空间引力波探测星座效能评估系统构建与仿真分析

汤宁标[1,2]　杨中光[1]　胡海鹰[1,2,3]　蔡志鸣[1*]

王鹏程[1,2,3]　杨　然[4]　杜明辉[4]

1（中国科学院微小卫星创新研究院　上海市　201304）

2（中国科学院大学　北京　100049）

3（中国科学院卫星数字化技术重点实验室　上海　201210)

4（中国科学院力学研究所　北京　100190）

摘要　空间引力波探测星座的科学探测效能受仪器噪声、星间链路运行状态、有效观测时长和目标波源特征等因素共同影响，仅采用单一或局部指标难以全面表征星座的综合探测能力。针对该问题，本文构建了空间引力波探测星座效能评估系统，围绕仪器性能、运行可用性和科学响应三类指标，建立了动态全链路仿真、有效探测时长评估和信噪比计算等功能模块。基于 MATLAB/Simulink 平台，以日心轨道太极方案为例开展仿真验证。结果表明，该系统能够输出检验质量残余加速度噪声、光学测量噪声和探测灵敏度等关键指标，并可模拟三星建链与断链重建过程对有效探测时长的影响。在此基础上，系统结合典型引力波源特征开展信噪比计算，能够表征银河系致密双星验证源、极端质量比旋近系统和大质量双黑洞系统等不同波源的可见性差异，验证了其用于空间引力波探测任务科学效能评估的可行性，可为探测方案对比、系统指标分解和科学目标满足度分析提供支撑。

关键词　空间引力波探测，探测效能评估，动态全链路仿真，有效探测时长，信噪比

中图分类号　V19

最新录用

Construction and Simulation Analysis of Performance Evaluation System for Space-Based Gravitational Wave Detection Constellations

TANG Ningbiao[1,2]　YANG Zhongguang[1]　HU Haiying[1,2,3]　CAI Zhiming[1*]

WANG Pengcheng[1,2,3]　YANG Ran[4]　DU Minghui[4]

1 (*Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai,* 201304)*

2 (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing,* 100049)

* 国家重点研发计划项目资助（2024YFC2207204）

XXXX-XX-XX 收到原稿，XXXX-XX-XX 收到修定稿

3 (*Key Laboratory of Satellite Digitization, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201210)
4 (*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing,* 100190)

Abstract The scientific detection performance of a space-based gravitational wave detection constellation is jointly affected by instrumental noise, inter-satellite link operation, effective observation time, and the characteristics of target gravitational wave sources. A single or isolated performance metric is insufficient to comprehensively characterize the detection capabilities of such a mission under realistic system and operational constraints. To address this issue, this paper develops a performance evaluation system for space-based gravitational wave detection constellations. The system is organized around three categories of evaluation indicators: instrument performance, operational availability, and scientific response. Corresponding functional modules are established, including dynamic full-link simulation, effective detection time assessment, and signal-to-noise ratio calculation. Based on the MATLAB/Simulink platform, the heliocentric Taiji-like mission scheme is selected as a representative case for simulation verification. The results show that the system can obtain key performance quantities, including residual acceleration noise of the test masses, optical metrology system noise, and detector sensitivity. It can also simulate the influence of three-spacecraft link acquisition and link reconstruction after interruption on the effective detection time. Furthermore, by combining the detector sensitivity, effective observation time, and characteristic strains of representative gravitational-wave sources, the system evaluates the signal-to-noise ratios of verification galactic binaries, an extreme mass-ratio inspiral system, and massive black hole binary systems. The obtained results demonstrate that the proposed system can characterize the visibility differences among different types of sources and provide a feasible framework for scientific performance assessment of space-based gravitational wave detection missions. The system can support mission scheme comparison, system-level requirement decomposition, and analysis of the degree to which scientific objectives can be satisfied.

Key words space-based gravitational wave detection; detection performance evaluation; dynamic full-link simulation; effective detection time; signal-to-noise ratio

0 引言

空间引力波探测面向毫赫兹频段，通过多颗航天器构成高精度星座编队，是研究银河系致密双星验证源、极端质量比旋近系统和大质量双黑洞系统等低频引力波源的重要技术途径[1]。目前，空间引力波探测已由概念论证逐步进入工程实施与关键技术验证阶段，形成了以 LISA[2]、太极[3]和天琴[4]等任务为代表的多方案发展格局。其基本思想是在相距数十万至数百万公里的航天器之间建立高精度激光干涉链路，以自由悬浮检验质量作为惯性参考，将引力波引起的微小时空应变转化为星间距离变化进行测量。由于目标应变信号极其微弱，探测系统通常需要在敏感频段实现 10^{-20} $Hz^{-1/2}$ 量级甚至更高的探测灵敏度，并将光学测量噪声和

检验质量残余加速度噪声分别控制在 10^{-12} m·Hz$^{-1/2}$ 和 10^{-15} m·s^{-2}·Hz$^{-1/2}$ 量级[5]。

围绕上述探测需求，国内外已在任务总体设计、关键载荷技术、系统噪声建模和科学效能评估等方面开展了较为系统的研究。在任务总体设计方面，LISA、天琴和太极等任务分别围绕日心轨道或地心轨道星座构型、星间臂长、目标频段、观测模式和科学目标展开论证，并进一步将目标波源探测需求转化为臂长、轨道稳定性、测距精度、惯性参考精度和任务寿命等系统级指标[6-9]。在关键载荷技术方面，研究重点集中于自由悬浮检验质量、惯性传感器、星间激光干涉测量、望远镜与光学平台、相位计、微推进器、无拖曳控制以及星间捕获、指向和跟踪等环节[10-13]，其中低噪声惯性参考和高精度激光干涉测量是实现空间引力波探测的核心基础。在系统噪声建模方面，已有工作围绕检验质量残余加速度噪声和光学测量噪声开展误差预算与传递分析[14-16]，重点考虑温度场、磁场、自引力场、残余气体、激光频率噪声、散粒噪声、时钟噪声和光束指向误差等因素对探测灵敏度的影响，并结合探测器响应函数、时间延迟干涉和银河系双星混淆噪声等模型构建灵敏度曲线[17]。在科学效能评估方面，相关研究通常基于灵敏度曲线和目标波源应变模型，分析银河系致密双星验证源、极端质量比旋近系统和大质量双黑洞系统等典型波源的信噪比、可探测距离、参数估计精度和任务科学产出，同时逐步将任务时长、数据间隙、异常恢复过程和科学数据占空比等运行因素纳入评估范围[18-20]。

近年来，空间引力波探测研究也逐步由单项指标分析向系统级仿真平台构建发展。围绕 LISA，LISACode、LISANode 和 LISA Instrument 等仿真工具将星座轨道、探测器响应、仪器噪声、星载时钟、星间链路、时延干涉和测量数据生成等环节纳入统一框架，用于支撑任务级测量链建模和数据处理算法验证[21,22]。国内相关研究也围绕天琴、太极等任务开展了仿真平台建设，例如面向天琴时延干涉与数据预处理的 TQTDI 工具[23]、面向多星座联合观测的 GWSpace 平台[24]，以及面向太极任务的数据挑战和高保真数据仿真流程[25]。这些工作表明，空间引力波探测仿真正由灵敏度曲线、噪声预算和单一波源信噪比计算，逐步拓展为覆盖轨道、载荷、噪声、控制、数据处理和科学分析的系统级建模。

总体来看，现有研究已为任务方案设计、载荷指标分解、噪声预算和目标波源可探测性分析提供了重要基础。然而，相关工作多侧重于单项指标或局部环节：

最新录用

灵敏度分析通常基于给定噪声谱或标称指标，信噪比计算多采用理想观测时长或预设科学数据占空比，数据间隙研究则主要从科学数据处理和参数估计角度讨论观测中断影响。已有系统级仿真平台则多侧重于仪器测量链建模、时延干涉数据生成、数据预处理或科学数据分析流程，主要服务于信号检测、噪声抑制和参数估计等问题。对于星座级工程方案论证而言，探测效能并非由单一灵敏度曲线决定，而是由航天器动态全链路噪声、星间建链与断链重建过程、有效探测时长以及目标波源应变特征共同决定。因此，有必要构建能够贯通“系统噪声—探测灵敏度—有效探测时长—信噪比”的系统级评估流程，以更全面地刻画空间引力波探测星座在实际运行约束下的科学探测能力。

针对上述问题，本文构建空间引力波探测星座效能评估系统，并开展仿真分析。该系统以探测灵敏度、有效探测时长和典型波源信噪比为核心评估指标，集成系统初始化、动态全链路仿真、有效探测时长评估和信噪比计算等模块。其中，动态全链路仿真用于获得检验质量残余加速度噪声、光学测量噪声及探测灵敏度；有效探测时长评估用于分析三星建链和断链重建进入科学探测模式所需时间；信噪比计算则结合探测灵敏度、有效观测时长和典型波源应变特征，评估不同引力波源在给定星座方案下的可见性。本文进一步面向日心轨道下的太极方案开展仿真计算，对探测灵敏度、有效探测时长以及银河系致密双星验证源、极端质量比旋近系统和大质量双黑洞系统等典型波源的信噪比进行分析，为空间引力波探测星座方案优化、关键指标分解和科学目标满足度评估提供支撑。

最新录用

1 系统总体设计

围绕科学探测效能评估需求，本节首先明确系统的设计目标和评估指标，随后给出系统总体架构及各层之间的数据传递关系，为后续关键模块构建和仿真验证奠定基础。

1.1 设计目标与评估指标

空间引力波探测星座的科学探测效能，是指星座在给定系统构型、噪声水平、控制能力和任务运行条件下，对典型引力波源开展有效观测、信号识别和科学分析的综合能力。该能力具有显著的系统耦合特征：仪器噪声水平决定探测灵敏度下限，星间链路建立与恢复过程影响有效探测时长，波源本身的频域特征和演化

规律则决定信号能量的累积方式及最终信噪比。因此，本文从仪器性能、运行可用性和科学响应三个层面构建星座探测效能评估指标体系。

仪器性能指标用于表征星座对微弱引力波应变信号的基本测量能力，主要包括检验质量残余加速度噪声、光学测量噪声和探测灵敏度。其中，残余加速度噪声主要影响观测频段的低频部分，光学测量噪声主要影响观测频段的高频部分，探测灵敏度则综合反映噪声水平、星间臂长和探测器响应对观测能力的共同作用。

运行可用性指标用于描述星座进入、保持和恢复科学探测模式的能力，主要包括三星建链时长、断链重建时长、有效探测时长和科学数据占空比。该类指标反映链路构建、指向捕获、稳定控制以及异常恢复等过程对有效探测时长的影响，是连接工程运行状态与科学数据可用性的关键环节。

科学响应指标用于评价星座对具体科学目标的探测能力，主要包括银河系致密双星验证源、极端质量比旋近系统和大质量双黑洞系统等典型波源的信噪比。该类指标综合考虑探测灵敏度、有效观测时长和波源应变特征，可用于判断不同波源在给定星座方案下的可见性和探测裕度。

1.2 系统总体架构

空间引力波探测星座效能评估系统的总体架构如图 1 所示。系统面向科学探测效能评估需求，将任务参数设置、动态过程仿真、效能指标计算和结果分析展示纳入统一流程，整体可划分为参数输入层、动态仿真层、效能计算层和结果分析层。各层之间按照“参数驱动仿真、仿真支撑计算、计算服务评估”的逻辑进行数据传递，从而实现由工程仿真结果向科学探测效能指标的转化。

参数输入层是系统运行的基础，主要用于完成探测方案、航天器状态、载荷参数、环境参数和波源参数等信息的统一配置。输入内容包括三颗航天器的轨道初始位置和速度、检验质量物理参数、激光干涉测量参数、星间测距误差、时钟稳定性、多物理场扰动参数以及典型引力波源特征数据等。通过对上述参数进行集中管理，可保证动态全链路仿真、建链与断链重建仿真以及信噪比计算采用一致的参数口径，为不同探测方案之间的对比分析提供统一输入条件。

动态仿真层用于模拟空间引力波探测星座在科学探测及链路建立、恢复过程中的动态行为，是连接系统参数与效能指标的核心环节。该层主要包括动态全链路仿真和有效探测时长相关仿真两部分。动态全链路仿真综合考虑航天器自引力

最新录用

场、温度场、磁场等多物理场影响，结合系统噪声模型和无拖曳控制响应，输出光学测量噪声和检验质量残余加速度噪声。有效探测时长仿真则面向三星建链和断链重建过程，模拟星间姿态粗指向、扫描捕获、精指向和链路稳定保持等环节，获得星座进入或恢复科学探测模式所需时间。

效能计算层在动态仿真结果基础上进一步计算科学探测效能指标。该层主要包括灵敏度计算、有效探测时长评估和信噪比计算三个功能模块。其中，灵敏度计算模块根据动态全链路仿真得到的光学测量噪声和残余加速度噪声，结合灵敏度模型获得探测灵敏度；有效探测时长评估模块根据三星建链和断链重建所需时间，结合相关运行参数，计算任务期内的有效探测时长和科学数据占空比；信噪比计算模块则将探测灵敏度、有效探测时长和不同波源的特征应变数据相结合，计算银河系致密双星验证源、极端质量比旋近系统和大质量双黑洞系统等典型波源的信噪比。

结果分析层用于对系统输出的关键指标进行展示、对比和分析。该层可输出全链路噪声变化、探测灵敏度曲线、三星建链时长、断链重建时长、不同波源信噪比以及不同探测方案之间的效能对比结果。通过结果分析层，系统能够从仪器性能、运行可用性和科学目标响应三个方面综合评价空间引力波探测任务的科学探测效能，为探测方案优化、系统指标分解和任务科学目标满足度分析提供依据。

最新录用

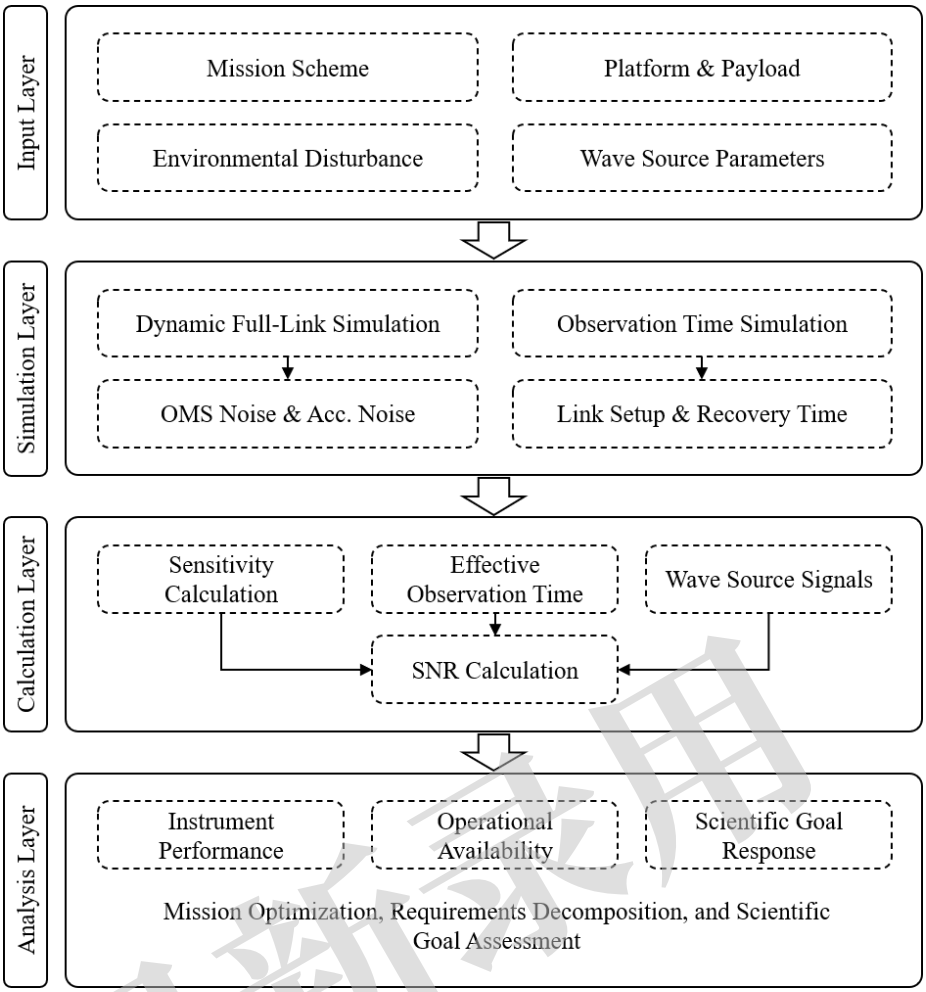


图 1　系统总体架构

Fig. 1　Overall system architecture

从数据传递关系来看，系统首先由参数输入层完成任务场景、星座构型、载荷状态和波源信息的统一配置，并将相关参数分别传递至动态全链路仿真和有效探测时长仿真模块。动态全链路仿真输出的光学测量噪声和检验质量残余加速度噪声进入灵敏度计算模块，用于获得探测灵敏度；建链与断链重建仿真输出的时间结果进入有效探测时长评估模块，用于计算有效探测时长和科学数据占空比。在此基础上，信噪比计算模块进一步融合探测灵敏度、有效探测时长和典型波源特征应变，形成面向不同波源和不同探测方案的科学响应评价结果。由此，系统实现了从任务参数、动态仿真结果到科学探测效能指标的逐级传递与综合分析。

2 关键模块构建

本节围绕探测灵敏度、有效探测时长和典型波源信噪比三类效能指标，介绍

系统关键模块的构建方法。具体包括动态全链路仿真模块、有效探测时长评估模块和信噪比计算模块，分别用于获得全链路噪声数据、建链与断链重建时长以及不同波源的信噪比结果。

2.1 动态全链路仿真模块

动态全链路仿真模块用于模拟科学探测模式下航天器系统多物理场扰动、噪声产生机制与无拖曳姿态控制响应之间的动态关系。该模块主要由多物理场计算、全链路噪声建模和无拖曳控制三部分组成，具体结构如图 2 所示。其中，多物理场计算部分考虑航天器自引力场、温度场、磁场和空间辐射等影响，并根据航天器状态和外部环境输入进行实时更新；全链路噪声建模部分用于表征光学测量噪声和检验质量残余加速度噪声，相关噪声主要来源于多物理场扰动、星载设备噪声及其与测量链路之间的耦合效应；无拖曳姿态控制部分则描述编队航天器、移动光学组件和双检验质量之间的动力学关系及控制响应。在给定初值条件的情况下，仿真系统形成“多物理场–全链路噪声–动力学–多物理场”的动态闭环全链路仿真，并实时输出相关物理量的数值变化数据。

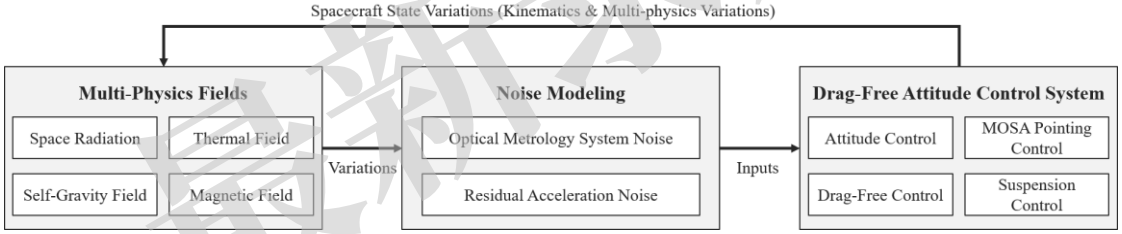


图 2　动态全链路仿真框架

Fig. 2　Dynamic full-link simulation framework

动态全链路仿真模块的直接输出为光学测量噪声和检验质量残余加速度噪声等基础数据。这些数据并不直接等同于科学探测效能指标，而是作为效能计算层的输入，用于进一步计算探测灵敏度。设单链路光学测量噪声和单检验质量残余加速度噪声的功率谱密度分别为 P_{OMS} 和 P_{ACC}，则探测灵敏度模型[5]可表示为

$$S_n(f)=\frac{10}{3L_{\mathrm{arm}}^2}\times\left(P_{OMS}+2\left(1+\cos^2\left(\frac{f}{f_*}\right)\right)\frac{P_{ACC}}{(2\pi f)^4}\right)\times\left(1+\frac{6}{10}\times\left(\frac{f}{f_*}\right)^2\right)+S_c(f)\,\mathrm{Hz}^{-1} \quad (1)$$

其中，f 表示探测频率；$S_c(f)$ 是难以分辨的银河系双星混淆噪声；应变灵敏频段 $f_*=\dfrac{c}{2\pi L_{arm}}$，$c$ 表示光速；L_{arm} 是星间干涉仪臂长。特征应变灵敏度为 $\sqrt{fS_n}$。由式（1）可知，检验质量残余加速度噪声对低频段灵敏度影响较为显著，而随

着频率升高，光学测量噪声的相对影响逐渐增强。通过该模型，可将动态全链路仿真得到的噪声数据转化为频域探测灵敏度曲线，为后续波源信噪比计算提供基础。

2.2 有效探测时长评估模块

有效探测时长评估模块用于计算星座进入或恢复科学探测模式所需时间，并进一步评估任务期内可用于科学观测的有效时长。空间引力波探测任务在运行过程中可能受到计划内操作和计划外异常的影响，例如参数标定、数据传输、通信天线调整、链路中断或系统故障等。这些过程会产生数据间隙，从而降低有效探测时长和科学数据占空比，并进一步影响长时间信号的信噪比累积。

该模块主要包括三星建链和断链重建两类仿真。三星建链仿真用于计算星座从初始状态进入科学探测模式所需时间，断链重建仿真用于计算链路中断后重新恢复科学探测能力所需时间。仿真过程涉及三颗航天器、望远镜夹角、检验质量动力学与控制以及星间姿态指向规划等内容，按照粗指向、扫描捕获、精指向和稳定保持的过程逐步完成星间链路建立或恢复。

综合考虑计划内和计划外中断造成的观测时间损失，任务期内的有效探测时长T_{eff}可表示为

$$T_{eff} = T_{tot} - N_p\left(t_p + \Delta t_p\right) - N_u\left(t_u + \Delta t_u\right) \tag{2}$$

其中，T_{tot}为任务总时长；N_p和N_u分别为任务期内计划内和计划外中断次数；t_p和t_u分别为单次计划内和计划外中断后恢复科学探测模式所需的恢复时间；Δt_p为通信天线调整、检验质量带电量测量等计划内任务所需的预留时间；Δt_u为计划外异常发生后用于故障诊断、地面决策及指令上传等地面干预过程的预留时间。

进一步地，科学数据占空比定义为有效探测时长与任务总时长之比，用于表征任务期内的有效观测比例，可表示为

$$R_{dc} = \frac{T_{eff}}{T_{tot}} \tag{3}$$

在系统实现中，设定t_p按照单链路中断恢复所需时长计算，t_u按照三星建链所需时长计算。由此，建链与断链重建仿真结果能够转化为有效探测时长指标，

最新录用

并参与后续信噪比计算。

2.3 信噪比计算模块

信噪比计算模块用于评价不同引力波源在给定探测方案下的可见性，是连接系统性能指标与科学目标响应能力的关键模块。该模块以动态全链路仿真和效能计算结果为基础，读取由多物理场与无拖曳控制耦合仿真得到的探测灵敏度变化，并结合有效科学探测时长和不同波源的特征应变数据，计算典型引力波源信号的信噪比。通过该模块，可将系统噪声水平、观测时长和波源特征统一映射为科学探测效能指标。

本文面向日心轨道下的太极方案，选取三类典型目标波源开展信噪比评估：

（1）银河系致密双星验证源，共 55 个；

（2）极端质量比旋近系统，共 1 个，中心天体质量为 $10^6 M_{\odot}$，小天体质量为 $10 M_{\odot}$，距离为 1 Gpc；

（3）大质量双黑洞系统，共 4 个，总质量分别为 10^4、10^5、10^6 和 $10^7 M_{\odot}$，红移均为 3，质量比均为 0.3。

上述波源覆盖了空间引力波探测任务中具有代表性的单频验证源和宽频演化源，可用于检验系统对不同类型科学目标的评估能力。

针对不同波源类型，信噪比计算采用不同形式[5]。

对于银河系致密双星验证源等近似单频引力波信号，信噪比主要由目标频点处的波源特征应变和探测灵敏度决定，可表示为

$$SNR = \frac{h_c(f)}{\sqrt{fS_n(f)}} \tag{4}$$

对于极端质量比旋近系统和大质量双黑洞系统等宽频引力波信号，其信号能量分布在一定频率范围内，信噪比由波源特征应变与探测灵敏度在频域内的匹配关系决定，可表示为

$$SNR = \sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{h_c^2(f)}{f^2 S_n(f)} \mathrm{d}f} \tag{5}$$

其中，SNR 表示信噪比，f 表示探测频率，$f_{\min}$ 和 $f_{\max}$ 分别为信号所在频段的下限和上限，h_c 表示不同波源的特征应变信号。

最新录用

此外，数据间隙造成的科学数据占空比会对不同类型波源的信噪比产生不同影响。对于银河系致密双星验证源和极端质量比旋近系统等长期持续信号，本文采用 $\sqrt{R_{dc}}=\sqrt{T_{eff}/T_{tot}}$ 对信噪比进行修正。对于大质量双黑洞系统，其信噪比主要集中于并合附近的较短时间内，若数据间隙未与主要信号阶段重合，平均占空比对信噪比的影响相对较小，因此本文不作统一修正。

3. 仿真结果与分析

为验证所构建效能评估系统的可用性，本文基于 MATLAB/Simulink 平台对系统主要功能进行验证。仿真结果主要从三个方面进行分析：首先，验证系统对光学测量噪声、检验质量残余加速度噪声和探测灵敏度的计算能力；其次，分析三星建链和断链重建过程对有效科学探测时长的影响；最后，结合日心轨道下的太极方案，对典型引力波源的信噪比进行计算与对比。

3.1 仿真参数设置

考虑到空间引力波探测任务的毫赫兹频段特性，根据奈奎斯特采样定理及低频信号分析需求，本文将系统仿真步长设置为 0.1 s，仿真时长设置为 20000 s，以满足 10^{-4}~1 Hz 目标频段的分析需求。具体仿真参数如表 1 所示。

表 1　系统仿真参数设置

Table 1　System simulation parameter settings

参数	数值	单位
仿真步长	0.1	s
仿真时长	20000	s
目标频段	0.0001~1	Hz
星间臂长	3×10^{9}	m
TM 质量	1.95	kg
TM 边长	0.046	m
TM 磁化率	3×10^{-6}	/
TM 剩磁矩	2×10^{-8}	$A\cdot m^2$
TM 残余电荷量	1.6022×10^{-12}	C
激光波长	1.064×10^{-6}	m
外差频率	1.8×10^{7}	Hz
外差干涉效率	0.7	/
调制深度	0.53	/
本地激光功率	1.75×10^{-3}	W
航天器接收激光功率	1.77×10^{-9}	W

最新录用

检验质量接收激光功率	1×10^{-4}	W
激光相对功率波动	1×10^{-4}	$Hz^{-1/2}$
星间测距误差	0.1	m

表 1 仅列出了与全链路噪声、探测灵敏度和信噪比计算直接相关的主要参数。其余参数，如航天器轨道初始状态、多物理场扰动参数、无拖曳控制参数、移动光学组件指向控制参数以及建链、断链重建控制参数等，均根据任务设计指标和工程约束在系统初始化模块中统一设置，以保证各仿真模块采用一致的输入条件。

3.2 动态全链路仿真结果

基于表 1 所示参数，系统首先开展动态全链路仿真，获得科学探测模式下的光学测量噪声和检验质量残余加速度噪声，并进一步计算探测灵敏度。考虑到各航天器检验质量及测量链路均采用一致的参数配置和噪声模型，本文以航天器 1 中的检验质量 1（SC1/TM1）为例展示动态全链路仿真结果，如图 3、4 所示，并基于式（1）计算系统的探测灵敏度，如图 5 所示。

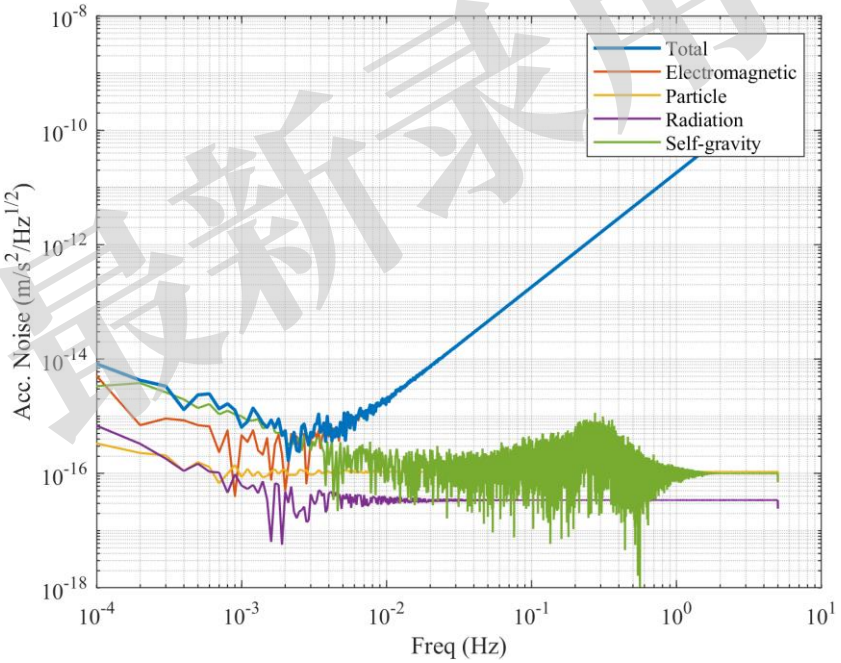


图 3　SC1/TM1 残余加速度噪声

Fig. 3　Residual acceleration noise of SC1/TM1

最新录用

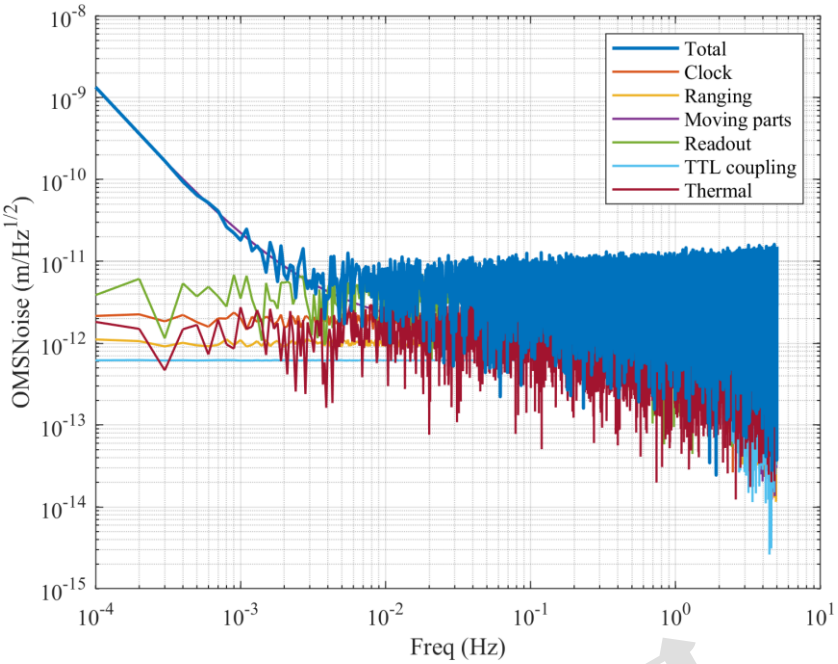


图 4　SC1/TM1 光学测量噪声

Fig. 4　Optical metrology system noise of SC1/TM1

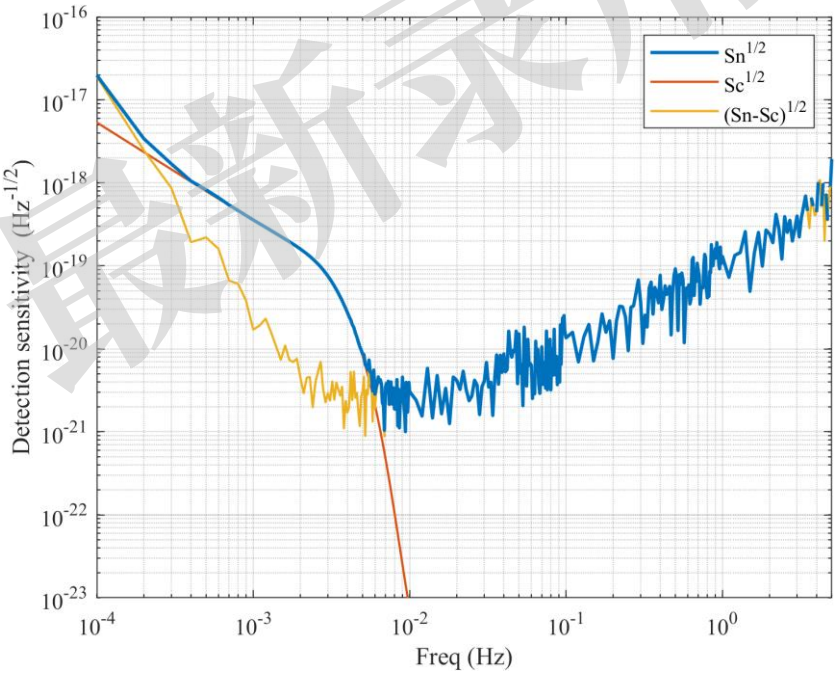


图 5　系统探测灵敏度

Fig. 5　System detection sensitivity

仿真结果表明，系统能够基于多物理场扰动、噪声模型和无拖曳控制响应，获得检验质量残余加速度噪声和光学测量噪声等全链路噪声数据，并进一步计算探测灵敏度曲线。具体而言，检验质量残余加速度噪声主要由电磁力噪声、粒子

碰撞噪声、辐射压噪声和自引力噪声等组成。光学测量噪声主要包括时钟波动噪声、测距噪声、活动部件波动、读出噪声、TTL 耦合噪声和热致光程波动等。灵敏度结果显示，日心轨道太极方案在毫赫兹频段具有较好的应变探测能力，最优灵敏度优于 10^{-20} $Hz^{-1/2}$。该结果说明，所构建系统能够完成从全链路噪声仿真到探测灵敏度评估的计算过程，为后续科学探测效能分析提供了基础。

3.3 有效探测时长仿真结果

在动态全链路仿真基础上，系统进一步开展三星建链和断链重建过程仿真，以评估星座进入或恢复科学探测模式所需时间。本文以检验质量敏感轴位移作为系统稳定状态的判定依据，当各检验质量敏感轴位移的绝对值在连续 1000 s 内均小于 10^{-8} m 时，认为无拖曳控制进入稳定状态，并据此确定三星建链和断链重建所需时长。图 6 和图 7 分别给出了检验质量敏感轴位移和星间指向稳定度的变化过程以进一步直观反映系统状态的收敛情况，左图对应初始三星建链过程，右图对应断链重建过程。

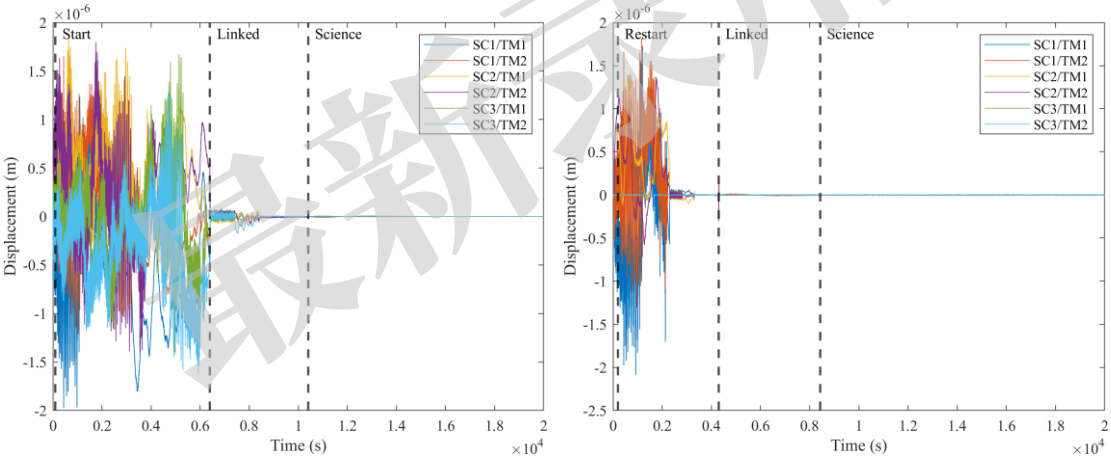


图 6　敏感轴位移变化

Fig. 6　Sensitive axis displacement variation

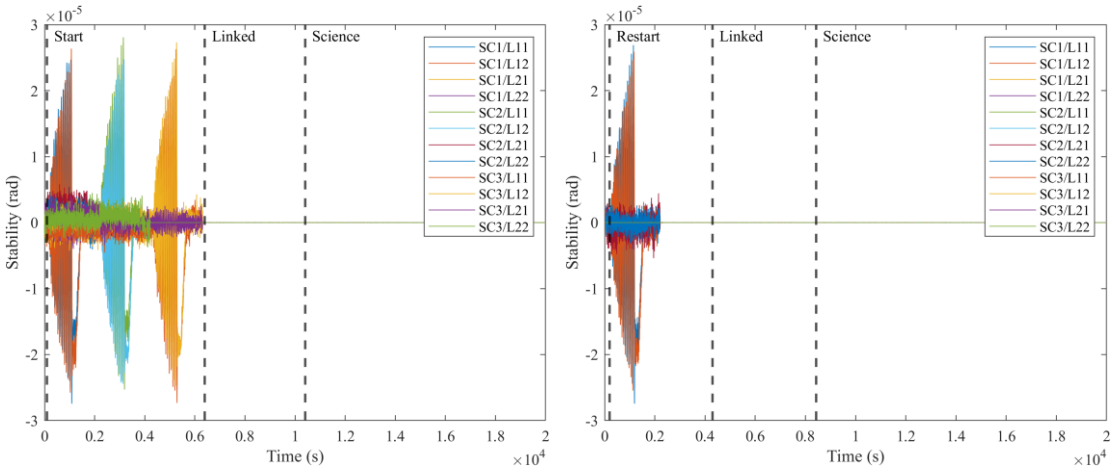


图 7　星间指向稳定度变化

Fig. 7　Inter-satellite pointing stability variation

三星建链和断链重建过程中，检验质量敏感轴位移和星间指向稳定度均经历由动态调整到稳定收敛的过程。在初始建链阶段，各航天器检验质量敏感轴位移和星间指向稳定度变化较为明显，随着粗指向、扫描捕获和精指向过程逐步完成，相关状态量逐渐收敛，并在进入科学探测模式后保持稳定。相比之下，断链重建过程中的敏感轴位移和星间指向稳定度调整时间更短，系统能够更快恢复至稳定测量状态，说明在已有轨道、姿态和链路基础上，星座具备较快的科学探测模式恢复能力。根据仿真结果，三星建链总时长约为 10300 s，断链重建总时长约为 8380 s。在此基础上，结合计划内、计划外中断次数及相应预留时间等任务运行参数计算有效探测时长，具体参数设置如表 2 所示。其中，断链重建时长用于表征计划内中断后的恢复时间，三星建链时长用于表征计划外中断后的恢复时间。由此得到的有效探测时长和科学数据占空比可用于后续典型波源的信噪比评估。

表 2　有效探测时长计算参数设置

Table 2　Parameter settings for effective detection time calculation

参数	数值	单位
N_p	3×12×4	/
N_u	0.5×12×4	/
Δt_p	2	天
Δt_u	2	天
T_{tot}	365×4	天

3.4 信噪比计算结果

在获得探测灵敏度和有效探测时长后，系统进一步对典型引力波源开展信噪

比计算。本文选取银河系致密双星验证源、极端质量比旋近系统和大质量双黑洞系统作为目标波源。图 8 给出了典型波源幅频特性与探测器特征应变灵敏度曲线的对比结果，可用于直观分析波源信号与探测器灵敏频段的匹配关系。从频率分布来看，不同波源对探测器噪声的敏感程度存在差异。银河系致密双星验证源主要分布于毫赫兹频段，其中低频源更易受到检验质量残余加速度噪声影响，部分频段还受到银河系双星混淆噪声的影响。极端质量比旋近系统具有较宽的频率演化范围，其信噪比取决于宽频范围内波源信号与探测器噪声的综合作用。对于大质量双黑洞系统，随着系统质量增加，信号特征频率向低频移动，较高质量系统更易受到检验质量残余加速度噪声及低频混淆噪声影响；较低质量系统则可延伸至较高频段，光学测量噪声的相对影响逐渐增强。总体而言，不同波源的探测效能由其信号频率分布与探测器频率相关噪声特性共同决定。

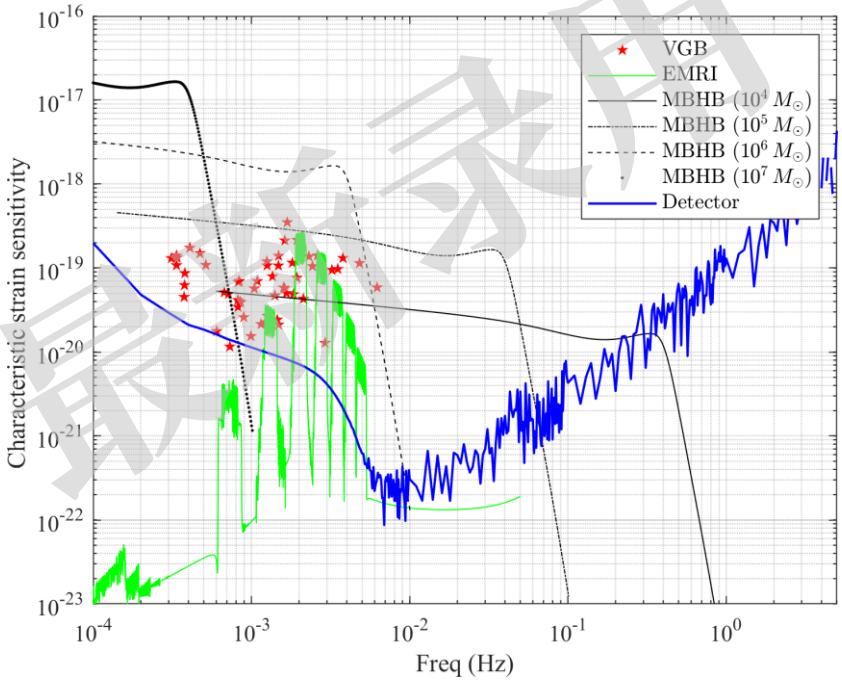


图 8　典型波源与探测器的特征应变灵敏度

Fig. 8　Characteristic strain sensitivity of typical wave sources and detectors

图 9 给出了日心轨道太极方案下不同波源的信噪比计算结果。整体来看，不同类型波源的信噪比水平存在明显差异。为进一步分析银河系致密双星验证源的统计特征，图 10 给出了其信噪比分布直方图。可以看出，银河系致密双星验证源信噪比主要集中在 1~10 区间，部分波源超过 10，少数强源达到 100 量级。典型宽频波源的信噪比结果如表 3 所示。极端质量比旋近系统的信噪比为 17.52；

大质量双黑洞系统的信噪比均大于100，其中总质量为$10^5 M_{\odot}$的系统信噪比最高，达到821.41。

上述结果说明，系统能够对多目标验证源进行批量信噪比计算，并反映不同波源之间的可见性差异。在当前参数条件下，日心轨道太极方案对大质量双黑洞系统等强宽频信号具有相对较好的探测能力。

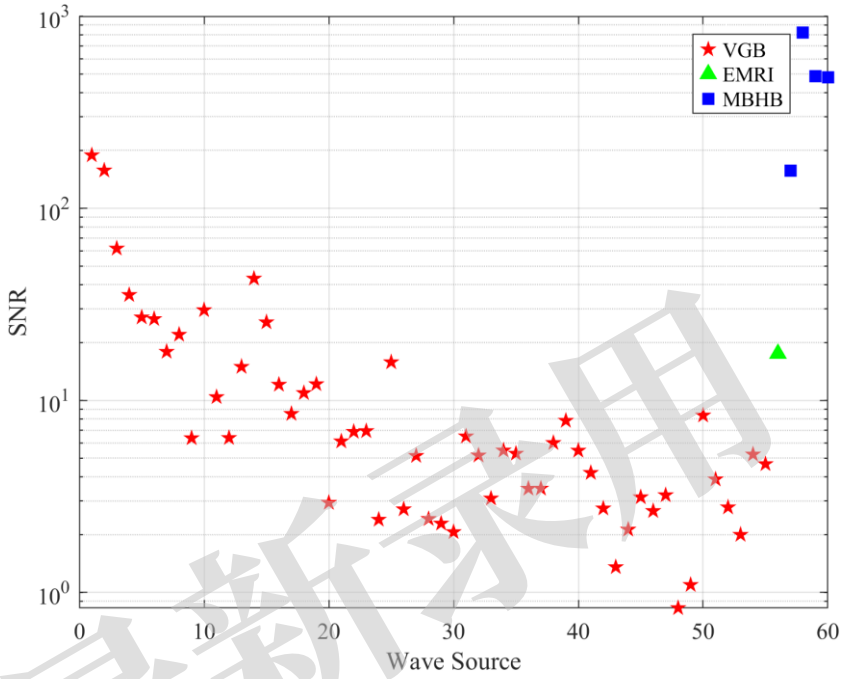


图 9　不同波源的信噪比

Fig. 9　SNR of different wave sources

最新录用

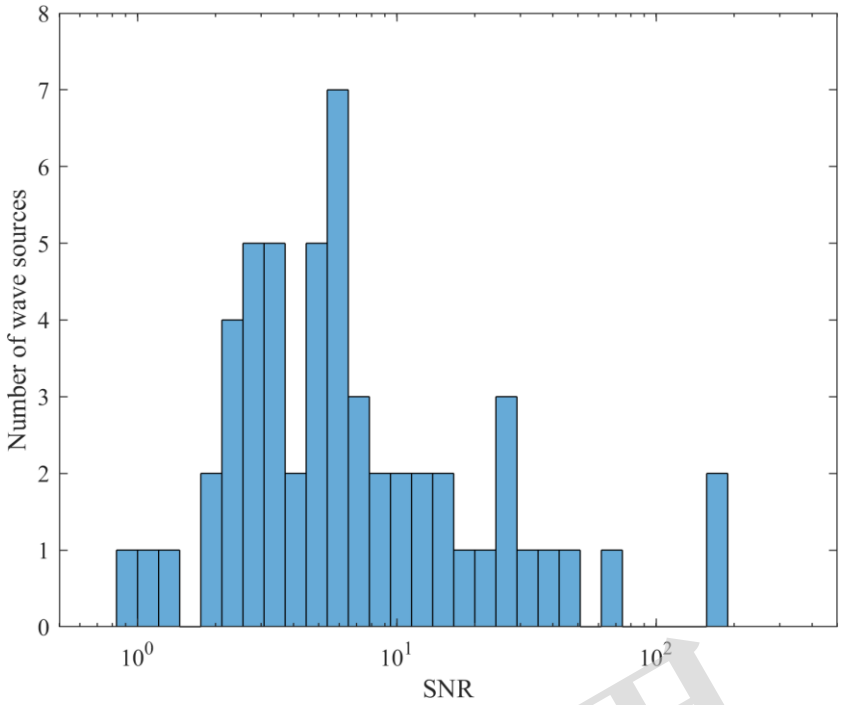


图 10　银河系致密双星验证源的信噪比直方图

Fig. 10　Histogram of SNR for Verification Galactic Binary

表 3　典型宽频波源的信噪比

Table 3　SNR of typical broadband wave sources

类别	信噪比
极端质量比旋近系统	17.52
大质量双黑洞系统（$10^4 M_{\odot}$）	156.54
大质量双黑洞系统（$10^5 M_{\odot}$）	821.41
大质量双黑洞系统（$10^6 M_{\odot}$）	486.69
大质量双黑洞系统（$10^7 M_{\odot}$）	479.50

3.5 讨论与展望

本文以任务参数、动态仿真结果和科学目标响应为主线，形成了从工程状态到科学探测效能指标的计算流程。与单独分析灵敏度或单一波源信噪比不同，该系统能够同时考虑全链路噪声、建链与断链恢复时长和典型波源特征，为不同探测方案的综合评估提供统一框架。从适用范围看，本文主要以日心轨道太极方案为例开展验证，但系统中的轨道构型参数、臂长参数、噪声参数和波源输入均可独立配置，因此可进一步扩展至地心轨道方案、LISA 类构型以及其他空间引力波探测任务方案。以地心轨道天琴方案为例，可根据其轨道构型和星间臂长重新配置星座参数，并依据其光学测量噪声和检验质量残余加速度噪声要求，对激光干涉测量、检验质量及多物理场扰动等相关参数进行相应调整，从而实现地心轨

道方案下的全链路仿真与探测效能评估。

需要指出的是，本文仿真参数主要依据任务设计指标和工程约束设置，已覆盖检验质量参数、激光干涉测量参数、多物理场扰动、无拖曳控制和建链恢复过程等关键因素。目前数据间隙的影响主要通过有效探测时长和科学数据占空比进行等效表征，尚未进一步考虑中断发生时刻、持续时间及其时序分布等因素。后续可结合更真实的任务运行场景和更细化的工程模型，提高系统对实际任务复杂运行环境的描述能力。此外，还可以扩展波源样本库和任务场景库，结合参数扫描与优化分析，研究星间臂长、噪声指标、有效观测时长等关键参数对科学探测效能的影响，从而为探测方案优化、指标分解和科学观测策略制定提供更直接的量化支撑。

4 结论

本文面向空间引力波探测任务科学探测效能综合评估需求，构建了集动态全链路仿真、有效探测时长评估和典型波源信噪比计算于一体的效能评估系统。该系统将全链路噪声、探测灵敏度、星间建链与断链重建过程以及目标波源响应纳入统一流程，实现了由工程仿真参数向科学探测效能指标的转化。系统可完成检验质量残余加速度噪声、光学测量噪声和探测灵敏度计算，并将三星建链和断链重建过程转化为有效探测时长相关指标。进一步地，该系统能够表征银河系致密双星验证源、极端质量比旋近系统和大质量双黑洞系统等不同类型波源的可见性差异，验证了其用于科学目标响应能力评估的可行性。通过将噪声仿真、运行可用性分析和波源信噪比计算纳入同一评估框架，本文方法可为空间引力波探测任务的方案对比、关键指标分解和科学目标满足度分析提供支撑，同时也为后续方案优化和科学观测策略制定提供量化依据。

最新录用

参考文献

[1] WU Yuliang, HU Wenrui, WANG Jianyu, *et al*. Review and scientific objectives of spaceborne gravitational wave detection missions[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 589-599 (吴岳良, 胡文瑞, 王建宇, 等. 空间引力波探测综述与拟解决的科学问题[J]. 空间科学学报, 2023, **43**(4): 589-599)

[2] AMARO-SEOANE P, AUDLEY H, BABAK S, *et al*. Laser interferometer space

antenna[OL]. arXiv preprint arXiv: 1702.00786, 2017

[3] HU W R, WU Y L. The Taiji Program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *National Science Review*, 2017, **4**(5): 685-686

[4] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, *et al*. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity,* 2016, **33**(3): 035010

[5] ROBSON T, CORNISH N J, LIU C. The construction and use of LISA sensitivity curves[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, **36**(10): 105011

[6] BAYLE J B, BONGA B, CAPRINI C, *et al*. Overview and progress on the laser interferometer space antenna mission[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**(12): 1334-1338

[7] GONG Y G, LUO J, WANG B. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(9): 881-889

[8] LUO Z R, ZHANG M, WU Y L. Recent status of Taiji program in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 536-538

[9] LUO J, BAI S J, BAI Y Z, *et al*. Progress of the TianQin project[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2025, **42**(17): 173001

[10] JENNRICH O. *LISA* technology and instrumentation[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2009, **26**(15): 153001

[11] ARMANO M, AUDLEY H, AUGER G, *et al*. Sub-Femto-*g* free fall for space-based gravitational wave observatories: LISA pathfinder results[J]. *Physical Review Letters*, 2016, **116**(23): 231101

[12] WANG Juan, QI Keqi, WANG Shaoxin, *et al*. Advance and prospect in the study of laser interferometry technology for space gravitational wave detection[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2024, **54**(7): 270405 (王娟, 齐克奇, 王少鑫, 等. 面向空间引力波探测的激光干涉技术研究进展及展望[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, **54**(7): 270405)

[13] WANG Shaoxin, GUO Weichuan, ZHAO Ping'an, *et al*. Inertial sensor for space gravitational wave detection and its key technologies[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2024, **54**(7): 270404 (王少鑫, 郭纬川, 赵平安, 等.

最新录用

空间引力波探测惯性传感器及其关键技术[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, **54**(7): 270404)

[14] LIU Heshan, WANG Juan, GAO Ruihong, *et al*. Noise and index decomposition of Taiji-2 interferometer system[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(4): 1047-1057 (刘河山, 王娟, 高瑞弘, 等. 太极二号干涉仪系统噪声与指标分解[J]. 空间科学学报, 2025, **45**(4): 1047-1057)

[15] LIU Yanchong. Disturbance Modeling and Analysis for the TianQin Inertial Sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024 (刘雁冲. 天琴惯性传感器扰动力建模与分析研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024)

[16] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, *et al*. In-depth analysis of LISA Pathfinder performance results: time evolution, noise projection, physical models, and implications for LISA[J]. *Physical Review D*, 2024, **110**(4): 042004

[17] LU X Y, TAN Y J, SHAO C G. Sensitivity functions for space-borne gravitational wave detectors[J]. *Physical Review D*, 2019, **100**(4): 044042

[18] DEY K, KARNESIS N, TOUBIANA A, *et al*. Effect of data gaps on the detectability and parameter estimation of massive black hole binaries with LISA[J]. *Physical Review D*, 2021, **104**(4): 044035

[19] RUAN W H, GUO Z K, CAI R G, *et al*. Taiji program: gravitational-wave sources[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2020, **35**(17): 2050075

[20] WANG H T, JIANG Z, SESANA A, *et al*. Science with the TianQin observatory: preliminary results on massive black hole binaries[J]. *Physical Review D*, 2019, **100**(4): 043003

[21] PETITEAU A, AUGER G, HALLOIN H, *et al*. LISACode: a scientific simulator of LISA[J]. *Physical Review D*, 2008, **77**(2): 023002

[22] BAYLE J B, HARTWIG O. Unified model for the LISA measurements and instrument simulations[J]. *Physical Review D*, 2023, **107**(8): 083019

[23] ZHENG L, YANG S T, ZHANG X F. Doppler effect in TianQin time-delay interferometry[J]. *Physical Review D*, 2023, **108**(2): 022001

[24] LI E K, WANG H, CHEN H Y, *et al*. GWSpace: a multi-mission science data simulator for space-based gravitational wave detection[J]. *Classical and*

最新录用

Quantum Gravity, 2025, **42**(16): 165005

[25] REN Z X, ZHAO T Y, CAO Z J, *et al*. Taiji data challenge for exploring gravitational wave universe[J]. *Frontiers of Physics*, 2023, **18**(6): 64302

作者简介

汤宁标 男，2000 年出生于江苏省盐城市，现为中国科学院微小卫星创新研究院博士研究生，主要研究方向为空间引力波探测、复杂系统数字化建模等。
E-mail：tangningbiao@microsate.com



蔡志鸣（通信作者） 男，1984 年出生于浙江省温州市，现为中国科学院微小卫星创新研究院正高级工程师，主要研究方向为空间科学卫星总体设计等。
E-mail：caizm@microsate.com



最新录用