂直于该平面方向的转轴的转动.经运动补偿后目标与雷达之间的相对转动仅与视线角速度有关,可等效为匀转台模型. \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 分别为目标上某一几何结构转动前后对应的矢量,二者夹角即可等效为视线方向 LOS 的转动角度.因此,目标等效旋转角速度 $\boldsymbol{\omega}_{\text{eff}}$ 可由视线角速度粗略估计,ISAR 图像方位维定标结果也将由 $\boldsymbol{\omega}_{\text{eff}}$ 决定.

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{eff}} = \boldsymbol{\omega}_{\text{LOS}} \quad (5)$$

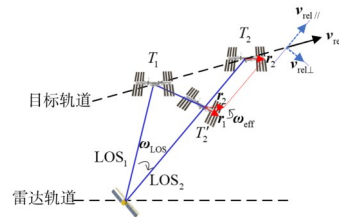


图3 空间目标与雷达相对转动关系

在 $\boldsymbol{\omega}_{\text{eff}}$ 基础上,多普勒方向矢量 $\mathbf{k}_{\text{Radar,Fd}}$ 可根据下式确定,其中 \times 代表矢量叉乘.

$$\mathbf{k}_{\text{Radar,Fd}} = \mathbf{R}_{\text{LOS}} \times \boldsymbol{\omega}_{\text{eff}} \quad (6)$$

目标卫星异常抵近场景包括以抵近侦察、绕飞干扰等为目的的具有极大碰撞风险的变轨运动.本文中异动情况的判断工作将在非合作空间目标向本星抵近过程中的近程导引段进行.该过程对应的异常抵近运动模型如图4所示, $\mathbf{R}_{\text{LOS}}^i$ ($i=1,2,\dots,N$) 代表第 i 个时刻观测卫星与目标卫星之间的相对距离矢量.

与掠飞场景下观测不同,目标卫星处于异常抵近状态时,二者相对距离快速缩短,视线方向变化剧烈,因此其在转移轨道上相对于本星的 $\boldsymbol{\omega}_{\text{LOS}}$ 将随时间产生较大变化, $\boldsymbol{\omega}_{\text{eff}}$ 也将有较高的变化率.因此,本文提出利用等效旋转角加速度 (effective angular acceleration) \mathbf{a}_{eff} 来度量目标卫星的异动程度.

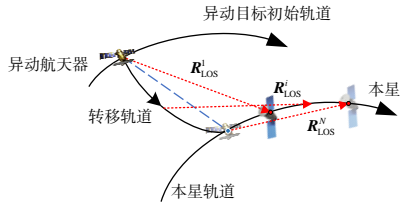


图4 空间目标异常抵近运动模型

$$\mathbf{a}_{\text{eff}} = \frac{\Delta\boldsymbol{\omega}_{\text{eff}}}{\Delta t} \quad (7)$$

其中, Δt 为相邻两个观测节点的时间间隔, $\Delta\boldsymbol{\omega}_{\text{eff}}$ 表示相邻观测对应的瞬时等效旋角速度变化。

光学-雷达融合观测模型利用成像积累时间 (Coherent Processing Interval, CPI) 内的 ISAR 图像和该 CPI 中间时刻对应的光学图像, 实现在某一观测方向上, 相互垂直两个视角下的成像。雷达和光学传感器的成像投影平面关系如图 5 所示, 光学传感器利用光的直线传播原理, 在垂直于雷达视线方向的平面内得到一幅二维仿射投影图像, 其光学纵轴和横轴分别用 $\mathbf{k}_{\text{Optical}, V}$ 和 $\mathbf{k}_{\text{Optical}, U}$ 表示, 二者相互垂直。ISAR 图像的距离维记录目标的径向距离, 方位维包含多普勒频率信息, 图 5 中 $\mathbf{k}_{\text{Radar}, Fd}$ 为多普勒方向矢量, $\mathbf{k}_{\text{Radar}, R}$ 为距离维方向矢量。 $\mathbf{k}_{\text{Optical}, V}$ 、 $\mathbf{k}_{\text{Optical}, U}$ 和 $\mathbf{k}_{\text{Radar}, R}$ 三者相互垂直, 构成三维空间内的一组正交基, 可用来表示空间目标上的任一线性几何结构在地固坐标系下的绝对矢量。

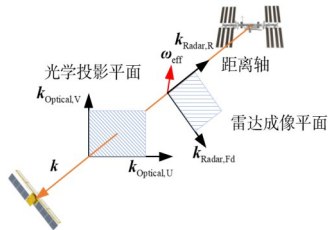


图5 雷达-光学同步观测成像平面模型

值得注意的是, 由于太空中没有散射光, 因此为了获得清晰完整的光学图像, 对空间目标观测时需保证目标处于地球阴影之外, 并且本星处于顺光位置进行观测。

由于不同传感器对目标的成像过程是相互独立的, 因此本文在融合前需先完成空时配准^[22, 23]。将雷达图像与光学图像配准到同一基准时标下, 实现 ISAR 成像积累时间的中间时刻与光学相机成像时刻的同步, 并将不同坐标系下的传感器数据转换到统一观测的坐标系中。光学-雷达图像的时间同步可采用各传感器配备的北斗导航系统, 其授时精度优于 20 ns, 可使雷达-光学图像实现精准的时间同步。

以一组空时匹配的光学-雷达 (ISAR) 成像结果为例, 采用“高分三号”为雷达载星, 国际空间站 (Interna-

tional Space Station, ISS) 作为仿真目标, 得到某一时刻 ISS 在 ISAR 成像平面和光学投影平面上的投影结果, 如图 6 所示。采用多边形拟合等图像处理技术外加人工辅助方法^[24-26], 从光学图像及 ISAR 图像中提取对应的典型几何结构, 如图 6 中的结构 1 和结构 2。

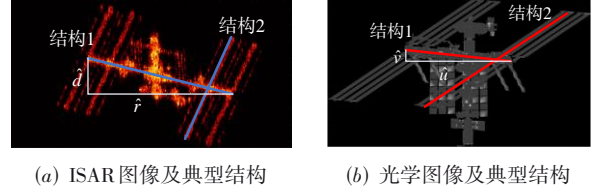


图6 ISS雷达-光学成像结果及典型结构

从图像中可以测得典型几何结构分别在雷达图像距离维、多普勒维、光学图像纵轴和横轴上的投影长度, 分别表示为 \hat{r} 、 \hat{d} 、 \hat{v} 和 \hat{u} , 其中 \wedge 代表变量的实测值。几何结构的投影结果可指导空间目标瞬时状态参数估计过程: 利用某一几何结构对应的 \hat{r} 、 \hat{v} 和 \hat{u} 可估计出该结构的姿态参数, 包括尺寸及其在地固坐标系下的方向矢量; 利用两个典型几何结构分别对应的 \hat{d} 及各自的姿态参数, 可进一步估计得到目标的动力学参数, 包括等效旋角速度及多普勒轴方向矢量。参数估计的具体方法将在后文进行分析。

3 瞬时状态参数估计方法

星载 ISAR 成像依赖于雷达与目标的相对运动, 相比于地基探测, 更近的相对距离导致雷达视线方向变化更加剧烈, 可在更短的成像积累时间内获得更大的成像积累角度, 进而获得更高方位分辨率的 ISAR 图像。通常星载 ISAR 成像积累时间可缩短至 1 s 以内, 因此对应 CPI 的状态参数估计结果可近似为瞬时状态参数。对于运动状态快速变化并且威胁程度很高的异常抵近空间目标, 更短的观测时间将更有利于实时监测其态势。

姿态参数估计方面, 设空间目标上的典型几何结构为 \mathbf{I} , 其在地固坐标系下可表示为以下矢量形式:

$$\mathbf{I} = L(\cos \alpha \sin \beta, \cos \alpha \cos \beta, \sin \alpha)^T \quad (8)$$

其中, α 和 β 分别表示典型几何结构的俯仰角和方位角, L 表示典型结构的 3D 长度。

根据成像结果可以得到目标结构 \mathbf{I} 在雷达图像距离维、光学图像纵轴和横轴上的投影长度, 分别表示为 \hat{r} 、 \hat{v} 和 \hat{u} 。利用此三维投影数据, 可估计空间目标上每一个几何结构对应的姿态角 (俯仰角和方位角) 和尺寸。

$$\begin{cases} \mathbf{k}_{\text{Radar}, R} \cdot \mathbf{I} = \hat{r} \\ \mathbf{k}_{\text{Optical}, U} \cdot \mathbf{I} = \hat{u} \\ \mathbf{k}_{\text{Optical}, V} \cdot \mathbf{I} = \hat{v} \end{cases} \quad (9)$$

上式可以对每个典型几何结构独立建立,并转换为优化式,即

$$\min_{\alpha, \beta, L} \left(\mathbf{k}_{\text{Radar, R}} \cdot \mathbf{I} - \hat{r} \right)^2 + \left(\mathbf{k}_{\text{Optical, U}} \cdot \mathbf{I} - \hat{u} \right)^2 + \left(\mathbf{k}_{\text{Optical, V}} \cdot \mathbf{I} - \hat{v} \right)^2 \quad (10)$$

采用鲸鱼迁徙优化算法(WMA)求解得到姿态参数的最优估计值 $(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{L})^T$,进而可求得典型结构在地固坐标系下的三维矢量表示如式(11),式中 \sim 代表变量的估计值.

$$\tilde{\mathbf{I}} = \tilde{L} (\cos \tilde{\alpha} \sin \tilde{\beta}, \cos \tilde{\alpha} \cos \tilde{\beta}, \sin \tilde{\alpha})^T \quad (11)$$

动力学参数方面,光学投影平面的纵轴 $\mathbf{k}_{\text{Optical, V}}$ 和横轴 $\mathbf{k}_{\text{Optical, U}}$ 均位于与LOS垂直的平面 Ω 内,二者可作为该平面的一组单位正交基.多普勒轴 $\mathbf{k}_{\text{Radar, Fd}}$ 与视线方向LOS垂直,因此 $\mathbf{k}_{\text{Radar, Fd}}$ 可利用 $\mathbf{k}_{\text{Optical, V}}$ 和 $\mathbf{k}_{\text{Optical, U}}$ 线性表示,如式(12)所示.式中 θ_{optical} 代表多普勒轴与纵轴之间的夹角.

$$\mathbf{k}_{\text{Radar, Fd}} = \cos \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, V}} + \sin \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, U}} \quad (12)$$

ISAR图像多普勒维的投影结果 \hat{d} 代表相对运动带来的几何结构 \mathbf{I} 对应的多普勒频宽.该多普勒频宽与 \mathbf{I} 的方位维尺寸之间存在比例关系,该比例系数与等效旋转角速度 ω_{eff} 密切相关.

$$d = 2\omega_{\text{eff}} \mathbf{k}_{\text{Radar, Fd}} \cdot \mathbf{I} / \lambda \quad (13)$$

下面基于式(12)来对 $\mathbf{k}_{\text{Radar, Fd}}$ 进行估计.首先,从一组同步的光学图像及ISAR图像中分别对应提取两个典型几何结构 \mathbf{I}_1 和 \mathbf{I}_2 ,二者在多普勒轴上的投影之比可表示如下:

$$\frac{\hat{d}_1}{\hat{d}_2} = \frac{\omega_{\text{eff}} \mathbf{k}_{\text{Radar, Fd}} \cdot \mathbf{I}_1}{\omega_{\text{eff}} \mathbf{k}_{\text{Radar, Fd}} \cdot \mathbf{I}_2} \quad (14)$$

其中, \hat{d}_1 和 \hat{d}_2 为两个几何结构分别对应的实测多普勒频宽. \mathbf{I}_1 和 \mathbf{I}_2 的矢量结果可由式(11)估计得到.

将式(12)代入到式(14),可以得到:

$$\frac{\hat{d}_1}{\hat{d}_2} = \frac{(\cos \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, V}} + \sin \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, U}}) \cdot \tilde{\mathbf{I}}_1}{(\cos \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, V}} + \sin \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, U}}) \cdot \tilde{\mathbf{I}}_2} \quad (15)$$

将其转化为下面的优化问题,可利用WMA估计得到多普勒轴与光学图像纵轴的夹角 $\tilde{\theta}_{\text{optical}}$ 的最优解.

$$\min_{-\pi \leq \theta_{\text{optical}} \leq \pi} \left| \frac{(\cos \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, V}} + \sin \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, U}}) \cdot \tilde{\mathbf{I}}_1}{(\cos \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, V}} + \sin \theta_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, U}}) \cdot \tilde{\mathbf{I}}_2} - \frac{\hat{d}_1}{\hat{d}_2} \right| \quad (16)$$

据此,该时刻对应的多普勒轴方向矢量估计值 $\tilde{\mathbf{k}}_{\text{Radar, Fd}}$ 可求:

$$\tilde{\mathbf{k}}_{\text{Radar, Fd}} = \cos \tilde{\theta}_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, V}} + \sin \tilde{\theta}_{\text{optical}} \mathbf{k}_{\text{Optical, U}} \quad (17)$$

在此基础上,ISAR成像投影平面方向可确定为 $\tilde{\mathbf{k}}_{\text{Radar, Fd}} \times \mathbf{R}_{\text{LOS}}$.

将多普勒轴方向矢量 $\tilde{\mathbf{k}}_{\text{Radar, Fd}}$ 以及典型几何结构的

三维矢量 \mathbf{I} 代入式(13),可估计当前时刻空间目标相对于雷达的等效旋转角速度大小 ω_{eff} .该结果可用于ISAR成像方位维定标.

$$\begin{cases} 2\omega_{\text{eff}} \tilde{\mathbf{k}}_{\text{Radar, Fd}} \cdot \tilde{\mathbf{I}}_1 / \lambda = \hat{d}_1 \\ 2\omega_{\text{eff}} \tilde{\mathbf{k}}_{\text{Radar, Fd}} \cdot \tilde{\mathbf{I}}_2 / \lambda = \hat{d}_2 \end{cases} \quad (18)$$

同样将其转换为下面的优化问题,利用WMA估计得到最优 $\tilde{\omega}_{\text{eff}}$.

$$\min_{\omega_{\text{eff}}} \left(2\omega_{\text{eff}} \tilde{\mathbf{k}}_{\text{Radar, Fd}} \cdot \tilde{\mathbf{I}}_1 / \lambda - \hat{d}_1 \right)^2 + \left(2\omega_{\text{eff}} \tilde{\mathbf{k}}_{\text{Radar, Fd}} \cdot \tilde{\mathbf{I}}_2 / \lambda - \hat{d}_2 \right)^2 \quad (19)$$

根据右手定则, ω_{eff} 方向为 $\mathbf{k}_{\text{Radar, Fd}} \times \mathbf{k}$ 方向,因此:

$$\tilde{\omega}_{\text{eff}} = \tilde{\omega}_{\text{eff}} \mathbf{k}_{\text{Radar, Fd}} \times \mathbf{k} \quad (20)$$

等效转动角速度 ω_{eff} 不仅可作为方位维定标的必要参数,完善高分辨ISAR图像信息,同时可用作判断目标异动情况的重要变量.为判断目标是否存在抵近观察、恶意碰撞等异动行为,可利用多帧数据得到连续多个时刻的 $\tilde{\omega}_{\text{eff}}$ 估计值,进而根据式(7)得到各帧对应的等效旋转角加速度,依据其大小可有效判断目标态势.

由式(16)及式(19)可以看到,当ISAR及光学图像中能够精确观测到至少两组对应的几何结构的情况下,本算法可用来进行状态参数估计.

本文利用鲸鱼迁徙优化算法(WMA)对式(10)、式(16)及式(19)所示的三步极值问题进行优化求解,依次估计得到该时刻下目标典型几何结构的三维矢量、多普勒轴方向矢量及等效旋转角速度大小.WMA通过建立领航者-跟随者的双引导模式,提高了收敛速度以及问题求解的准确度;在个体运动过程中引入随机搜索,有效平衡了开发和探索过程,突破局部最优,提高了全局搜索能力.因此,相对于传统的仅依赖单一搜索对象的优化算法,该算法在处理多模态、高维及非凸优化问题上更具优势.WMA的具体实现步骤如算法1所示.

综上所述,本文提出的基于天基光雷图像融合的空间目标瞬时状态参数估计方法的具体流程如图7所示,利用瞬时参数估计结果可得到该时刻目标上几何结构的姿态,完成ISAR图像的方位维定标并确定ISAR成像投影平面,实现对空间目标的异动判断.

4 实验及分析

针对上文提出的三步优化过程,分别利用WMA与传统的PSO两种优化算法进行对比实验.并采用本文提出的天基光雷图像融合方法,针对掠飞场景下的低轨国际空间站(ISS)目标做瞬时状态参数估计.最后,针对异常抵近场景下的高轨跟踪与数据传输卫星

算法 1 鲸鱼迁徙优化算法(WMA)

输入: 最大迭代次数 $Iter_{max}$, 鲸鱼迁徙种群个体总数 N_{pop} , 领导者数量 N_L , 问题中变量的上下界向量 L 和 U .

输出: 优化问题的最优解 $Best_pos$.

1. 种群初始化: 随机设定种群中个体的初始位置 $(W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_{N_{pop}})$, 其中 $W_i = (w_{i,1}, w_{i,2}, \dots, w_{i,D})$, D 为目标函数解的维数.

$W_i = L + \text{rand}(1, D) \odot (U - L), i = 1, 2, \dots, N_{pop}$ (\odot 代表向量的 Hadamard 积) 计算种群每个个体处的目标函数值 $f(W_i)$.

2. 按照种群中全部个体的目标函数值从优到劣排序, 提取前 N_L 条“鲸鱼”作为种群的“领导者”, 当前时刻种群的最优位置为 W_{Best} . 整个种群的当前位置可由全部“领导者”位置的均值 W_{Mean} 描述.

$$W_{Mean} = \frac{1}{N_L} \sum_{j=1}^{N_L} W_j$$

3. “跟随者”位置迭代: 当迭代后新位置的适应度更优, 即 $f(W_i^{new}) \leq f(W_i)$ 时, 则更新其为该个体当前位置, 否则保持原位置不变.

$$W_i^{new} = W_{Mean} + \text{rand}(1, D) \odot (W_{i-1} - W_i) + \text{rand}(1, D) \odot (W_{Best} - W_{Mean})$$

4. “领航者”识别并选择最优路线. 同样当 $f(W_i^{new}) \leq f(W_i)$ 时更新对应个体位置.

$$W_i^{new} = W_i + \text{rand}(1, D) \odot L + \text{rand}(1, D) \odot \text{rand}(1, D) \odot (U - L)$$

5. 返回步骤 2, 进行下一轮循环. 如果当前迭代次数等于 $Iter_{max}$, 则选择全局最佳位置作为最优解; 否则进行下一次迭代, 直到迭代结束.

(Tracking and Data Relay Satellites, TDRS) 做连续 5 个时刻的瞬时状态参数估计, 以及分析 ISAR 图像散焦对参数估计精度的影响, 评估所提方法的性能, 并完成 ISAR 图像方位维定标及异动判断. 仿真过程重点考虑了几何特征提取的准确度对各参数估计精度的影响, 忽略了雷达系统误差及空时配准误差对实验结果造成的影响, 并且仅针对三轴稳定空间目标进行研究.

4.1 WMA 与 PSO 算法优化效果对比

根据式 (10)、式 (16) 及式 (19) 的参数估计需求, 本文需要先后完成三步优化.

第一步优化为一个三维问题, 用以估计空间目标几何结构的尺寸及姿态角. 种群中个体位置可表示为 $W_i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$, 其对应的适应度函数为

$$J = \left(k_{Radar,R} \cdot I - \hat{r} \right)^2 + \left(k_{Optical,U} \cdot I - \hat{u} \right)^2 + \left(k_{Optical,V} \cdot I - \hat{v} \right)^2 \tag{21}$$

第二步优化可估计多普勒轴与光轴纵轴夹角 $\theta_{optical}$ 的最优解, 该一维问题的适应度函数为

$$J = \left| \frac{(\cos \theta_{optical} k_{Optical,V} + \sin \theta_{optical} k_{Optical,U}) \cdot \tilde{I}_1 - \hat{d}_1}{(\cos \theta_{optical} k_{Optical,V} + \sin \theta_{optical} k_{Optical,U}) \cdot \tilde{I}_2 - \hat{d}_2} \right| \tag{22}$$

第三步优化是在前两步得到的最优解的基础上, 进一步将 WMA 应用于对等效旋转角速度 ω_{eff} 最优值的求解, 构建一维适应度函数如式 (23).

$$J = \left(2\omega_{eff} \tilde{k}_{Radar,Fd} \cdot \tilde{I}_1 / \lambda - \hat{d}_1 \right)^2 + \left(2\omega_{eff} \tilde{k}_{Radar,Fd} \cdot \tilde{I}_2 / \lambda - \hat{d}_2 \right)^2 \tag{23}$$

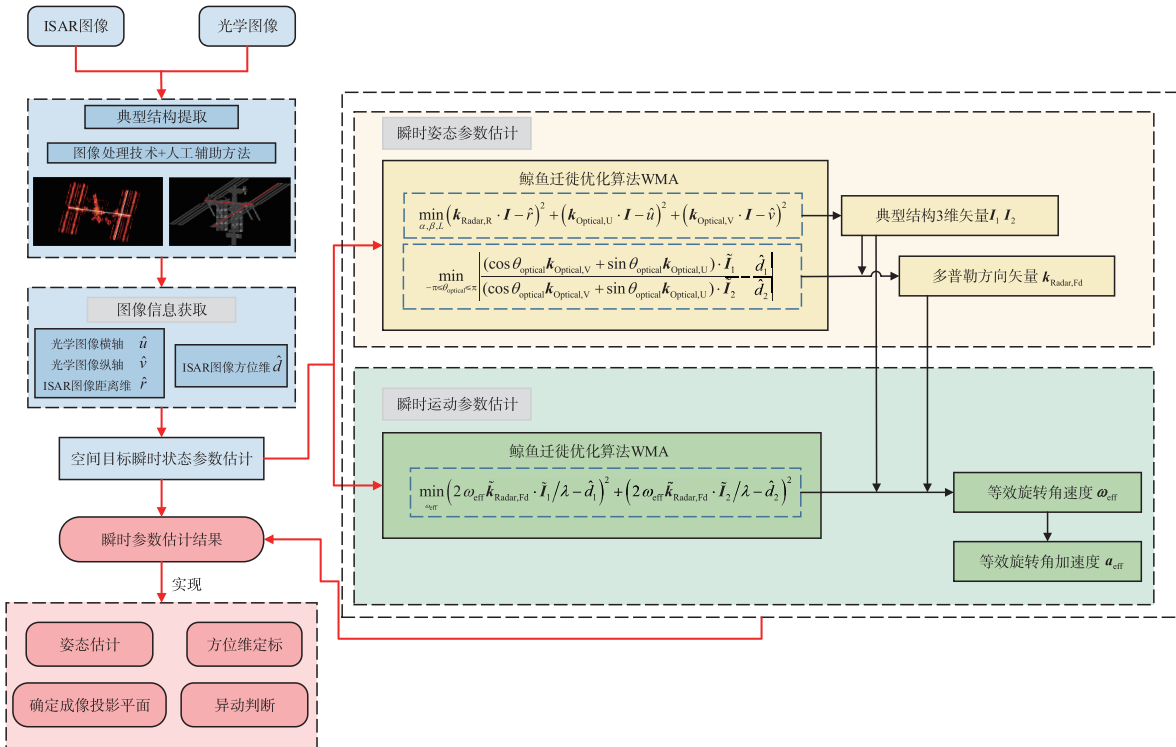


图7 基于天基光学-雷达图像融合的空间目标瞬时参数估计流程图

针对上述三种适应度函数,本文分别利用 WMA 算法与传统的粒子群优化算法(PSO)在相同的实验条件下进行对比,以评估二者的优化效果和效率. 每个算法在每个函数上分别执行 30 次,最大迭代次数均设置为 1 000. 两种算法的参数设置如表 1 所示.

表 1 WMA 与 PSO 优化算法参数设置

算法	参数	值
WMA	种群个体总数	$N_{\text{pop}} = 60$
	“领航者”数量	$N_L = 30$
PSO	粒子总数	$N_{\text{pop}} = 60$
	惯性权重	$w_{\text{initial}} = 1$
	惯性权重阻尼比	$w_{\text{damp}} = 0.99$
	全局学习系数	$c_2 = 2.0$
	个体学习系数	$c_1 = 1.5$

从表 1 可以看到,WMA 所需的控制参数较少,意味着对不同函数适用性将更广泛,优化过程更为简单、稳健. 图 8 分别展示了上述三个函数对应的迭代收敛曲线,可以看到 WMA 的收敛速度明显优于传统的 PSO 算法,证实了 WMA 所提出的双引导策略可有效提高收敛速度.

将两种算法在三个适应度函数上分别得到的优化结果列于表 2,表中最佳适应度的最优值、均值及标准差为三个评估指标. 可以看到,在一维适应度函数(函数 2、函数 3)上两种算法均有较好的收敛效果. 但是在多维适应度函数中(函数 1),WMA 算法优势明显,其优化精度和鲁棒性均明显优于 PSO 算法. 综合看来,WMA 算法在本文所研究的空间目标状态参数估计的应用中更为稳定、有效.

4.2 掠飞场景下的参数估计

掠飞场景仿真采用“高分 3 号”卫星作为雷达载星,利用 LFM 脉冲信号对在轨掠飞场景下的 ISS 目标进行探测,雷达参数设置如表 3 所示.

在掠飞场景下采用 ISS 目标散射点模型,基于时变大转角空间目标星载 ISAR 高分辨成像方法得到先后两个时刻的高分辨 ISAR 图像仿真结果^[27],如图 9(a)及图 10(a)所示. 该方法利用了方位维转动补偿及非均匀重采样方法,在实现方位维高分辨的同时消除非线性分量引起的方位维散焦,从而得到高分辨聚焦图像. 与

表 2 WMA 与 PSO 优化结果对比

适应度函数	优化结果	WMA	PSO
函数 1	最佳适应度最优值	1.26×10^{-29}	1.26×10^{-29}
	最佳适应度均值	1.52×10^{-29}	9.78×10^{-4}
	最佳适应度标准差	9.61×10^{-30}	1.85×10^{-4}
函数 2	最佳适应度最优值	7.89×10^{-31}	7.89×10^{-31}
	最佳适应度均值	2.26×10^{-9}	7.89×10^{-31}
	最佳适应度标准差	4.50×10^{-9}	0
函数 3	最佳适应度最优值	8.08×10^{-28}	8.08×10^{-28}
	最佳适应度均值	8.08×10^{-28}	8.08×10^{-28}
	最佳适应度标准差	0	0

表 3 掠飞场景下仿真雷达参数

参数	载频	带宽	脉冲宽度	脉冲重频	积累时间
取值	5.4 GHz	240 MHz	20 μ s	8 kHz	1 s

此同时,得到两个时刻分别对应的空间目标光学图像,如图 9(b)及图 10(b)所示. 在此基础上,利用图像处理及人工辅助方法提取典型几何结构,同一结构用相同颜色进行标识.

由于图像成像质量、图像分辨率、环境扰动以及图像处理算法效果等均在一定程度上影响了几何结构提取的准确度,进而会影响各参数的估计精度. 因此,本实验采用多次重复提取几何结构,进而使用求解结构矢量均值的方法降低结构提取误差. 并且采用蒙特卡洛实验验证所提瞬时状态参数估计方法的稳定性和鲁棒性. 几何结构的提取误差用该线性结构两端点分别在 ISAR 图像距离轴、多普勒轴以及光学图像纵轴、横轴上的定位误差来衡量,分别表示为 e_r 、 e_d 、 e_v 和 e_u . 首先,通过随机抽样来模拟几何结构提取过程中的随机误差,进行 100 次随机试验,输出各几何结构矢量 I_{ij} ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, 100$) 的均值 $E(I_i)$ ($i = 1, 2, 3, 4$),其中 i 代表典型结构序号, j 代表随机试验次数. 而后,将 $E(I_i)$ 的模值和角度作为对应几何结构姿态参数的最终估计结果,并将其作为式(21)~式(23)的输入进一步得到多普勒轴方向矢量以及等效旋转角速度估计值.

时刻 1 的状态参数估计结果如表 4. 可以看到,利用所提方法估计得到的状态参数大小与方向矢量均与真实值接近,误差较小. 结构尺寸估计误差可达 10 cm

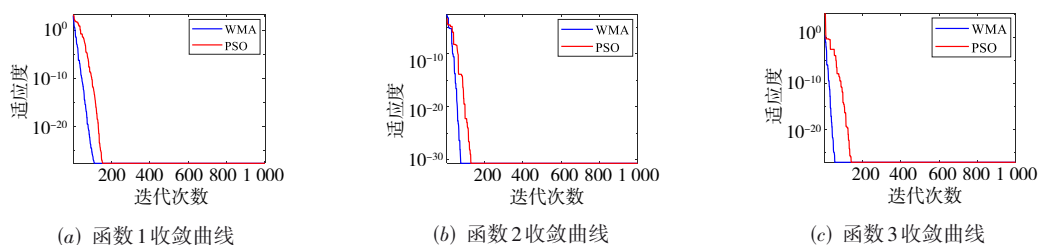


图 8 三种函数下两类优化算法收敛效果对比图

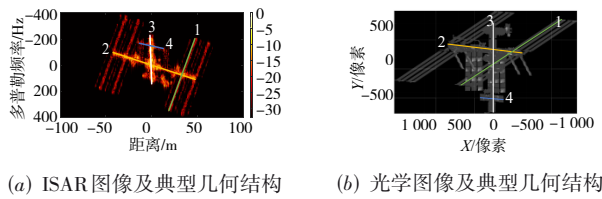


图9 ISS雷达-光学成像结果及典型几何结构

方向矢量角度误差在 1° 以内. 实验结果验证了所提方法对空间目标状态参数估计的合理性和准确性.

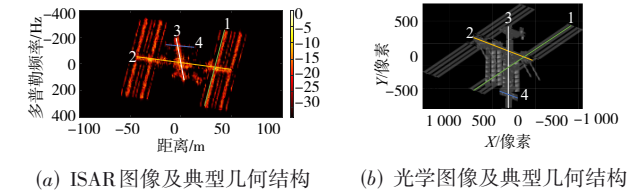


图10 ISS雷达-光学成像结果及典型几何结构(时刻2)

以内,几何结构的方向矢量角度误差在 1° 以下,等效旋转角速度估计误差小于 0.01 rad/s ,等效旋转角速度

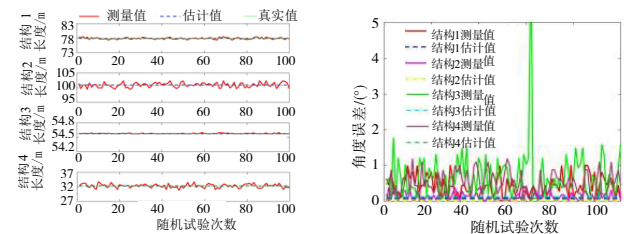
表4 掠飞场景下ISS瞬时状态参数估计结果(时刻1)

参数	估计值	真实值	误差
结构1方向矢量	[0.001 6,0.873 7, -0.486 6]	[0.000 0,0.873 4, -0.487 0]	$0.096 9^\circ$
结构1长度	77.948 9 m	77.897 m	0.052 0 m
结构2方向矢量	[-1.000 0, -0.004 1,0.002 2]	[-1.000 0, -0.003 8,0.002 2]	$0.018 2^\circ$
结构2长度	100.914 6 m	100.849 8 m	0.064 8 m
结构3方向矢量	[-0.006 0,0.119 6, -0.992 8]	[-0.004 7,0.121 4, -0.992 6]	$0.128 9^\circ$
结构3长度	54.566 3 m	54.574 7 m	0.008 4 m
结构4方向矢量	[-1.000 0, -0.001 2, -0.003 0]	[-1.000 0, -0.002 2, -0.003 1]	$0.058 7^\circ$
结构4长度	32.225 m	32.291 8 m	0.066 7 m
多普勒轴方向矢量	[0.258 9, -0.597 0,0.759 3]	[0.257 6, -0.594 6,0.761 6]	$0.203 8^\circ$
等效旋转角速度	0.207 8 rad/s	0.211 2 rad/s	0.003 4 rad/s
等效旋转角速度方向矢量	[0.362 7, -0.668 5, -0.649 2]	[0.363 6, -0.670 6, -0.646 5]	$0.203 8^\circ$

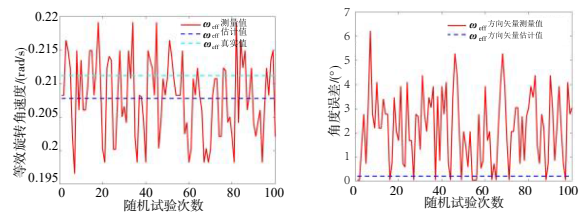
图11记录了100次随机试验中利用每次试验单独得到的 $I_{ij} (i=1,2,3,4; j=1,2,\dots,100)$ 分别独立估计几何结构长度 \tilde{L} (如图11(a))、几何结构的方向矢量估计值与真实值夹角 $\Delta\tilde{\theta}$ (如图11(b))、等效旋转角速度大小 $\tilde{\omega}_{\text{eff}}$ (如图11(c))、 $\tilde{\omega}_{\text{eff}}$ 方向矢量估计值与真实值夹角 $\Delta\tilde{\theta}_{\omega}$ (如图11(d))四种变量的测量值,并将其与利用结构矢量均值 $E(I_i) (i=1,2,3,4)$ 求得的各参量的估计值进行对比,做出对比曲线如图11所示.

由图11蒙特卡洛实验结果可以看到,几何结构提取的误差具有随机性,给各参量的估计精度和稳定性带来了较大影响. e_r, e_d, e_v, e_u 这四个维度上的随机误差共同作用,导致几何结构的角度估计结果具有较大波动,甚至会存在角度误差达到 5° 左右的极端情况,如图11(b)所示. 为消除极端值影响,得到更稳健可靠的估计结果,可将极端值去掉再进一步求典型几何结构矢量均值. 从图11中可以看到,利用几何结构矢量均值 $E(I_i)$ 求得的各参量的估计值与真实值相比误差很小,证明多次重复实验求均值可以有效提高所提取的几何结构的准确度,进而使得各参数的估计值精度明显提升.

为验证所提方法在不同时刻的普适性,与上一时刻间隔5 s选取另一个CPI进行瞬时状态参数估计,时



(a) 典型结构长度测量值与真实值对比 (b) 典型结构方向矢量角度误差



(c) 等效旋转角速度估计与测量值、真实值对比 (d) 等效旋转角速度方向矢量误差

图11 蒙特卡洛实验得到变量的测量值和估计值对比图

刻2对应的成像结果和提取的典型几何特征如图10所示.

经100次随机试验求得典型几何结构矢量的均值,进而得到各状态参数估计结果如表5所示.

表 5 掠飞场景下 ISS 目标瞬时状态参数估计结果(时刻 2)

参数	估计值	真实值	误差
结构 1 方向矢量	[0.002 4, 0.873 8, -0.486 3]	[0.000 0, 0.873 4, -0.487 0]	0.143 4°
结构 1 长度	77.946 9 m	77.897 m	0.050 0 m
结构 2 方向矢量	[-1.000 0, -0.003 9, 0.002 2]	[-1.000 0, -0.003 8, 0.002 2]	0.004 4°
结构 2 长度	100.868 1 m	100.849 8 m	0.018 3 m
结构 3 方向矢量	[-0.007 1, 0.120 4, -0.992 7]	[-0.004 7, 0.121 4, -0.992 6]	0.145 3°
结构 3 长度	54.589 m	54.574 7 m	0.014 3 m
结构 4 方向矢量	[-1, -0.001 1, -0.002 7]	[-1.000 0, -0.002 2, -0.003 1]	0.068 7°
结构 4 长度	32.199 6 m	32.291 8 m	0.092 1 m
多普勒轴方向矢量	[0.143 6, -0.656 6, 0.740 5]	[0.138 7, -0.647 6, 0.749 3]	0.775 1°
等效旋转角速度	0.204 4 rad/s	0.208 8 rad/s	0.004 4 rad/s
等效旋转角速度方向矢量	[0.361 7, -0.661 6, -0.656 8]	[0.363 6, -0.670 5, -0.646 8]	0.775 1°

从表 5 可以看到,在该时刻下各状态参数的估计值同样具有较高的精度,证明了所提方法参数估计效果不受观测时刻的影响,在不同时刻下均具有可行性.

根据融合观测模型构建部分所述的异常抵近原理,可用等效旋转角速度的平均变化率(即等效旋转角加速度)来判断空间目标是否存在异动.上述两个时刻的等效旋转角速度估计值及求得的角加速度如表 6 所示.

表 6 掠飞场景下等效旋转角加速度估计结果

参数	估计值	
等效旋转角速度	CPI1	[0.075 7, -0.138 9, -0.134 9]
	CPI2	[0.073 9, -0.135 2, -0.134 2]
等效旋转角加速度	方向矢量	[-0.000 3, 0.000 7, 0.000 1]
	模值	0.000 8 rad/s ²

4.3 异常抵近场景下的参数估计

为验证所提方法对具有不同结构特点以及不同轨道高度的空间目标适用性,本节将空间目标换成高轨 TDRS 卫星,以仿真模拟高轨空间目标异常抵近的场景.仿真雷达参数、雷达与空间目标的相对运动参数分别如表 7 和表 8 所示.抵近过程中二者之间的径向距离快速缩短,相对径向速度较大且快速变化.雷达与空间目标相对距离的变化曲线如图 12(a)所示,二者的径向速度和相对径向速度变化曲线如图 12(b)所示.选取高速抵近的近距阶段进行仿真实验,图 12 中红圈处表示了进行状态参数估计的 5 个时刻下雷达与目标的相对运动参数.

抵近过程中较大的相对径向速度以及加速度会导

表 7 异常抵近场景下仿真实验雷达参数

参数	载频	带宽	脉冲宽度	脉冲重频	积累时间	距离分辨率	多普勒分辨率
取值	94 GHz	2 GHz	20 μs	1 kHz	0.33 s	0.075 m	3.33 Hz

表 8 异常抵近场景下目标与雷达相对运动参数

参数	目标速度/(km/s)	雷达速度/(km/s)	目标初始径向速度/(km/s)	雷达初始径向速度/(km/s)	初始相对距离/(km)
取值	3.076 3	3.075 3	1.227	-0.205	10.778

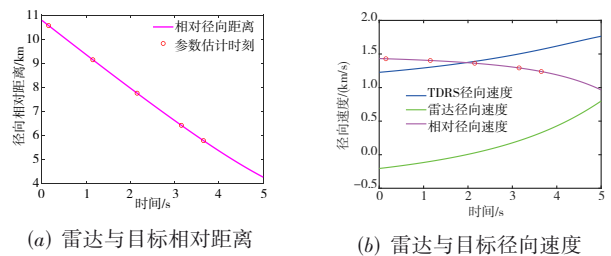
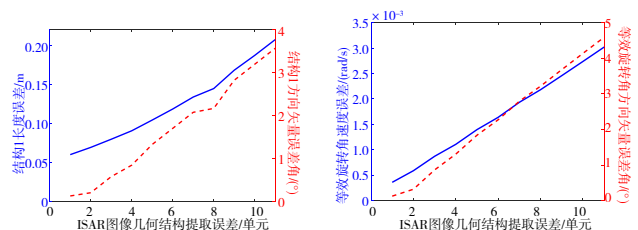


图 12 异常抵近过程中雷达与空间目标运动参数变化曲线

致空变脉内走动不可忽略,并且多普勒频率存在非线性空变特征,因此 ISAR 图像有可能产生一定程度的散焦.散焦会直接导致几何特征提取误差变大进而影响状态参数估计精度.各参数估计误差随 ISAR 图像上线性结构提取误差变化曲线如图 13 所示.可以看到,当 ISAR 图像出现散焦时,几何结构提取误差变大,各状态参数的估计误差也变大.当提取误差小于 3 个分辨单元时,结构的长度误差小于 0.1 m,结构矢量误差角小于 1°,等效旋转角速度误差小于 0.001 rad/s,等效旋转角



(a) 结构 1 长度误差及方向矢量 (b) 等效旋转角速度大小误差及方向矢量误差角

图 13 状态参数估计误差随 ISAR 图像散焦变化曲线

速度方向矢量误差角小于 1° , 证明所提方法在轻微散焦的情况下也可以得到较好的状态参数估计结果。

目前已存在较为成熟的星载 ISAR 高分辨率成像方法, 可有效补偿目标与雷达之间复杂且不均匀的相对运动带来的二维空变相位误差, 获得聚焦良好的 ISAR 图像^[15]。本节研究以该成像方法作为技术支撑得到聚焦高分辨 ISAR 图像, 如图 14(a) 所示, 进而在此基础上实现参数估计。

图 14(a) 和图 14(b) 中展示了连续 5 个时刻的

TDRS 卫星光学-雷达成像结果以及提取的两组典型几何结构, 可以看到, 随着目标的抵近, 其相对姿态持续发生变化。在几何结构提取过程中 100 次随机试验设置线性结构端点处的距离维提取误差在 3 个距离分辨单元以内, 多普勒维提取误差在 1 个多普勒频率分辨单元范围内, 在光学图像纵横轴上的提取误差设置在 3 个像素以内。分别对每个时刻进行独立的瞬时状态参数估计, 并与各自真实值对比进行误差分析, 误差分析结果列于表 9。

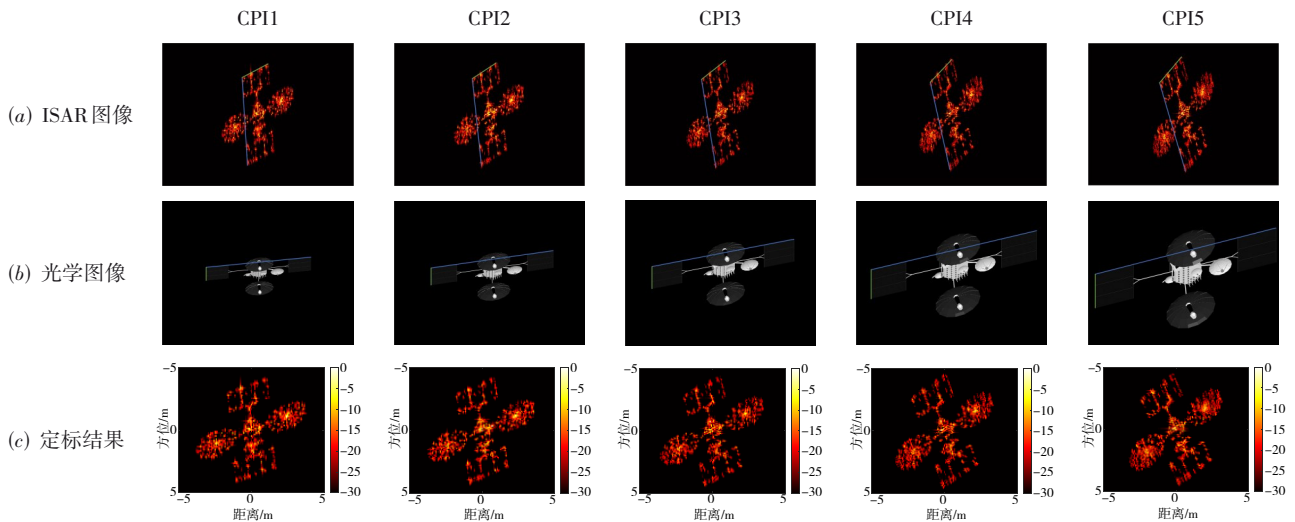


图 14 连续 5 个时刻 TDRS 成像结果、典型结构及定标结果

表 9 TDRS 卫星连续 5 个时刻瞬时状态参数估计误差

时刻	相对距离/km	结构 1 长度 误差/m	结构 1 方向矢量 误差角/($^\circ$)	结构 2 长度 误差/m	结构 2 方向矢 量误差角/($^\circ$)	等效旋转角 速度误差/(rad/s)	等效旋转角速度方 向矢量误差角/($^\circ$)
时刻 1	10.563 2	0.060 4	0.144 7	0.058 4	0.275 8	0.000 3	0.116 4
时刻 2	9.145 9	0.046 5	0.150 8	0.086 4	0.205 0	0.001 2	0.568 2
时刻 3	7.761 3	0.003 3	0.545 0	0.029 8	0.028 3	0.000 8	0.226 4
时刻 4	6.430 4	0.034 5	0.341 9	0.034 3	0.253 9	0.003 6	0.177 5
时刻 5	5.796 9	0.008 2	0.155 9	0.085 5	0.272 9	0.002 3	0.598 7

根据表 9 中瞬时等效旋转角速度估计结果, 各时刻的等效转速大小估计误差小于 0.01 rad/s , 可完成高分辨 ISAR 图像方位维定标并具有较好的定标精度, 如图 14(c) 所示。从表 9 可以看到, 空间目标异常抵近场景下各时刻对应的瞬时状态参数估计结果准确度均较高, 表明所提方法可有效适用于对存在复杂运动的空间目标的长时间连续探测。尤其针对短时间存在大幅

度相对姿态变化的异动目标, 其相对转动角速度大, 能够在较短的积累时间内得到高精度 ISAR 图像, 进而得到更准确的瞬时参数估计结果。

基于上述求得的连续多时刻瞬时等效旋转角速度估计值, 可进一步计算对应的等效旋转角加速度, 即相邻两时刻之间的瞬时等效旋转角速度平均变化率, 如表 10 所示。

表 10 异常抵近场景下等效旋转角加速度仿真结果

参数		时刻 1—时刻 2	时刻 2—时刻 3	时刻 3—时刻 4	时刻 4—时刻 5
等效旋转角加速度	方向矢量	[0.008 5, 0.012 7, 0.003 8]	[0.012 5, 0.016 0, 0.005 8]	[0.019 1, 0.027 6, 0.008 5]	[0.017 1, 0.021 5, 0.008 5]
	模值	0.015 7 rad/s^2	0.021 1 rad/s^2	0.034 6 rad/s^2	0.028 8 rad/s^2

由表 10 可得, 当空间目标存在异常抵近运动时, 其瞬时等效旋转角加速度大小在 10^{-2} 量级, 与掠飞场景下

(见表 6) 相比明显增大。实验结果证实了等效旋转角加速度可以作为判断空间目标是否存在异动的重要且有

效的评判标准.

5 结论

本文结合天基光雷融合观测的优势,首先构建了天基 ISAR 与光学相机的成像融合观测模型,推导出空间目标在光学及 ISAR 成像平面上的几何投影与瞬时姿态、动力学参数之间的关系表达式.并在此基础上,提出了一种基于鲸鱼迁徙优化的天基光学-雷达图像融合的空间目标瞬时状态参数估计方法,并利用融合估计得到的空间目标等效旋转角速度及角加速度,实现了 ISAR 图像几何定标及异动判断.仿真实验验证了融合模型和所提方法的有效性,以及对掠飞场景及异常抵近场景下连续多时刻空间目标瞬时状态参数估计的准确性和稳定性,并证实了利用参数估计结果可以实现较高精度的几何定标及有效的异动判断.

参考文献

- [1] 杨虹,张雅声,徐灿.基于 trace 特征的 ISAR 像空间目标识别[J].电子学报,2020,48(3):431-441.
YANG H, ZHANG Y S, XU C. Space target recognition based on trace feature of ISAR image[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 431-441. (in Chinese)
- [2] PERSICO A R, KIRKLAND P, CLEMENTE C, et al. CubeSat-based passive bistatic radar for space situational awareness: A feasibility study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(1): 476-485.
- [3] AFSHAR S, NICHOLSON A P, VAN SCHAİK A, et al. Event-based object detection and tracking for space situational awareness[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(24): 15117-15132.
- [4] WANG M H, FENG D Z, WANG H, et al. Improved light-weight saliency model based on neural network for noncooperative spacecraft detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2025, 61(1): 642-654.
- [5] DUAN J, XIE P F, ZHANG L, et al. Space target dynamic identification by exploiting geometrical feature flow from ISAR image sequences[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(22): 21877-21884.
- [6] DUAN J, MA Y, ZHANG L, et al. Abnormal dynamic recognition of space targets from ISAR image sequences with SSAE-LSTM network[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 5102916.
- [7] ZHOU Y J, WEI S P, ZHANG L, et al. Dynamic estimation of spin satellite from the single-station ISAR image sequence with the hidden Markov model[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(5): 4626-4638.
- [8] ZHOU Y J, ZHANG L, CAO Y H, et al. Optical-and-radar image fusion for dynamic estimation of spin satellites[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 2963-2976.
- [9] DU R Z, LIU L, BAI X R, et al. Instantaneous attitude estimation of spacecraft utilizing joint optical-and-ISAR observation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5112114.
- [10] CUI X C, FU Y W, SU Y, et al. Space target attitude estimation based on projection matrix and linear structure[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2023, 30: 918-922.
- [11] 咸明皓,刘西川,姬文明,等.降水对 Ku/Ka 频段星地链路衰减特性的影响研究[J].电子学报,2020,48(3): 417-425.
XIAN M H, LIU X C, JI W M, et al. Research on the effect of precipitation on the attenuation characteristics of earth-space link at ku/ka band[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 417-425. (in Chinese)
- [12] 蒋炜,王迪,李小军,等.星载宽带跨频段微波光子射频通道实现技术研究[J].电子学报,2022,50(11): 2593-2601.
JIANG W, WANG D, LI X J, et al. Research on realization technology of satellite broadband cross-band microwave photonic radio frequency channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(11): 2593-2601. (in Chinese)
- [13] CHEN R D, JIANG Y C. Hybrid SAR-ISAR imaging for space target via 2-D spectrum and SIHR with spaceborne radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(2): 2106-2127.
- [14] YUAN Z A, CHEN X, DENG B, et al. Terahertz ISAR imaging with nonrigid vibration compensation and side-lobe suppression of space targets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5110516.
- [15] LIU Y F, YU W D, YANG S H, et al. An effective spaceborne ISAR high-resolution imaging approach for satellite on-orbit based on minimum entropy optimization[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 4523-4537.
- [16] ZHOU Y J, XIE P F, LI C W, et al. Automatic dynamic estimation of on-orbit satellites through spaceborne ISAR imaging[J]. IEEE Transactions on Radar Systems, 2023, 1: 34-47.
- [17] ZHOU Y J, LI W F, WEI S P, et al. Satellite dynamic estimation utilizing feature translation across optical and radar imagery[J]. IEEE Transactions on Instrumentation

and Measurement, 2025, 74: 8502114.

- [18] 刘磊, 曹建峰. 基于天基光学测角的高轨空间目标轨道确定[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 155-161.
LIU L, CAO J F. Orbit determination of high-orbit space targets based on space-based optical angle measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 155-161. (in Chinese)
- [19] 龚柏春, 刘一澎, 马艳红, 等. 基于RBFNN的双星协同仅测角定轨方法[J]. 中国惯性技术学报, 2024, 32(5): 449-456.
GONG B C, LIU Y P, MA Y H, et al. RBFNN-based angles-only orbit determination method with cooperative dual-satellite[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2024, 32(5): 449-456. (in Chinese)
- [20] YANG X, KONG D C, YANG D, et al. Domain-aware generalized meta-learning for space target recognition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5638212.
- [21] YANG X, NAN X T, SONG B. D2N4: A discriminative deep nearest neighbor neural network for few-shot space target recognition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(5): 3667-3676.
- [22] 易卿武, 蔚保国, 王彬彬, 等. 一种基于北斗三号B2b信号的精密单点授时方法[J]. 电子学报, 2022, 50(4): 832-840.
YI Q W, YU B G, WANG B B, et al. A precise point tim-

ing method based on BDS-3 B2b signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(4): 832-840. (in Chinese)

- [23] 李洁玉, 丛潇雨, 郭山红, 等. 一种机载组网雷达协同目标检测算法[J]. 现代雷达, 2024, 46(2): 70-77.
LI J Y, CONG X Y, GUO S H, et al. A cooperative target detection algorithm for airborne networked radar[J]. Modern Radar, 2024, 46(2): 70-77. (in Chinese)
- [24] ZHOU Y J, ZHANG L, CAO Y H, et al. Attitude estimation and geometry reconstruction of satellite targets based on ISAR image sequence interpretation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(4): 1698-1711.
- [25] XIE P F, ZHANG L, DU C, et al. Space target attitude estimation from ISAR image sequences with key point extraction network[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021, 28: 1041-1045.
- [26] KOU P, LIU Y X, ZHONG W J, et al. Axial attitude estimation of spacecraft in orbit based on ISAR image sequence[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 7246-7258.
- [27] CHEN R D, JIANG Y C, NI H. High cross-range resolution imaging approach for space targets via CRRC and nonuniform resampling with spaceborne ISAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(5): 7292-7310.

作者简介



李微微 女, 2001年2月出生于黑龙江省哈尔滨市. 现为哈尔滨工业大学博士研究生. 主要研究方向为雷达图像处理及多传感器融合.
E-mail: 25b305019@stu.hit.edu.cn



张云 女, 1975年11月出生于黑龙江省虎林市. 现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师. 主要研究方向为雷达信号处理、SAR成像、机器学习和遥感模式分析.
E-mail: zhangyunhit@hit.edu.cn



姜义成 男, 1964年11月出生于黑龙江省哈尔滨市. 现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师. 主要研究方向为雷达信号处理.
E-mail: jiangyc@hit.edu.cn