

文章编号 1004-924X(2018)06-1524-09

空间失稳目标线阵激光成像建模及参数优化

孙日明¹, 林婷婷², 季霖², 李荣华^{2,3*}

(1. 大连交通大学理学院, 辽宁大连 116028; 2. 大连交通大学机械工程学院, 辽宁大连 116028;
3. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘要:线阵激光成像雷达兼具激光测距和线阵成像的优点,是空间失稳目标远距离精密测量的重要工具,其获取的线阵图像既能用于运动估计也能用于空间目标三维测量。为模拟不同平面分辨率线阵激光成像雷达对空间失稳目标的数据采集,本文根据线阵激光成像雷达的成像机制及空间失稳目标的运动规律提出了一般性的空间失稳目标线阵激光成像建模方法,为不同地面验证方案提供了数据支持。同时,为优化雷达参数选取,本文通过计算单位区域特征获取率提出了一种基于数据采集完整性评估的线阵激光成像雷达参数优化方法,实验分析了与成像分辨率相关的性能参数对多种运动形式空间失稳目标数据采集的完整性。实验结果显示数据采集完整性与线阵规模及采样频率正相关,在线阵规模达到 100 元以上、采样频率 200 Hz 以上,与空间目标自身运动形式几乎无关,建立的对应关系将为参数优化提供指导和参考依据。

关键词:空间失稳目标;线阵激光成像;雷达参数优化;线阵图像

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182606.1524

A general linear imaging modeling method for space instability targets and parameter optimization of linear laser radar

SUN Ri-ming¹, LIN Ting-ting², JI Lin², LI Rong-hua^{2,3*}

(1. School of Science, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;
2. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;
3. Aerospace system engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

* Corresponding author, E-mail: lironghua705@163.com

Abstract: With the advantages of laser ranging and linear imaging, the linear imaging radar is applied to precisely measure long distance space instability targets. The captured linear images can be used for both motion estimation and 3D measurement of space targets. In order to simulate the data acquisition of space instability target with different plane resolution linear imaging radar, this paper presented a general linear imaging modeling method for space instability targets based on the imaging mechanism of the linear imaging radar and motion law of space instability targets, which could provide data support for various ground-based verification schemes. Furthermore, in order to optimize the selection of parameter of linear imaging radar, this paper also provided an effective method for the selection of parameter by calculating the characteristics points collection

收稿日期:2017-10-25;**修订日期:**2017-12-23.

基金项目:辽宁省教育厅科学技术研究项目资助项目(No. JDL2017014);辽宁省博士科研启动基金指导计划资助项目(No. 201601254);国家自然科学基金资助项目(No. 61573247);上海航天科技创新基金资助项目(No. SAST2016016)

per unit and then evaluating the integrity of data acquired. The experimental results illustrated that the integrity of data acquired had positive correlation with imaging resolution and sampling frequency. In addition to the above, when the sample frequency was faster than 200 Hz and the imaging resolution was more than 100, the correlation with the individual motions of space targets was negligible. By establishing the relationship between the integrity of data acquired and parameter related with linear imaging, the method presented in this paper can provide guidance and reference for parameter optimization.

Key words: space unstability targets; linear imaging radar; parameter optimization of linear imaging radar; linear image

1 引言

太空垃圾是人类开展航天事业无法避免的副产品,这些数以亿计的太空垃圾不仅污染了宇宙空间,而且给航天器及航天员带来了巨大的威胁,监测并治理大型太空垃圾(空间失稳目标)已经成为一个国际问题^[1]。基于立体视觉的三维测量方法^[2-3]已经有了长足的发展,其中包括基于单目视觉,双目视觉,三目视觉及结合激光测距的视觉测量方法,但是这类方法受到视觉测量方式本身的限制对光照条件和距离等因素较敏感。激光成像雷达由于其受光照和距离等因素影响小,抗有源干扰能力强等优点,是监测空间目标最为理想的工具^[4],常见的成像方式包括线阵式^[5]和面阵式^[6]。

目前面阵式的成像技术^[6]结合双偏振调制技术和自适应距离选通方法,在单次探测的情况下实现了对非友好运动目标的三维成像,但对远距离空间运动目标的测量精度仍然不能达到测量要求。在空间作业中,线阵式雷达相较于面阵式雷达对空间航天器的负载较小^[7],且成像分辨率较高,同时获取的线阵图像也能用于运动参数估计^[8]及三维姿态测量^[5]。但针对空间失稳目标的线阵激光成像技术研究目前属于起步阶段,数据采集相对繁琐,雷达参数选取有待研究。为模拟线阵激光成像雷达测量空间失稳运动目标过程,本文根据线阵激光成像雷达的成像机制及空间失稳目标的运动规律,提出了一般性的空间失稳目标线阵激光成像建模方法。该方法通过构造空间失稳目标运动数学模型,建立世界坐标系与雷达坐标系关系,研究可视点云判别方法,确定具体成像分辨率,为不同性能参数线阵激光成像雷达对空间失稳运动目标监测任务的地面验证方案提供数据支持。

同时,由于不同雷达参数的线阵激光成像雷达对同一目标的数据采集完整性是不相同的,基于经验或

者过度的参数选择既不利于对空间失稳目标监测任务也不利于减少航天器载荷,因此,研究激光雷达参数的优化选取方法^[9]具有重要的意义。特征是识别与监测空间目标的主要着眼点,本文提出了一种基于特征采集完整性评估的线阵激光成像雷达参数优化方法。该方法通过计算单位区域特征获取率,实验分析了与成像分辨率相关的性能参数(采样频率、线阵规模)对多种运动形式(自旋、章动)空间失稳目标的数据采集完整性,并建立与成像分辨率相关参数与特征采集完整性关系,为线阵成像激光雷达性能参数优化提供参考依据。

2 预备知识

2.1 线阵激光成像雷达成像机制

线阵激光成像雷达的硬件部分主要由激光发射单元,驱动控制单元,激光探测单元,信息处理单元和电源等五部分组成。激光发射单元的激光器在激光驱动电路的控制下产生高重频激光脉冲,通过激光器整形单元准直,均衡和扩束,将其展开成线列激光光束并通过镜头投射到远处 $1 \times N$ 个被测点上,在驱动控制单元控制下对目标区域进行测量。激光探测单元采用线阵探测器接收,通过信息处理单元每次可获得一行(列)像素的距离和回波强度数据,直至完成所有数据的采集,工作原理如图 1 所示。

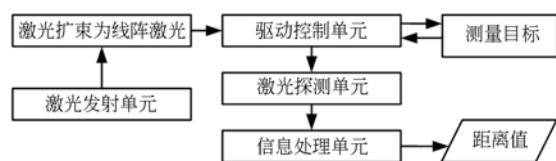


图 1 线阵激光成像雷达工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of linear imaging radar

2.2 空间失稳目标运动数学模型

空间失稳目标的主要运动类型包括自旋、章动和进动三种。由于激光雷达采集数据时间较短,进动可忽略不计,仅考虑失稳目标的自旋和章动

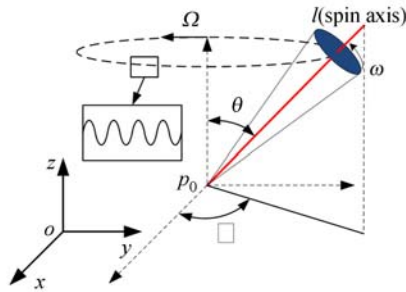


图 2 空间失稳目标运动示意图

Fig. 2 Motion schematic diagram of space instability targets

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-n}{\sqrt{m^2+n^2}} & \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2}} & 0 \\ \frac{-mp}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{-np}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{m^2+n^2}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \\ \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{n}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} & \frac{p}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当空间失稳目标做章动变化时,自旋轴还会在铅垂面上上下摆动,即章动为自旋运动和自旋轴转动的复合运动,矩阵 \mathbf{A} 可表示为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \Delta \phi \cos \theta & -\sin \Delta \phi \cos \theta & \sin \Delta \phi \\ \sin \Delta \phi \cos \theta & \sin \Delta \phi \sin \theta & \cos \Delta \phi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中:章动改变量 $\Delta \phi = \Omega \Delta t$, θ 为常量。值得说明的是,本文采用球面坐标下定义单位自旋轴 $\mathbf{e}_l = (\sin \phi \cos \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \phi)$,使得整个章动模型只是在自旋模型基础上增加了一个章动改变量 $\Delta \phi$,极大地简化了参数个数,便于线阵激光成像建模的实现。

3 线阵激光成像建模方法

根据上述的线阵激光成像雷达的成像机制及空间失稳目标运动数学模型,本文提出了一般性的空间失稳目标线阵激光成像建模方法。针对不同运动形式,该方法首先根据运动数学模型获取世界目标系下运动点云数据,然后通过建立的世界坐标系与雷达坐标系转换关系、可视点云判别方法以及成像分辨率的确定对空间失稳目标进行

动这两种运动形式,且自旋角速率 ω 和章动角速率 Ω 都是匀速变化的,如图 2 所示。

根据空间失稳目标的运动规律,空间目标表面任意点 P 绕过点 P_0 且方向 $\mathbf{l} = (m, n, p)$ 的自旋轴旋转 $\Delta \varphi = \omega \Delta t$ 后,其新坐标位置 P' 为:

$$\begin{bmatrix} P' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -P_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos \Delta \varphi & -\sin \Delta \varphi & 0 \\ \sin \Delta \varphi & \cos \Delta \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

在自旋运动中,自旋轴方向保持不变,因此正交矩阵 \mathbf{A} 是由 \mathbf{l} 确定的常量, \mathbf{A} 可表示为:

成像建模^[10],具体建模过程如图 3 所示。

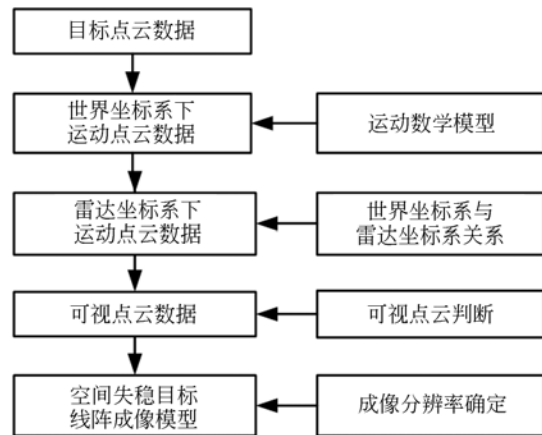


图 3 线阵激光成像建模流程图

Fig. 3 Workflow of linear imaging modeling method

3.1 世界坐标系下运动点云数据获取

空间失稳目标受地球磁力场影响产生绕轴 \mathbf{l} 的自旋运动,当自旋轴与总角动量向量不重合时将产生章动。在世界坐标系下,自旋可理解为空间目标绕过 P_0 点,方向为 \mathbf{l} 的旋转运动,则空间目标运动点云数据可由公式(1)和公式(2)获得。章动可理解为自旋运动和自旋轴摆动的复合运动,其运动点云数据可由公式(1)和公式(3)获得,

详见 2.2。

3.2 雷达坐标系下运动点云数据获取

线阵激光成像雷达的数据采集任务是在雷达坐标系下完成,通常设定雷达坐标系平行于世界坐标系。雷达坐标系与世界坐标系相差一个平移量,当世界坐标系和雷达坐标系重合时,该平移量为 0。不失一般性,令数据采集方向为雷达坐标系 y 轴正方向, yoz 面前侧为可视部分,每组像元平行于 z 轴,线阵激光雷达扫描成像示意图如图 4 所示。

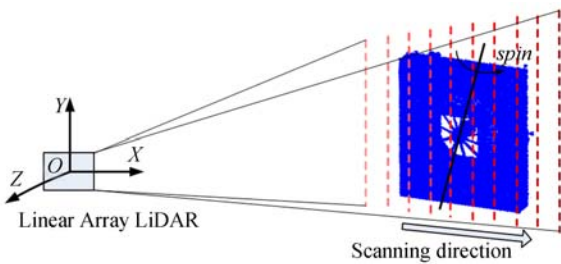


图 4 线阵激光雷达扫描成像示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the linear imaging laser radar scanning imaging

线阵激光雷达扫描镜扫描运动与空间失稳目标由于相对运动引起测量误差,如图 5 所示,某发动机喷管表面雷达扫描线不平行,因此雷达线阵数据仍按照平行排布时,得到目标畸变形貌数据。

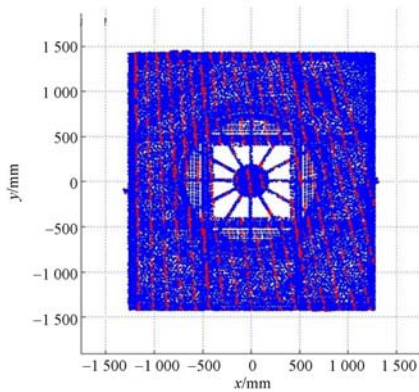


图 5 空间失稳目标雷达扫描线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser radar scan line for space unstability target

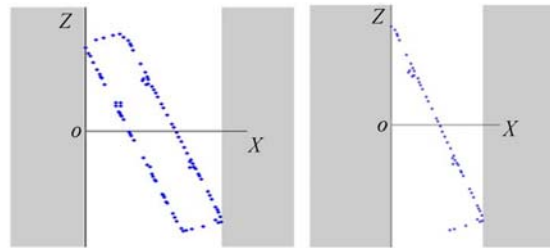
3.3 可视点云数据获取

由于雷达坐标系下坐标面 yoz 的前侧为可视面,为获取可视点云区域,本文提出了一种基于准线的可视点云判别方法。该方法以负 x 轴方向为视线方向,逐列构造准线,然后根据运动点云与

准线的位置关系确定可视点云,具体步骤为:

(1)查找当前列运动点云 z 轴方向的最大值点和最小值点,建立准线并计算其斜率 k ;

(2)根据斜率 k 判断该列点云可视部分,当 $k > 0$ 时,满足 $y \leq kx + c$ 为可视部分;当 $k < 0$ 时,满足 $y \geq kx + c$ 为可视部分,如图 6 所示。



(a) Single point cloud (b) Visible point cloud

图 6 可视点云判别方法演示图

Fig. 6 Illustration of visible point cloud judgement method

3.4 空间失稳目标线阵成像建模

3.4.1 成像分辨率确定

由于不同性能参数的线阵激光成像雷达对同一空间目标的成像分辨率是不同的,而与其获取的成像分辨率相关的参数主要包括采样频率和线阵规模。设线激光成像雷达采样频率为 f_s ,线阵规模为 n ,则在采样周期 T 内,获取的深度图像的成像分辨率为 $m \times n$,其中, $m = T \cdot f_s$ 。

3.4.2 成像建模算法

设线阵激光成像雷达对整个空间目标的采样周期为 T ,采用频率为 f_s ,线阵规模为 n ,则一般性的线阵激光成像建模方法可以表示为:

(1)在采样间隔 Δt 下,计算自旋角改变量 $\Delta\varphi = \omega\Delta t$ 和章动角改变量 $\Delta\phi = \Omega\Delta t$,并根据运动数学模型计算世界坐标系下运动点云数据;

(2)根据建立的世界坐标系和雷达坐标系关系,转换世界坐标系下的运动点云到雷达坐标系下;

(3)截取单元运动点云进行可视判别,获取可视点云部分;

(4)根据线阵规模 n 获取该分辨率下单元可视运动点云数据;

(5)迭代(1)~(4),完成整个采样周期 T 的线阵激光成像建模。

4 参数优化方法

特征是识别与监测空间目标的主要着眼点,对特征数据采集的完整性对测量整个空间目标至关重要,因此本文提出一种基于特征采集完整性评估的参数优化方法用于评估与成像分辨率相关的雷达参数。该方法通过计算单位特征获取率客观地评估多种运动形式空间失稳目标在不同雷达参数下的数据采集完整性。

4.1 点云特征提取

不同应用背景下对特征有不同的定义,不失一般性,此处介绍一种基于局部邻域协方差分析的点云特征提取方法^[11]用于空间目标点云特征提取。对每个点 $P_i, i=1,2,\dots,N$,找到大小为 S 的近邻点区域 $N_i=\{P_{ij}, j=1,2,\dots,S\}$,则点 P_i 的权重 w_i 可以定义为:

$$w_i = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2}, \quad (4)$$

这里, $\lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$ 为该点邻域协方差矩阵^[12]的特征值。 w_i 能够度量该点靠近尖锐特征的程度,如果权重 $w_i > \tau_i$,则该点为特征点,这里阈值 τ_i 由其自身的平滑分布决定,具体地,设 $\{w_i\}_{i=1}^N$ 的分布为 f_w ,极小化能量函数

$$\min_{\bar{f}_w} \|\bar{f}_w - f_w\|_F + \|\mathbf{D}\bar{f}_w\|_1, \quad (5)$$

求其平滑分布 \bar{f}_w 。这里 \mathbf{D} 为二阶微分矩阵, $\|\cdot\|_F$ 和 $\|\cdot\|_1$ 分别为向量的 F 范数和 l_1 范数,则阈值 τ_i 设定为第一个峰值后的平缓点。空间失稳目标采用该点云特征提取方法,特征点(红点)如图 7 所示(彩图见期刊电子版)。

4.2 特征采集完整性评估

对于相同空间目标,采样频率 f_s 越大,线阵规模 n 越大,单位时间内线阵激光成像雷达能够获取的点云数据越多,原则上也包含更多的特征点;同时,对于相同性能参数的线阵激光成像雷达,对于自旋角速率 ω 越大、章动角速率 Ω 越大的空间失稳目标,数据采集的范围越大,通常也包含更多的特征点。为了能够公平地评估数据采集的完整性,本文提出一个新的统计量(单位区域特征获取率) R_F :

$$R_F = \frac{dF_c}{dS} / \frac{dF_g}{dS}, \quad (6)$$

这里, $\frac{dF_c}{dS}$ 为单位区域 dS 上采集到的特征量 dF_c ;

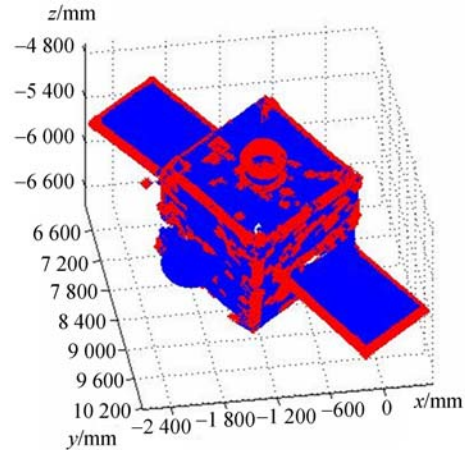


图 7 某卫星 A 的特征点

Fig. 7 Characteristics points of a satellite A

$\frac{dF_g}{dS}$ 为单位区域 dS 上真实的特征量 dF_g 。针对获取的线阵图像,通过该统计量的平均值能够合理评估与成像分辨率相关参数对多种运动形式空间失稳目标数据采集的完整性。

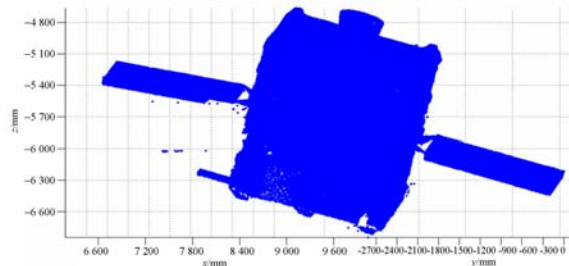
5 建模实现与参数分析

5.1 空间失稳目标成像建模

本文提出的一般线阵激光成像建模方法适用于任意空间失稳目标的自旋和章动成像建模。本文实验采用的空间目标为某卫星 A 和某发动机喷管 B 的 Creo 模型(由上海宇航系统工程研究所提供),并通过加入噪声模拟激光成像雷达进行数据采集的实际情况,如图 8 所示。

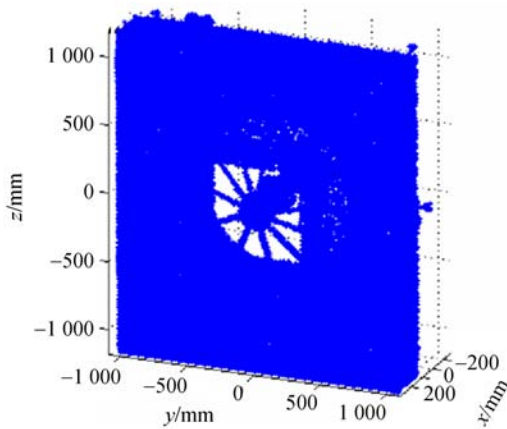
5.1.1 自旋成像建模

首先给出自旋运动空间失稳目标的成像建模结果。图 9 显示了在采样频率为 1 kHz,线阵规模为 550 元的条件下自旋轴 $l=(1,1,1)$ 、自旋角速率 $\omega=60^\circ/s$ 卫星模型 A 和发动机喷气管 B 的



(a) 卫星 A 点云数据

(a) Point cloud data of satellite A

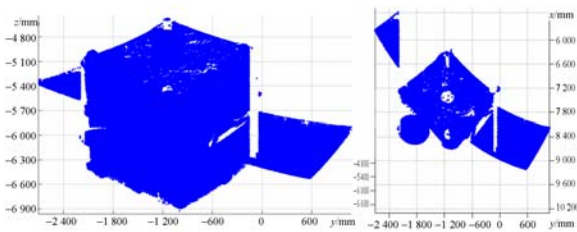


(b)发动机喷管 B 的点云数据

(b)Point cloud data of engine nozzle B

图 8 空间目标点云数据

Fig. 8 Point cloud data of Space targets

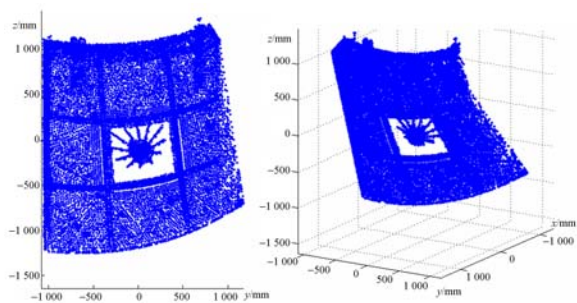


(a)卫星 A 成像建模的正视图

(b)卫星 A 成像建模的俯视图

(a)Front view of satellite A

(b)Top view of satellite A



(c)发动机喷管 B 成像建模的正视图

(d)发动机喷管 B 成像建模的侧视图

(c)Front view of engine nozzle B

(d)Side view of engine nozzle B

图 9 自旋成像建模

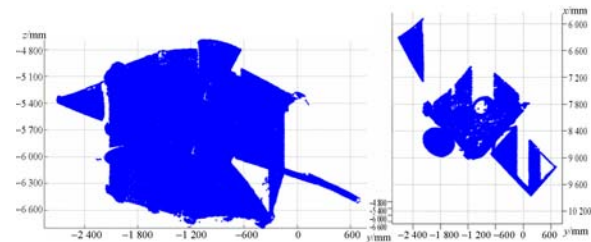
Fig. 9 Imaging modeling of spin

自旋成像建模结果。这里,子图(a)和(b)分别是卫星 A 成像建模的正视图和俯视图,子图(c)和(d)分别是发动机喷管 B 成像建模的正视图和侧视图。建模结果显示由于空间失稳目标的自旋使

得线阵激光成像雷达采集的数据不能真实反映空间目标原貌,某卫星 A 的太阳能板位置及发动机喷气管 B 的边界具有明显的畸变。

5.1.2 章动成像建模

章动是自旋运动和自旋轴摆动的复合运动。依据章动成像建模流程,图 10 给出了在采样频率为 1 kHz,线阵规模为 550 元的参数下,自旋轴 $l = (1, 1, \sqrt{2})$ 、自旋角速率 $\omega = 60^\circ/\text{s}$ 、章动角速率 $\Omega = 4^\circ/\text{s}$ 卫星模型 A 和发动机喷气管 B 的章动成像建模结果。这里,子图(a)和(b)分别是某卫星 A 建模结果的正视图和俯视图,子图(c)和(d)分别为某发动机喷管 B 建模结果的正视图和侧视图。由建模结果可以看出章动空间目标的数据采集结果畸变更明显,并且会有更多的数据缺失。

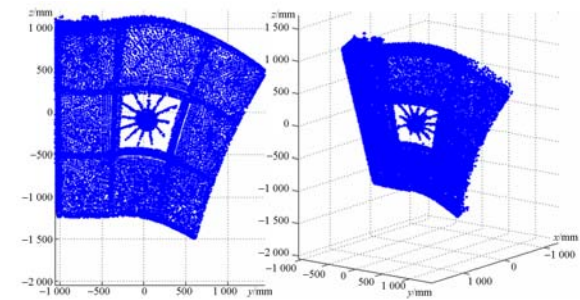


(a)卫星 A 成像建模的正视图

(b)卫星 A 成像建模的俯视图

(a)Front view of satellite A

(b)Top view of satellite A



(c)发动机喷管 B 成像建模的正视图

(d)发动机喷管 B 成像建模的侧视图

(c)Front view of engine nozzle B

(d)Side view of engine nozzle B

图 10 自旋成像建模

Fig. 10 Imaging modeling of spin

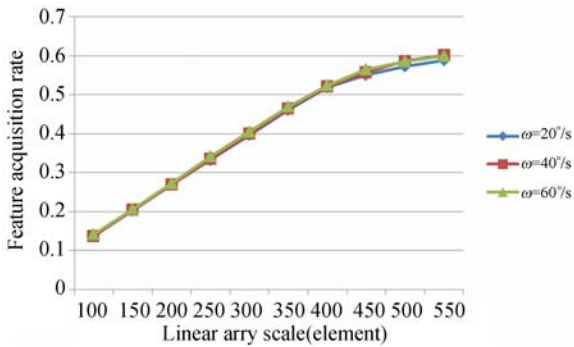
5.2 参数分析

本文通过计算深度图像的平均单位区域特征获取率实验评估了与成像分辨率相关参数对多种运动形式空间失稳目标的数据采集完整性,包括多组相同线阵激光成像雷达参数下对不同运动形

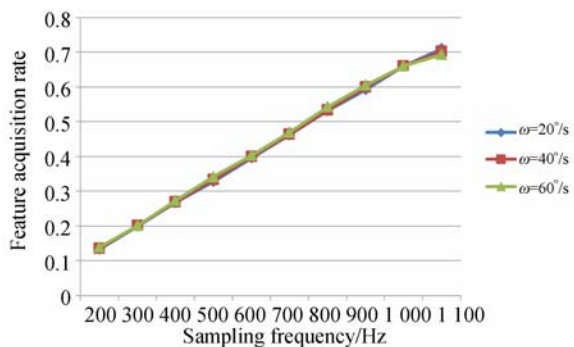
式空间失稳目标数据采集完整性评估的参数分析和针对同一空间失稳目标采用不同雷达参数数据采集完整性评估的参数分析两个部分。

5.2.1 不同运动形式空间失稳目标数据采集完整性评估

在这个部分,我们给出在多组相同线阵激光雷达参数下对不同运动形式空间失稳目标(某卫星 A)的数据采集完整性评估的实验结果。首先在固定采样频率(700 Hz)、不同线阵规模(100~550 元)及固定线阵规模(350 元)不同采样频率(200~1 100 Hz)下对角速率 ω 为 $20^\circ/s$ 、 $40^\circ/s$ 、 $60^\circ/s$ 的自旋空间失稳目标进行了数据采集完整性评估,见图 11。实验结果显示数据采集完整性与线阵规模和采样频率正相关,与自旋角速率几乎无关。



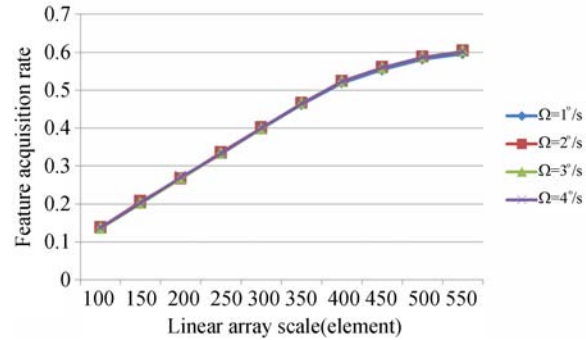
(a) 固定采样频率,不同线阵规模下的完整性评估
(a) Integrity evaluation under conditions of fixed sample frequency and different imaging resolutions



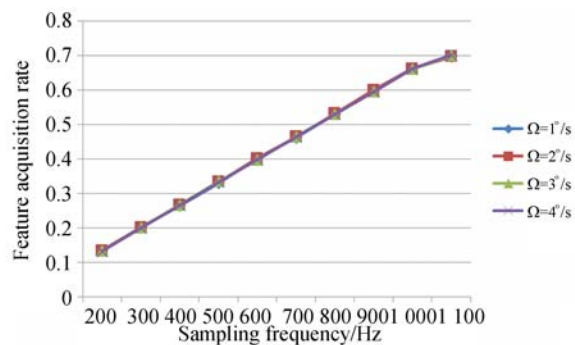
(b) 固定线阵规模,不同采样频率下的完整性评估
(b) Integrity evaluation under the conditions of fixed imaging resolution and different sample frequencies

图 11 自旋空间失稳目标的数据采集完整性评估
Fig. 11 Evaluating the integrity of data acquired for spin space unstability targets

同时,在相同的实验条件下,对自旋角速率为 $40^\circ/s$ 、章动角速率分别为 $1^\circ/s$ 、 $2^\circ/s$ 、 $3^\circ/s$ 、 $4^\circ/s$ 的章动空间失稳目标进行数据采集完整性评估,见图 12。实验结果显示单位区域特征获取率与线阵规模和采样频率正相关,与章动空间目标自身的运动形式几乎无关。



(a) 固定采样频率,不同线阵规模下的完整性评估
(a) Integrity evaluation under conditions of fixed sample frequency and different imaging resolutions



(b) 固定线阵规模,不同采样频率下的完整性评估
(b) Integrity evaluation under conditions of fixed imaging resolution and different sample frequencies

图 12 章动空间失稳目标的数据采集完整性评估
Fig. 12 Evaluating the integrity of data acquired for nutation space unstability targets

5.2.2 不同雷达参数数据采集完整性评估

在这个部分,我们给出不同与成像分辨率相关参数(线阵规模和采样频率)对同一空间失稳目标的数据采集完整性评估的实验结果。首先给出针对同一自旋空间失稳目标(自旋 $40^\circ/s$ 卫星 A)的单位区域特征获取率与参数的对应关系,见图 13。

在图 13 中, x 轴为线阵规模, y 轴为采样频率, z 轴为平均单位区域特征获取率。图 13 显示特征获取率随着线阵规模的增多及采样频率的增

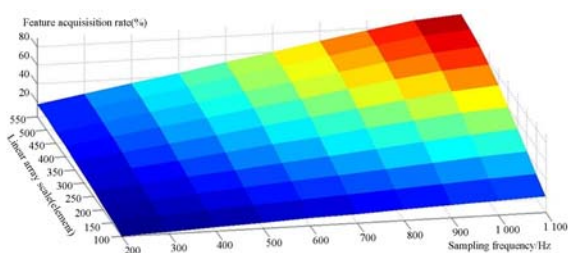


图 13 自旋空间失稳目标的特征获取率与雷达参数的对应关系

Fig. 13 Relationship between the integrity of data acquired and parameter related with linear imaging for spin space unstability targets

加而增大,与线阵规模及采样频率正相关。同时,针对同一章动空间失稳目标(自旋 $40^\circ/\text{s}$ 、章动 $4^\circ/\text{s}$ 某卫星 A)也建立了单位区域特征获取率与线阵规模及采样频率的对应关系,见图 14。实验得到的几乎相同的实验结论,进一步验证了在线阵规模达到 100 元以上、采样频率 200 Hz 以上,单

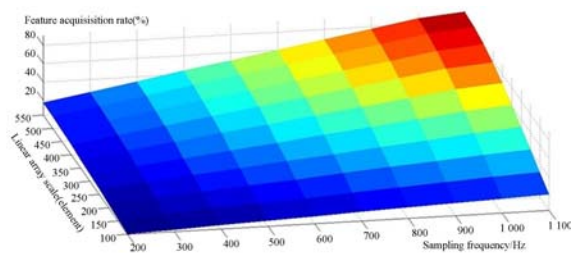


图 14 章动空间目标的特征获取率与雷达参数对应关系

Fig. 14 Relationship between the integrity of data acquired and parameter related with linear imaging for nutation space unstability targets

参考文献:

- [1] 高庆玉,张青斌,唐乾刚,等. 空间飞网系统牵拉模式影响研究[J]. 国防科技大学学报,2017,39(2): 42-48.
GAO Q Y, ZHANG Q B, TANG Q G, *et al.*. Research on the drag mode of space net system [J]. *Journal of Atonal University of Defense Technology*, 2017,39(2):42-48. (in Chinese)
- [2] 杨宁,申景诗,张建德,等. 基于立体视觉的空间非合作航天器相对位姿自主测量[J]. 光学精密工程, 2017,25(5): 1331-1339.
YANG N, SHEN J SH, ZHANG J D, *et al.*. Autonomous measurement of relative attitude and position for spatial non-cooperative spacecraft based on stereo vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25 (5): 1331-1339. (in Chinese)
- [3] 徐文福,梁斌,李成,等. 空间机器人捕获非合作目标的测量与规划方法[J]. 机器人,2010,32(1): 61-69.
XU W F, LIANG B, LI CH, *et al.*. Measurement and Planning Approach of Space Robot for Capturing Non-cooperative Target [J]. *ROBOT*, 2010, 32(1):61-69. (in Chinese)
- [4] 刘波,耿林,刘琳,等. 双通道接收的无扫描激光成像技术[J]. 红外与激光工程,2016,45(12): 101-105.
LIU B, GENG L, LIU L, *et al.*. Scannerless laser imaging technology based on multi-channel receiving [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45

位区域特征获取率与空间目标自身运动形式几乎无关的结论。

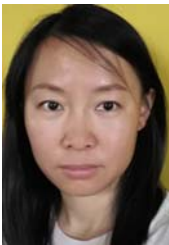
由于在线阵规模达到 100 线元以上、采样频率 200 Hz 以上,单位区域特征获取率与空间目标自身运动形式几乎无关,在实际应用中,可以根据建立的对对应关系,根据目标特征获取率来选取雷达参数。如图 13 和 14 所示,针对同一目标特征获取率,可选择多种雷达参数来满足实际需求,参数选取方式并不唯一。

6 结 论

本文根据空间失稳目标的运动规律及线阵激光成像雷达的成像机制提出了一般性的空间失稳目标线阵激光成像建模方法。该建模方法能够为不同参数线阵激光成像雷达对多种运动形式空间失稳目标的地面验证方案提供数据支持,加快空间失稳目标线阵成像相关技术的研究进程。同时,提出的基于单位特征获取率评估的线阵激光成像雷达参数优化方法客观地评价了与成像分辨率相关参数对多种运动形式空间失稳目标的数据采集完整性,实验结果显示数据数据采集完整性与线阵规模及采样频率正相关;在线阵规模达到 100 元以上、采样频率 200 Hz 以上,单位特征获取率与目标自身运动几乎无关;针对同一单位特征获取率,参数选取不唯一的实验结论,建立的对对应关系为与成像分辨率相关参数的优选提供指导和参考。

- (12): 101-105. (in Chinese)
- [5] 蔡银桥,童小华,舒嵘. 基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011,39(7): 1062-1067.
CAI Y Q, TONG X H, SHU R. Fast 3D Imaging with Time-of-flight Laser Scanner Based on Linear Array Scanning [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2011, 39(7):1062-1067. (in Chinese)
- [6] CHEN Z, LIU B, LIU E, *et al.*. Adaptive Polarization-Modulated Method for High-Resolution 3D Imaging [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2016, 28(3):295-298.
- [7] 安海霞,邓坤,闭治跃. 高功率激光装备小型化轻量化技术[J]. 中国光学,2017,10(3): 321-330.
AN H X, DENG K, BI ZH Y. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 321-330. (in Chinese)
- [8] 赵竹新,文贡坚,回丙伟,等. 利用线阵相机估计目标运动参数[J]. 光电工程,2012,39(1): 24-29.
ZHAO ZH X, WEN G J, HUI B W, *et al.*. Estimation of Target's Motion Parameters Using Line-scan Camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(1):24-29. (in Chinese)
- [9] 葛江涛,邓宝,陶玉森. 基于TSS方法的雷达性能优选分析研究[J]. 火力与指挥控制,2016,41(5): 161-164.
GE J T, DENG B, TAO Y B. Optimization Analysis of Radar Properties Based on TSS Method [J]. *Fire Control & Command Control*, 2016, 41(5): 161-164. (in Chinese)
- [10] 王盈,黄建明,刘玉,等. 空间目标激光雷达成像仿真技术[J]. 红外与激光工程,2016,45(9): 102-107.
WANG Y, HUANG J M, LIU Y, *et al.*. Simulation of lidar imaging for space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 102-107. (in Chinese)
- [11] ZHANG J, CAO J, LIU X, *et al.*. Point cloud normal estimation via low-rank subspace clustering [J]. *Computers & Graphics*, 2013, 37(6):697-706.
- [12] PAULY M, KEISER R, KOBBELT L P, *et al.*. Shape modeling with point-sampled geometry [C]. *ACM*, 2003:641-650.

作者简介:



孙日明(1978—),女,吉林白山人,博士,讲师,2013年取得大连理工大学数学学院计算数学专业博士学位,主要从事图像的畸变矫正方法及图形图像压缩方法研究。E-mail: sunriming78@126.com



李荣华(1983—)男,博士后,副教授,上海航天技术研究院博士后,辽宁省百千万人才工程万层次,大连市青年科技之星,曾为新加坡理工学院先进机器人与智能控制中心访问学者,主要从事空间非合作目标三维位姿测量技术研究。E-mail: lironghua705@163.com