

文章编号 1004-924X(2025)17-2810-11

## 基于自适应窗长STFT的空间目标 振动特性反演

余凯, 黄浦, 李宇喆, 董昊卿, 张绪国\*

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 针对传统的短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)处理窗长固定, 导致时频分辨率不足, 在目标分类、识别中应用效果受限的问题, 提出一种基于自适应窗长STFT算法的特征频率反演方法, 以最小信息熵、峰值能量差异、底噪水平相结合构建混合损失函数, 建立动态窗长调整策略, 实现了窗长参数与信号非平稳特性的自适应匹配。设计了空间目标运行特性模拟时序光度信号采集装置, 通过动量轮转动状态变化模拟目标在轨稳定运行、姿态调整等工况, 获取目标振动引起的目标表面高速时序光度信号, 实验及处理结果表明, 本算法具有较高的频率分辨率, 特征频率反演精度达到0.4 Hz, 可动态调整窗长以兼顾多尺度时间分辨率, 动量轮稳态特征频率估计误差小于0.3 Hz, 精确分辨工况变化过程的起止点。在空间目标运行状态判断、健康状态评估、姿态控制系统早期故障预警等方面具有重要的应用价值。

**关键词:** 空间目标; 时序光度; 自适应窗长; 短时傅里叶变换; 频率特性反演

中图分类号: O439; TP731 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253317.2810 CSTR: 32169.14.OPE.20253317.2810

## Inversion of vibration characteristics of space target based on adaptive window length STFT

YU Kai, HUANG Pu, LI Yuzhe, DONG Haoqing, ZHANG Xuguo\*

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

\* Corresponding author, E-mail: zxcg-ltt@163.com

**Abstract:** Time-series photometric signals from spaceborne targets contain rich information about their operational states. Conventional short-time Fourier transform (STFT) uses a fixed window length, which limits time-frequency resolution and reduces effectiveness for target classification and identification. To address this limitation, an eigenfrequency inversion method based on an adaptive-window-length STFT is proposed. A hybrid loss function—combining minimum information entropy, peak energy contrast, and background noise level—is formulated to drive a dynamic window-length adjustment strategy, enabling adaptive matching between window parameters and signal nonstationarity. A dedicated simulation apparatus was developed to acquire time-series photometric signals that reflect space-target operational characteristics. By varying the momentum-wheel rotational states, scenarios of on-orbit steady operation and attitude adjustment were simulated, producing high-rate photometric signals induced by surface vibration. Ex-

收稿日期: 2025-07-11; 修订日期: 2025-07-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. U21A20451)

perimental results show that the proposed algorithm achieves high frequency resolution, with eigenfrequency inversion precision of 0.4 Hz, and dynamically adjusts window length to provide multi-scale temporal resolution. The steady-state eigenfrequency of momentum wheels was estimated with error below 0.3 Hz, and transition points associated with changes in operational conditions were accurately identified. The method offers substantial value for assessing space-target operational state, monitoring health status, and providing early fault warnings for attitude-control systems.

**Key words:** space targets; temporal luminosity; adaptive window length; short-time Fourier Transform; inversion of frequency characteristics

## 1 引 言

随着近地轨道航天器数量的快速增长,太空环境竞争日趋激烈,空间态势感知作为保障太空资产安全的关键技术,其战略价值日益提升<sup>[1]</sup>。卫星作为涉及国家安全和民生保障的重要空间基础设施,其健康状态与在轨寿命监测已成为航天领域的重要研究课题。

动量轮作为卫星姿态控制系统的核心执行机构,其运行状态反映了卫星的在轨工作状态、健康状况等信息,而微振动特性对卫星指向精度和成像质量有重要影响<sup>[2]</sup>。航天器在轨故障约有 60% 与轴承磨损相关,动量轮磨损导致振动频率异常<sup>[3]</sup>,基于高精度的动量轮特征频率反演技术,可实现航天器的早期故障预警与健康监测。微振动特征识别除了接触式测量方法外,还主要依赖雷达信号处理<sup>[4]</sup>、深度学习技术<sup>[5]</sup>与光学分析。其中,基于时序光度信号的被动光学探测方式<sup>[6-9]</sup>广泛应用于空间目标的振动特性测量、模态识别<sup>[10]</sup>等方面,已经成为评估卫星运行状态的有效技术手段<sup>[11-12]</sup>,为航天器的在轨维护决策和寿命预测提供了重要的数据支撑。

目标的时序光度信号包含目标的宏观运动和微观振动信息,具有非线性、非平稳信号的特点。时序光度探测利用高速、低噪声的探测器对卫星微振动调制后的光学信号采样,解调后即可反演卫星振动、频率等特性。张绪国、李宇喆等<sup>[13]</sup>通过实际测量得到的低轨卫星目标光度数据,实现了在轨卫星频率特性反演与自旋稳定、三轴稳定卫星的区分。针对时序光度信号的数据处理,通常采用 STFT 分析方法,但传统 STFT 通过固定窗函数截取信号片段进行频谱分析,其时频分辨率受 Heisenberg 不确定性原理

制约,需在时间分辨率与频率分辨率间折中,导致特征提取精度不足。近年来,自适应时频分析技术成为突破传统方法瓶颈的重要方向<sup>[14]</sup>,如自适应小波分解<sup>[15]</sup>、经验模态分解(Empirical modal decomposition, EMD)<sup>[16]</sup>、变分模态分解(Variational modal decomposition, VMD)<sup>[17]</sup>等,但在不同应用场景下仍存在窗口长度、核函数等参数选择困难,抗噪能力有限,计算复杂度高<sup>[18]</sup>等问题,限制了其在复杂工程环境下的适用性。针对以上问题,本文提出了一种基于自适应窗长 STFT 算法的特征频率反演方法,通过构建统一的评价标准,以信息熵、峰值能量差异与底噪水平相结合构建混合损失函数,自动根据信号特性,分时动态优化 STFT 窗长,最终实现非稳态工况目标特征频率反演精度达到 0.4 Hz,达到亚赫兹的分辨能力<sup>[19-20]</sup>,具有重要的工程应用价值。

## 2 传统 STFT 处理

短时傅里叶变换的核心思想在于引入滑动时窗机制,有效克服经典傅里叶变换在时频局部化分析中的局限性。其数学原理可表述为:对连续信号  $x(t)$  施加一定时宽的窗函数  $w(\tau - t)$ ,并令其时移参量沿时间轴连续滑动,将原始信号分割为若干局部化时窗片段,继而对各片段实施傅里叶变换,最终构建时频平面  $(t, \omega)$  上的二维联合分布,其数学表达式如下:

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (1)$$

式中:  $w(\tau - t)$  表示复共轭窗函数(如高斯窗、汉明窗等),参数  $t$  决定时窗的中心位置,  $\omega$  表征连续频率变量。

传统 STFT 方法的根本局限性在于其固定的时频分辨率特性。Heisenberg 不确定性原理严格限制了信号在时域和频域上的分辨率不可能同时无限精确,固定的窗长选择导致时间分辨率与频率分辨率的乘积存在下限约束,提高频率分辨率必然要求增大窗长,从而降低时间分辨率;反之亦然。传统 STFT 在处理整个信号时,窗函数  $w(\tau - t)$  为预先设定的,意味着在整个分析过程中,时间与频率分辨率是固定的,无法根据信号的局部特性的变化进行动态调整。

因此,使用固定窗长的传统 STFT 在处理混合了稳态与非稳态分量的空间目标信号时,无法同时满足高精度频率反演和高精度瞬变事件定位的需求,导致在目标状态精细分类、瞬态过程识别及早期微弱故障特征提取等方面效果受限。此外,时频分析结果与采样硬件、采样频率、采样环境等因素有关<sup>[21]</sup>,因此需找到一种动态优化方法,可根据输入信号的局部特性进行折中,以兼顾时间分辨率与频率分辨率。

### 3 基于自适应窗长 STFT 算法

传统 STFT 用于空间目标时序光度信号分析时存在以下问题:(1)对混合稳态/非稳态信号适应性差。空间目标信号(如卫星动量轮运行)通常包含稳态(匀速运行)和非稳态(加速/减速、启停、姿态调整)分量。稳态部分需要较长的窗长以获得足够高的频率分辨率来精确识别特征频率;(2)缺乏先验知识,参数选择困难。对于在轨运行状态未知的非合作目标,其信号中稳态与非稳态分量分布未知,难以凭经验选择一个全局最优的固定窗长;(3)分析效果受限。使用单一固定窗长分析混合信号时,若窗长过长,稳态频率分辨率虽高,但会严重模糊非稳态时间的起止时间和快速频率变化细节;若窗长过短,虽能捕捉瞬态变化,但会导致稳态特征频率频谱展宽、能量分散、旁瓣干扰增加,使得精确反演频率变得困难,抗噪能力也有所下降。

针对传统 STFT 固定窗长导致的时频分辨率不可调和问题,本文提出自适应窗长 STFT 算法,通过构建动态窗长调整机制,打破固定分辨率约束对信号适应性差的限制。其核心思想是

根据信号局部特性,实时地、自主地选择最优窗长:当信号局部平稳,算法倾向于选择较长的窗长,以获取更高的频率分辨率,从而精确反演稳态特征频率;当信号局部非平稳,算法倾向于选择较短的窗长,以获取更高的时间分辨率,从而精确捕捉状态变化的起止时刻和频率的快速演变过程。

这种由混合损失函数驱动的动态调整策略,实现了窗长参数与信号局部非平稳特性的自适应匹配,有效克服了传统 STFT 在空间目标混合工况信号分析中时间分辨率与频率分辨率难以兼顾的核心局限性,而窗长的自适应选择的关键在于损失函数的构建。本研究采用最小信息熵为约束条件<sup>[22]</sup>,综合考虑时频谱的峰值能量差异以及背景噪声的影响,构建动态优化过程中的损失函数,以确定高频时序光度数据进行短时傅里叶变换过程中的最佳开窗尺寸。

为了算法的实现,首先需将式(1)改为离散域的表达式。通过分帧、加窗等操作,对于离散信号  $x[m]$  ( $m = 0, 1, \dots, N_s - 1$ ),其 STFT 在时间帧  $n$  和频率点  $k$  处的表达式如下:

$$X(n, k) = \sum_{m=0}^{L-1} x[m + nH] \cdot w[m] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{K}km}, \quad (2)$$

式中:  $w[m]$  为离散窗函数序列,  $m$  为时间索引,  $H$  为 hop size, 表示相邻帧之间的样本数, 取值越大时间平滑性越好。  $k$  为频率索引,  $K$  为傅里叶变换点数, 决定频率分辨率, 时间帧索引  $n$  的约束条件为  $n = 0, 1, \dots, [(N_s - L)/H]$ 。对目标时序光度数据处理时, 若需获取某时刻的瞬时频率, 则以该时刻为中心, 计算一定窗长内离散信号的 STFT, 当采样频率足够高、窗长足够短时, 可用窗长对应的时间周期内的平均频率当成该时刻的瞬时频率。

其次, 构建损失函数第一项最小信息熵。对于离散信号的 STFT 时频谱, 在时间帧  $n$  内, 每个频率点  $k$  处的能量为:

$$E(n, k) = |X(n, k)|^2. \quad (3)$$

计算其归一化的能量分布, 离散域的公式表达如下:

$$p(n, k) = \frac{E(n, k)}{\sum_{k=0}^{K-1} E(n, k)}. \quad (4)$$

则其离散域的总熵为:

$$H(n) = - \sum_{k=0}^{K-1} p(n, k) \cdot \log_2 p(n, k). \quad (5)$$

熵  $H(n)$  定量反应了该时刻时频分布的聚集性,其值越小,则表明时频分布越不均匀,使时频分布的信息熵最小化,可提升信号特征的稀疏性和可辨识性。其次,将  $X(n, k)$  的峰值能量差异与背景噪声水平加入损失函数的计算过程中,与信息熵一同分配权重,构建混合损失函数:

$$\mathcal{L}(L) = \alpha \cdot H_L(n) + \beta \cdot P(L) + \gamma \cdot N(L), \quad (6)$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma$  为权重系数,  $P(L)$  为窗长为  $L$  时峰值能量差异,  $N(L)$  为窗长为  $L$  时的底噪能量。损失函数权重的选择对窗长优化的结果有重要影响,本文在权重确定时采用网格搜索的方式,以 0.1 为步长搜索得到使得混合损失函数最小,全局最优的权重组合,确定信息熵权重为 0.5,幅

度差权重为 0.3 以及底噪权重为 0.2。

对每个时间帧  $n$ , 通过枚举搜索算法计算所有候选窗长对应的损失函数,选择使混合损失函数最小的窗长  $L^*$ 。最小窗长为 256,最大窗长为 16 384,窗长步进为 256。

$$L^*(n) = \arg \min_{L \in \{L_1, \dots, L_k\}} \mathcal{L}(L). \quad (7)$$

图 1 给出了基于自适应窗长的 STFT 算法的详细步骤。首先,需对设备采集到的时序光度数据进行预处理,包括低通滤波、降采样等,防止数据量太大无法处理的情形;其次,给定时刻及选择合理的窗长大小,进行离散傅里叶变换,并计算其时频分布的信息熵等参数,改变窗长,重复该步骤;接着,以混合损失函数迭代计算当前时刻最佳的窗长大小,注意选择不同窗长时数据尺度上的对齐;最后,更新时间窗口以遍历所有采样点,即可得到不同时刻优选窗长的最佳组合,并输出得到最终的时频图。

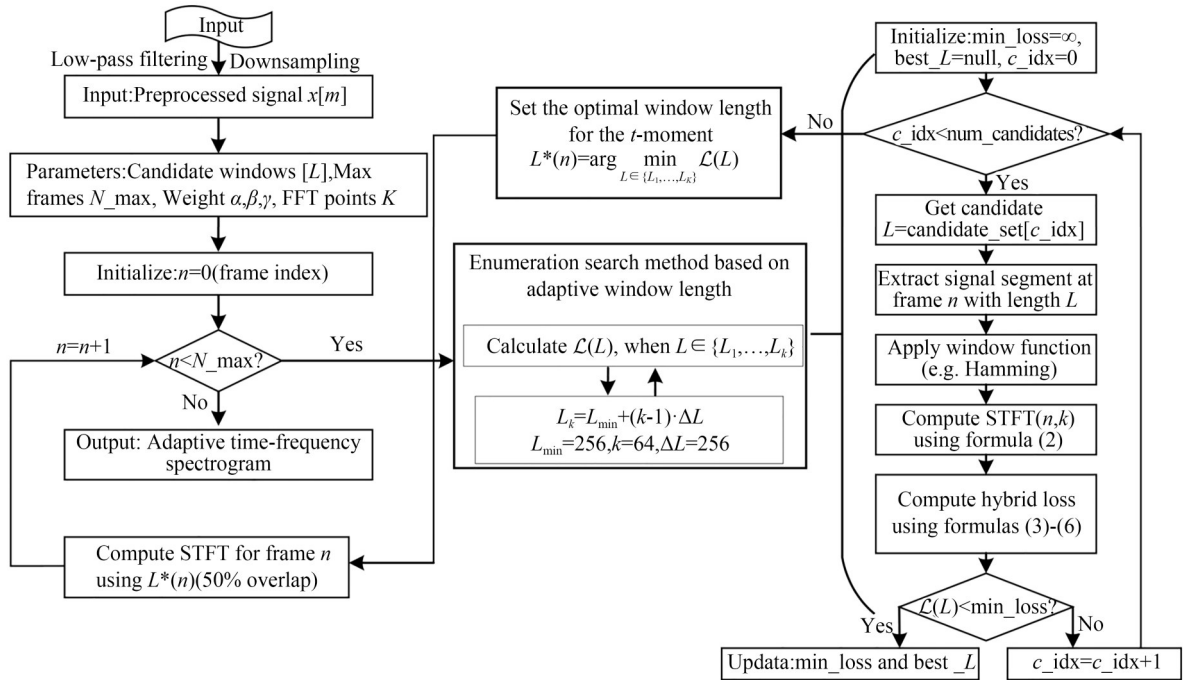


图 1 基于自适应窗长的 STFT 算法

Fig. 1 STFT algorithm based on adaptive window length

## 4 实验与结果分析

在理论分析的基础上,搭建了目标振动特性双通道时序光度采集装置,性能参数如表 1 所示。

原理样机采用共前置光学系统设计,棱镜分光后可见光波段为面阵成像,帧频为 300 Hz,短波红外波段为单点探测,探测器型号为 C10439-15,速率最高可达 100 kHz。可见光面阵数据在前期预

处理方法有所不同,本文暂不做分析。对卫星模型开展运行频率特性测量与反演实验,实验原理如图 2 所示。动量轮设置不同的转速、不同个数以及加减速等工况,动量轮工况如表 2 所示。其中,动量轮转速精确值由接触式传感器标定,起止转速可通过软件人为设定,转速误差在  $\pm 0.01$  r/min 以内。

CMG1-CMG5 五个动量轮,第一列为工况编号,表中给出五个典型工况。其中,M1,M5 均为恒定转速的工况,由于转速差异,反演得到的动

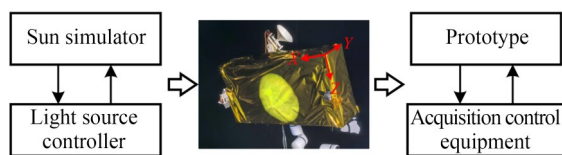


图 2 实验原理

Fig. 2 Experimental principle

表 1 双通道原理样机的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of dual-channel prototype

Performance index	Parameter value
Working band	0.4~0.8 $\mu\text{m}$ , 0.8~1.2 $\mu\text{m}$
FOV	0.22°×0.22°
Focal Length	366.88 mm (short-wave infrared)
Pixel size	4.5 $\mu\text{m}$ , 15 $\mu\text{m}$
Encircled energy	$\geq 0.6$ (short-wave infrared)

量轮特征频率应有所差异。M3,M4 为减速工况,M2 则更为复杂,同时包含了恒定转速与加速的情形,兼具平稳与非平稳信号特征,因此重点对此工况展开分析。对 M2 工况中对动量轮的控制过程进行描述,先开启 CMG<sub>a</sub> 并稳定转速至 6 000 r/min,然后依次开启其余 4 个动量轮,直至转速均稳定至 6 000 r/min。

表 2 动量轮工况

Tab. 2 Operating condition of momentum wheel

(r·min<sup>-1</sup>)

Number	CMG1	CMG2	CMG3	CMG4	CMG5
M1	6 000	—	—	—	—
M2	6 000	0~6 000	0~6 000	0~6 000	0~6 000
M3	6 000~5 500	6 000~5 500	6 000~5 500	6 000~5 500	6 000~5 500
M4	5 500~5 000	5 500~5 000	5 500~5 000	5 500~5 000	5 500~5 000
M5	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000

实验过程中,太阳模拟器开启最低档位补光,样机对准卫星模型动量轮安装面板,记录动量轮在不同工况(表 2)下反射光强的时序光度信号。短波红外点源探测器采集频率设置为 100 kHz。按照图 1 所示的算法流程,首先采用 4 阶巴特沃斯低通滤波器<sup>[23]</sup>对时序光度数据进行处理,降采样至 1 kHz,减少数据量的同时保留一定的采样频率。采用人为指定窗长的方式处理 M2 工况的时序光度数据,重叠长度指定为窗长的一半,计算点数为窗内所有采样点,窗函数选用的汉明窗。为清晰展示窗长影响,选取 4 组不同窗长的处理结果进行对比,如图 3 所示。由图 3(a)和图 3(b)可知,当窗长选取较短时,时间分辨率足够,可以观察到 CMG<sub>a</sub> 稳定工作以及存在两个动量轮逐渐减速的过程,但其频率分辨率不足。由图 3(c)和图 3(d)可知,窗长选择太长则导

致信号混叠在一起,稳态特征频率以及非稳定工况的变速频率特征均无法正确提取。

采用本文提出的基于自适应窗长 STFT 算法对不同时刻窗长进行动态优化,同样对 M2 的时序光度数据的处理结果如图 4 所示。由图可知,随着时间的推移,短时傅里叶变换最佳窗长并不相同,并在后半段时间连续出现窗长剧烈变化的情形,表明前半段信号以稳态信号为主,后半段则出现非平稳信号,算法根据信号特征自适应减小了开窗尺寸,实际则是 CMG1 稳定 6 000 r/min,其他动量轮依次开启,与动态优化结果相互吻合。为抑制窗长显著变化导致的时频谱不连续现象,算法中设置重叠计算区域为当前窗长的一半,并在时频谱中频率维采用固定点数插值,时间维进行拼接。对比分析 M5 工况,仅存在平稳信号的情形,其最佳窗长及时频分析结果如图 5 所示。

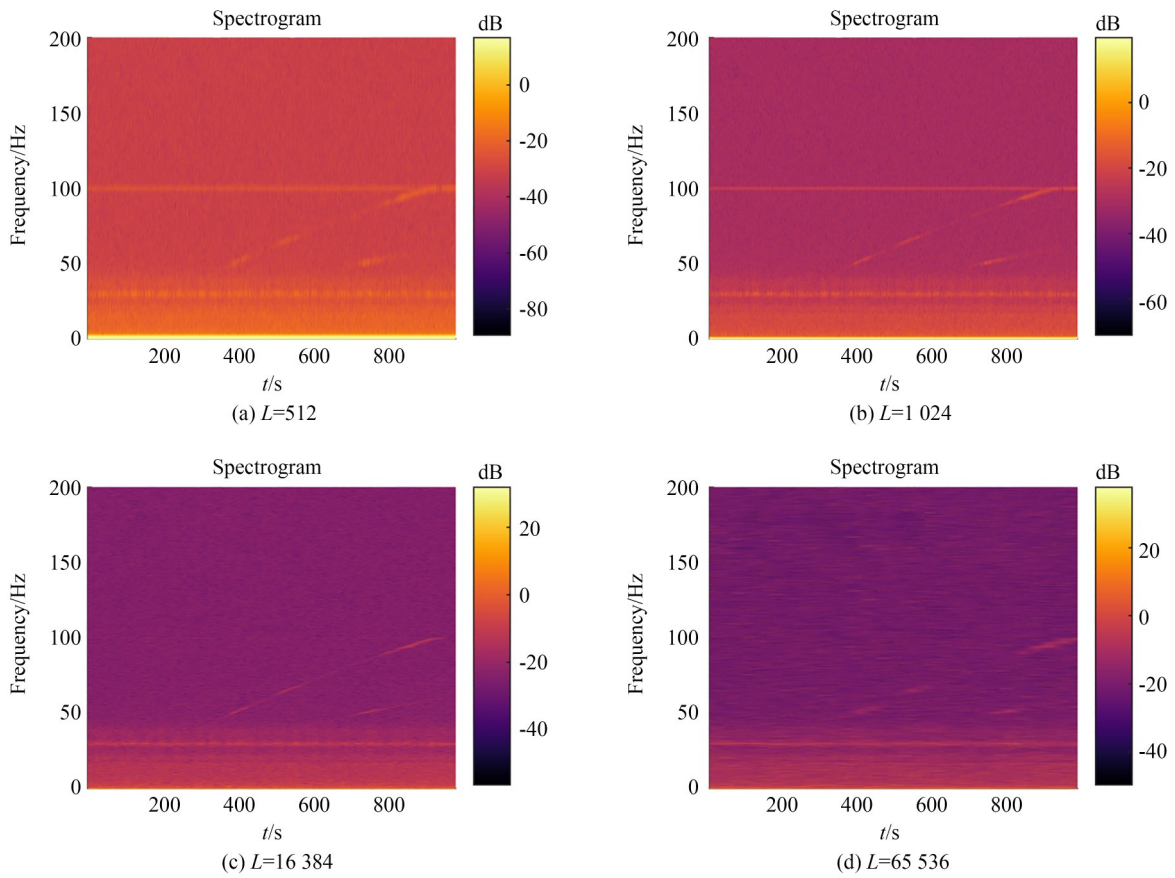


图 3 M2 光度数据短时傅里叶变换结果  
 Fig. 3 STFT results for photometric data of M2

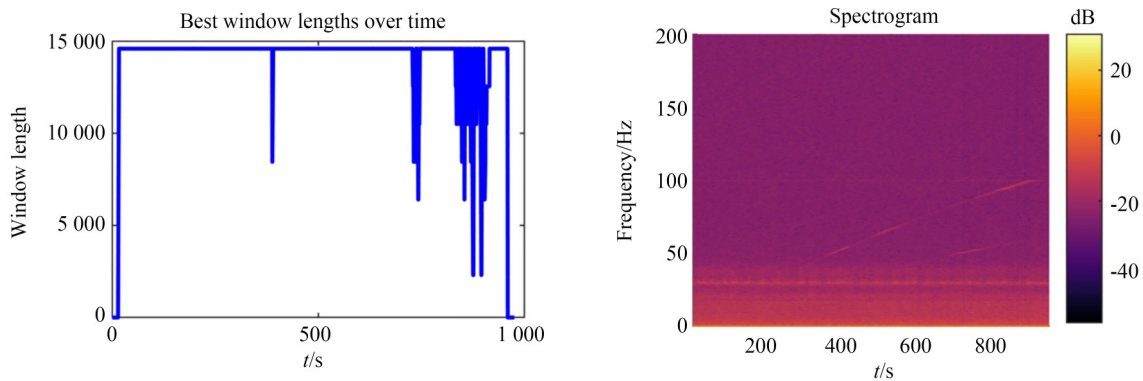


图 4 M2 最佳窗长的计算结果及时频分析结果  
 Fig. 4 Result of optimal window length of M2 and result of time-frequency analysis

图 5(a)中,多条线段代表不同时刻时损失函数值与窗长的对应关系,可知损失函数最小值出现在了窗长为 12 544 的位置,表明损失函数极值的出现不随开窗时间的变化而变化,信号中仅存在平稳信号,与实际相符。图 6 则给出了其余 3 个工况的时频分析结果,M1 工况反演得到了稳

定的 100 Hz 特征频率,M3 与 M4 工况也正确识别了其加速过程,接下来对反演频率的准确度与精确度进一步分析。

为客观评价本文算法性能,采用 4 个指标进行分析,即特征频率反演的准确度、特征频率反演的精确度、不同算法的时效性以及能否区分变

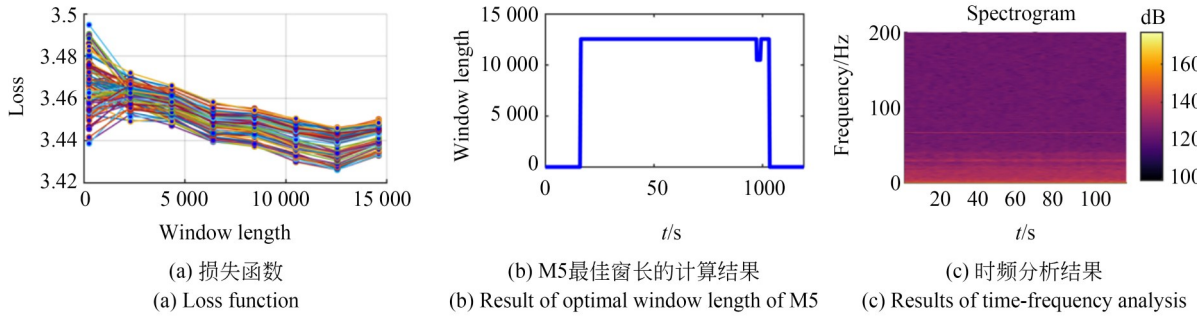


图 5 M5 工况的分析结果  
Fig. 5 Analysis result of M5 condition

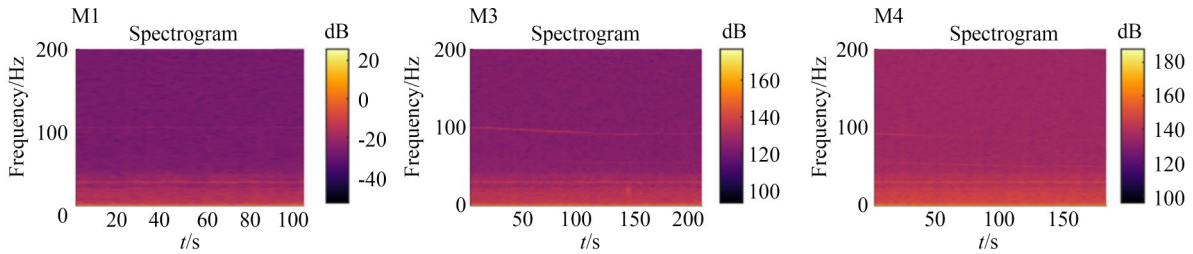


图 6 不同工况的时频分析结果  
Fig. 6 Time-frequency analysis results of different working conditions

工况能力。以 M1 与 M5 工况为例,对时频矩阵  $S(t, f)$  按列方向进行切片,对每列频谱  $S_i(f)$  提取主频峰值,考虑低频噪声的影响,需限定主频搜索频带,如式(8)所示。然后,计算  $N$  个切片峰值频率的平均值作为特征频率反演的测量值,如式(9)所示。

$$\hat{f}_i = \arg \min_{f \in [f_{min}, f_{max}]} |S_i(f)|, \quad (8)$$

$$\bar{f}_{inv} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{f}_i. \quad (9)$$

以接触式振动传感器测量数据为基准频率,定义特征频率反演准确度为绝对误差,如下:

$$e_{abs} = \{ \bar{f}_{inv} - f_{true} \}. \quad (10)$$

取其标准差即可评价特征频率反演精度,如下:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\hat{f}_i - \bar{f}_{inv})^2}. \quad (11)$$

M1, M5 工况的频率反演精度分别如图 7 和图 8 所示,图中箭头标注点对应的窗长为 12 544 个采样点。在该窗长附近,特征频率的反演精确度变化已不再明显,继续增大窗长只会增加计算开销。

按理想情况,即不考虑动量轮的转速误差,

M1 动量轮转速为 6 000 r/min,对应特征频率为 100 Hz,按式(9)~式(10)计算得到的特征频率为 99.90 Hz; M5 动量轮转速为 4 000 r/min;对应特征频率为 66.67 Hz,计算得到的特征频率为 66.96 Hz。采用接触式振动传感器测量得到的特征频率为真值进行验证分析,传感器选用电容式加速度传感器,两两一组共计 6 个传感器,分别安装在与其坐标轴正方向(图 2 中给出了卫星模型坐标系定义)一致的卫星模型外框钢架上,安

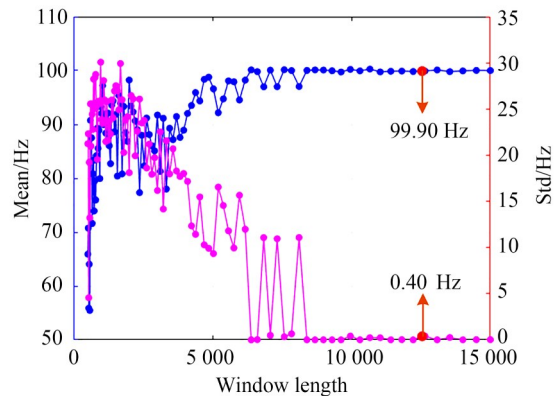


图 7 M1 特征频率反演精度  
Fig. 7 Inversion accuracy of eigenfrequencies of M1

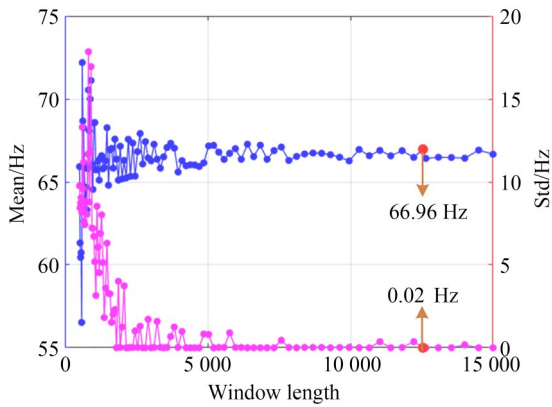


图 8 M5 特征频率反演精度

Fig. 8 Inversion accuracy of eigenfrequencies of M5

装方向与卫星模型坐标系保持一致。在扫频过程中记录 XYZ 3 个方向上的功率谱密度,实际采用沿 +X 方向上的扫频数据, M1, M5 工况振动传感器功率谱及取 log 结果分别如图 9 和图 10 所示。振动传感器数据进行了背景噪声剔除与滤波处理(7~500 Hz)。取 log 结果中,在原始数据上标注了功率谱密度的峰值点, M1 工况为 100 Hz, 与理想值相等, M5 工况为 66.72 Hz。由式(11)可得 M1 工况与 M5 工况的频率反演准确度分别为 0.1, 0.24 Hz。光学测量反映的是目标表面反射光强的整体振动调制效应,其有

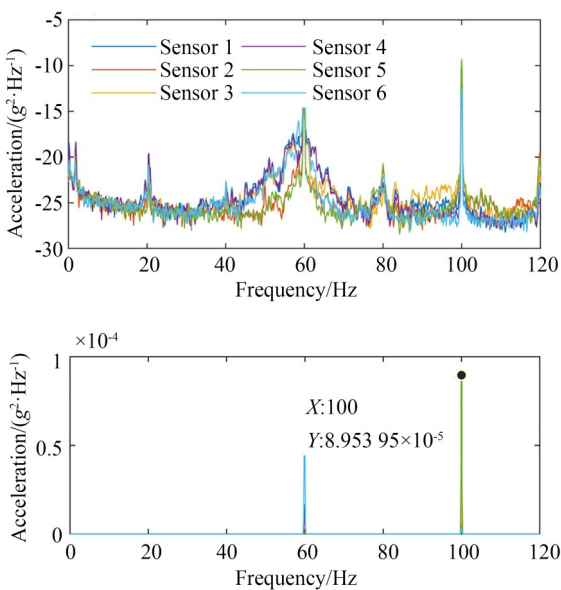


图 9 M1 振动传感器功率谱及取 log 结果

Fig. 9 Power spectra of vibration sensor of M1 and result of taking logarithm

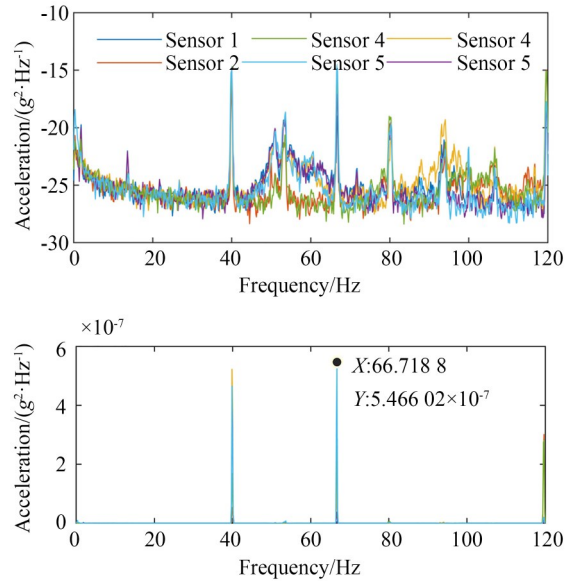


图 10 M5 振动传感器功率谱及取 log 结果

Fig. 10 Power spectra of the vibration sensor of M5 and result of taking logarithm

效频带和信噪比可能受目标表面特性、光照条件及光学系统传递函数的影响;而振动传感器直接测量特定点的机械振动,受安装点刚性、传感器及耦合方式的影响。而光学测量噪声主要来源于环境光的干扰、空气扰动以及目标表面反射率变化等,接触式测量噪声则主要来源于传感器本底噪声、电子电路噪声等。尽管两种测量原理存在差异,但在本实验设置下(刚性连接平台、主要关心动量轮基频),两者测量的主导频率成分具有良好的的一致性,验证了光学反演结果的可靠性。

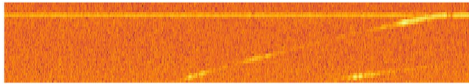
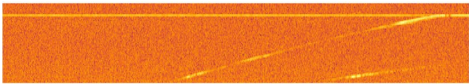
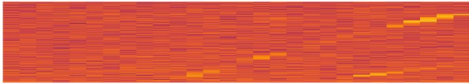
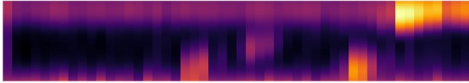
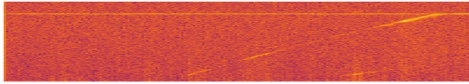
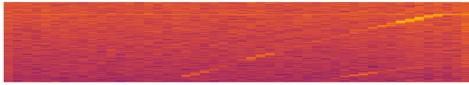
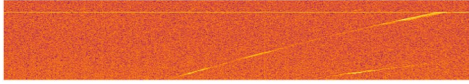
将本文提出的方法与 STFT、自适应小波分解、EMD、VMD 等时频分析方法进行对比,以动量轮特征频率反演准确度、反演精确度、时效性以及能否区分变工况能力 4 个指标进行衡量,数据源均选用 M2 工况,降采样后共 975 400 个采样点,在搭载 Intel Core i7-12700H 处理器(基础频率 2.30 GHz,最高睿频 4.70 GHz),16 GB RAM 的笔记本电脑上进行,所有方法的运行时间均在系统无其他高负载任务时测量。不同方法的对比结果如表 3 所示。可以发现,当  $L=512$  时,STFT 时频谱时间分辨率高,但频率分辨率低,频谱宽,导致  $\sigma_f$  偏大,能区分部分变化;当  $L=1024$  时,频率分辨率有所提高,但稳态精度和瞬

态细节仍不足;  $L$  进一步增大至 16 384 时, 频率混叠, 特征频率无法正确检出。CWT-HHS 计算时间长, 时频分布存在能量弥散, 精度与区分能力

差。EMD, VMD 与本文方法在反演准确度、精度以及时效性上表现接近, 在变工况区分能力上, 本文方法略优于其他两种方法。

表 3 不同方法的对比结果

Tab. 3 Result comparison of different methods

算 法	时频分析结果	$e_{\text{abs}}/\text{Hz}$	$\sigma_f/\text{Hz}$	CPU time/s	变工况区分
STFT ( $L=512$ )		8.81	23.02	99.56	④
STFT ( $L=1\ 024$ )		1.79	7.22	82.69	②
STFT ( $L=65\ 536$ )		—	—	82.70	⑥
CWT-HHS		9.42	20.04	108.23	⑦
EMD		0.12	0.42	85.34	③
VMD		0.09	0.31	105.78	⑤
Ours		0.10	0.35	91.25	①

## 5 结 论

本文针对空间目标时序光度信号的非平稳特性及传统 STFT 方法时频分辨率不可调和的难题, 提出了一种基于自适应窗长 STFT 的特征频率反演方法。该方法构建了融合信息熵、峰值能量差异和底噪水平的混合损失函数, 建立了动态优化 STFT 窗长的准则, 实现了窗长参数与信号局部非平稳特性的自适应匹配。通过搭建双通道时序光度信号采集装置并模拟卫星动量轮多种工况(稳态、加速、减速、混合), 验证了算法的有效性。实验结果表明, 对于稳态工况, 本方法能高精度反演动量轮特征频率, 估计误差小于 0.3 Hz, 反演精度达 0.4 Hz; 对于非稳态工况, 能准确分辨工况变化过程的起止时刻。相较于固定窗长 STFT、自适应小波分解、EMD 和 VMD

等方法, 本方法在反演精度、瞬变过程识别能力和计算效率方面展现了良好的综合优势。

自适应窗长 STFT 方法显著提升了对空间目标混合运行工况下微振动特征的反演能力, 为航天器的在轨运行状态精细判断、健康状态评估以及姿态控制系统关键部件的早期故障预警提供了技术支撑。未来工作可探索将该方法与人工智能算法结合, 进一步提升状态识别与故障诊断的自动化与智能化水平。

### 作者贡献声明:

余凯: 算法提出, 论文构思和撰写;

黄浦: 实验设计及数据采集;

李宇喆: 上位机软件编写;

董昊卿: 实验数据处理;

张绪国: 方法、思想的提出。

## 参考文献:

- [1] ENDSLEY M R, JONES D G. Situation awareness oriented design: review and future directions [J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2024, 40(7): 1487-1504.
- [2] LIL, YU Y, WANG L, *et al.* Modeling and analysis of the influence caused by micro-vibration on satellite attitude control system [J]. *Acta Astronautica*, 2023, 213: 71-80.
- [3] XU M T, YAO H M. Fault diagnosis method of wheelset based on EEMD-MPE and support vector machine optimized by quantum-behaved particle swarm algorithm [J]. *Measurement*, 2023, 216: 112923.
- [4] HU J, LUO Y, ZHANG Q, *et al.* Micro-motion feature extraction of space targets based on sinusoidal frequency modulation Fourier transform [J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019 (21): 8076-8079.
- [5] JUNG K, LEE J I, KIM N, *et al.* Classification of space objects by using deep learning with micro-Doppler signature images [J]. *Sensors*, 2021, 21(13): 4365.
- [6] PENG C, ZENG C, WANG Y G. Phase-based noncontact vibration measurement of high-speed magnetically suspended rotor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(7): 4807-4817.
- [7] PENG C, ZHU M T, WANG Y G, *et al.* Phase-based video measurement for active vibration suppression performance of the magnetically suspended rotor system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(2): 1497-1505.
- [8] WANG W Z, MOTTERSHEAD J E, SIEBERT T, *et al.* Frequency response functions of shape features from full-field vibration measurements using digital image correlation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 28: 333-347.
- [9] YANG Y Z, JIANG Q. A novel phase-based video motion magnification method for non-contact measurement of micro-amplitude vibration [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 215: 111429.
- [10] XU Y F. A photogrammetry-based experimental modal analysis method by tracking visible laser spots [J]. *Measurement*, 2020, 151: 106963.
- [11] ENDO T, TSUCHIKAWA T. Estimation of photometric light curves for characterization of GEO satellites using a BSDF-based illumination model [J]. *IEICE Technical Report; IEICE Tech. Rep.*, 2024, 124(56): 60-65.
- [12] RICHTER J M. *Linear-Stokes Hyper Temporal Polarimeter for Long-Range Characterization of Vibrating Objects* [D]. Tucson: The University of Arizona, 2022.
- [13] 李宇喆, 吴立民, 张绪国. 基于时域光度探测的卫星频率特性反演研究 [J]. *航天返回与遥感*, 2023, 44(2): 63-70.
- LI Y ZH, WU L M, ZHANG X G. Inversion study of satellite frequency characteristics based on temporal photometric imaging [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2023, 44(2): 63-70. (in Chinese)
- [14] COSTA A H, HENGSTLER S. Adaptive time-frequency analysis based on autoregressive modeling [J]. *Signal Processing*, 2011, 91(4): 740-749.
- [15] MA J H, LI H L, TANG B P, *et al.* Rolling bearing fault diagnosis based on improved VMD-adaptive wavelet threshold joint noise reduction [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, 14(10): 168781322211283.
- [16] ZHENG J D, SU M X, YING W M, *et al.* Improved uniform phase empirical mode decomposition and its application in machinery fault diagnosis [J]. *Measurement*, 2021, 179: 109425.
- [17] FENG Z P, LIANG M, CHU F L. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 38(1): 165-205.
- [18] 张瑞林, 涂兴华. 二次谐波的变分模态分解和小波阈值函数降噪 [J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 80-87.
- ZHANG R L, TU X H. Variational mode decomposition and wavelet threshold function de-noising for second harmonics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 80-87. (in Chinese)
- [19] MANKOUR A, SMAHAT A, BENSİKADOUR E H, *et al.* Experimental analysis of noise disturbances generated by reaction wheel [J]. *The*

- Aeronautical Journal*, 2024, 128 (1328) : 2393-2407.
- [20] OH H S, CHEON D I. Precision measurements of reaction wheel disturbances with frequency compensation process[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2005, 19(1): 136-143.
- [21] GONG X X, LI L, YU Y, *et al.* Error analysis and calibration of micro-vibration test platform developed for advanced pointing instrument[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 173: 109055.
- [22] 苏欣, 孟晓风. 基于信息熵的自适应窗长 STFT 算法在 AFVISAR 中的应用[J]. *现代电子技术*, 2011, 34(5): 89-91, 94.
- SU X, MENG X F. Application of window-length-adaptive STFT algorithm based on information entropy in AFVISAR[J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, 34(5): 89-91, 94. (in Chinese)
- [23] 彭红焘, 王梦琦, 何文波, 等. 基于经验模态分解与巴特沃斯滤波的  $\Phi$ -OTDR 去噪算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(13): 222-227.
- PENG H T, WANG M Q, HE W B, *et al.*  $\Phi$ -OTDR denoising algorithm based on empirical mode decomposition and butterworth filtering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(13): 222-227. (in Chinese)

#### 作者简介:



余 凯(1992—),男,湖北武汉人,博士,工程师,2024年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事红外光谱探测,空间目标探测方面的研究。E-mail:mailto:15201441833@139.com

#### 通讯作者:



张绪国(1982—),男,博士,研究员,2011年于北京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为空间目标探测。E-mail:zxg-ltt@163.com