



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

望远镜网络协同观测引力波事件的策略优化研究

作者姓名: 马鹏辉

指导教师: 崔辰州 研究员 中国科学院国家天文台

许允飞 副研究员 中国科学院国家天文台

学位类别: 理学硕士

学科专业: 天文技术与方法

培养单位: 中国科学院国家天文台

2024年6月

**The Research of Optimization Strategies for Cooperative
Follow-up Observations of Gravitational Wave Telescopes
Network**

**A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Natural Science
in Astronomical Technology and Method**

By

Ma Penghui

Supervisor: Professor Cui Chenzhou

Associate Professor Xu Yunfei

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

June, 2024

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。承诺除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关收集、保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则，保留并向国家指定或中国科学院指定机构送交学位论文的电子版和印刷版文件，且电子版与印刷版内容应完全相同，允许该论文被检索、查阅和借阅，公布本学位论文的全部或部分内 容，可以采用扫描、影印、缩印等复制手段以及其他法律许可的方式保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘要

引力波探测的突破为人类提供了一个全新的观测宇宙的窗口，使人类能够探测到电磁波观测所无法捕捉的宇宙信息。由于引力波信号极度微弱，现有的探测仪器很难探测到引力波信号，即便成功探测到引力波信号，其定位精度往往不高，所推断出的引力波源可能位于数百平方度的天区之内。作为瞬态事件的引力波信号可能伴随着短暂的电磁信号窗口，通过电磁信号与引力波信息多信使联合观测，人类能够更深入地认识与理解宇宙。然而，引力波源定位的大范围不确定性以及电磁信号观测窗口的瞬时特性，给地面及空间望远镜的后续观测带来了严峻的挑战。

面对引力波后随观测的挑战，本文针对宽视场望远镜（视场面积大于 1 deg^2 ）联合后随观测引力波电磁对应体，提出了一系列优化策略，并开发了一套自动运行的观测规划系统。本研究的创新点和主要贡献概述如下：

1. 目标选择与优先级设定：本文提出了一种新的目标选择与优先级设定方法。该方法基于引力波误差天区的轮廓，与传统的按照累计概率排序选择目标的算法相比，新方法通过从内到外的顺序选择目标并设定优先级。在望远镜按照目标优先级进行观测的情况下，该方法能够平均减少了 40.92% 的回转距离，从而观测更多的目标。

2. 望远镜网络协同观测策略：为提升望远镜网络的联合观测效率，本文构建了一种基于望远镜视场大小分配观测目标的方法。该策略确保不同望远镜的观测目标之间既无遗漏也无过度重叠。通过采用这种策略，本系统由 4 台望远镜构成的网络，在相同的观测时间里，最佳情况下，其覆盖的天区面积可达到不采用协同观测策略时的两倍或更多。

3. 自动观测规划系统：本文开发了一套自动运行的引力波后随观测规划系统，该系统能够自动接收引力波事件警报、执行观测规划算法、并发送及存档规划结果。系统设计具有高度可扩展性，支持运行针对不同设备定制化的后随观测算法，目前运行。此外，系统包含一个基于 Web 的用户交互界面，以图形化方式展示引力波误差天区和观测规划结果。目前，该系统已在 LVC（LIGO-Virgo 科学合作组织）第四次观测运行期间稳定运行，为多台望远镜提供了后随观测规划服务。

本文属于天文信息学领域的研究，专注于开发和应用望远镜网络的协同后随观测优化策略，旨在为观测团队提供引力波后随观测规划服务。

关键词：引力波，引力波电磁对应体，多信使天文学，虚拟天文台，后随观测

Abstract

The breakthrough in GW (gravitational wave) detection has provided us with a completely new window for observing the universe, allowing us to capture cosmic information that cannot be detected by electromagnetic wave observations. Due to the extremely weak nature of GW signals, existing detection instruments struggle to capture them. Even if GW signals are successfully detected, their positional accuracy is often low, with inferred GW sources potentially located within hundreds of square degrees of the sky. GW signals, as transient events, may be accompanied by brief electromagnetic signal windows. Through joint observations using electromagnetic signals and GW information, we can gain a deeper understanding of the universe. However, the large uncertainty in GW source localization and the transient nature of electromagnetic signal observation windows pose significant challenges for follow-up observations with ground-based and space telescopes.

Facing the challenge of GW follow-up, this thesis proposes a series of optimization strategies and develops an automated observation planning system for wide-field-of-view telescopes (with a field of view greater than 1 deg^2) to perform joint follow-up observations of GW electromagnetic counterparts. The innovations and main contributions of this research are outlined as follows:

1. **Target Selection and Priority Setting:** This thesis proposes a novel method for target selection and priority setting. This method is based on the contours of GW error regions. Compared to traditional algorithms that select targets based on cumulative probabilities, the new method selects targets and sets priorities from the inside out. When telescopes observe targets according to their priority, this method can on average reduce turnaround time by 40.92%, allowing for the observation of more targets.

2. **Telescope Network Collaborative Observation Strategy:** To enhance the joint observation efficiency of the telescope network, this thesis constructs a method for allocating observation targets based on the size of the telescope's field of view. This strategy ensures that there is neither omission nor excessive overlap between the observation targets of different telescopes. By employing this strategy, the network composed of four telescopes in our system can, under the best conditions, cover an area of the sky that is twice as large or more compared to when not employing a coordinated observation strategy within the same observation period.

3. **Automated Observation Planning System:** This thesis develops an automated GW follow-up observation planning system that can automatically receive GW event alerts, execute observation planning algorithms, and send and archive planning results. The system is designed with high scalability, supporting customized follow-up observa-

tion algorithms for different devices. Additionally, the system includes a web-based user interface that graphically displays GW error regions and observation planning results. Currently, the system operates stably during the fourth observing run of the LVC(The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration), providing follow-up observation planning services for multiple telescopes.

This thesis belongs to the field of astronomical informatics, focusing on the development and application of collaborative follow-up observation optimization strategies for telescope networks, aiming to provide GW follow-up observation planning services for observation teams.

Key Words: Gravitational wave, Gravitational Wave Electromagnetic Counterpart, Multi-Messenger Astronomy, Virtual Observatory, Follow UP Observation

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引力波探测的历史与发展	1
1.2 引力波源与电磁对应体	3
1.2.1 引力波源	3
1.2.2 引力波电磁对应体	5
1.3 引力波电磁对应体后随观测	5
1.3.1 天文警报传递平台	6
1.3.2 后随观测策略	6
1.3.3 暂现源识别算法	8
1.3.4 后随观测的挑战	8
1.4 国内外研究现状	8
1.4.1 后随观测策略的改进	9
1.4.2 多望远镜联合后随观测	10
1.5 主要研究内容	11
1.6 文章结构	11
第 2 章 引力波后随观测规划问题的理论分析与建模	13
2.1 望远镜观测约束条件	13
2.1.1 硬约束条件	13
2.1.2 软约束条件	14
2.2 引力波源误差天区	14
2.2.1 HEALPix 简介	14
2.2.2 误差天区文件	16
2.3 引力波后随观测规划问题的数学模型	17
2.3.1 符号定义	17
2.3.2 基本定义	18
2.3.3 约束分析	18
2.3.4 数学模型	19
2.3.5 模型求解	20
2.4 本章小结	20

第 3 章 引力波后随观测规划的优化策略设计和算法原理	21
3.1 观测目标选择算法	21
3.1.1 Tiling 算法	21
3.1.2 基于轮廓的层次选择算法	23
3.2 望远镜网络的协同优化算法	26
3.2.1 观测目标可见性计算	26
3.2.2 视场优先原则与连续拼接原则	27
3.2.3 算法实施步骤	28
3.3 观测目标调度算法	28
3.3.1 目标排序策略	29
3.3.2 时间资源分配方案	29
3.4 本章小结	29
第 4 章 引力波后随观测规划运行系统的实现与运行情况	31
4.1 获取与解析引力波警报	31
4.2 观测规划制定系统	34
4.3 观测规划发布系统	35
4.3.1 消息队列发布系统	35
4.3.2 存档在线发布平台	36
4.4 系统运行情况	38
4.4.1 观测规划情况	39
4.4.2 实际观测情况	41
4.5 本章小结	44
第 5 章 观测规划用户交互系统的实现与运行	45
5.1 Aladin Lite 在天文数据可视化中的应用	45
5.2 Aladin Lite 核心概念和功能简介	45
5.3 引力波误差天区的可视化	47
5.4 候选宿主星系列表的可视化	48
5.5 望远镜观测规划的可视化	49
5.6 系统部署与运行	50
5.7 本章小结	51
第 6 章 总结与展望	53
参考文献	55
附录	61

致谢	63
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果 ..	65

图目录

图 1-1	引力波谱	3
图 1-2	GCN 架构图	7
图 2-1	当 $N_{side} = 1, 2, 4, 8$ 时对应的球面划分情况	15
图 2-2	HEALPix RING 模式编号示意图	15
图 2-3	HEALPix NESTED 模式编号示意图	16
图 2-4	多阶覆盖图示例图	17
图 3-1	Tiling 算法示意图	22
图 3-2	引力波误差天区不同层级示意图	24
图 3-3	层次选择算法流程图	24
图 3-4	回转距离对比图	25
图 3-5	覆盖累计概率和上的对比图	26
图 3-6	曙暮光示意图	27
图 3-7	观测目标调度算法流程图	28
图 4-1	后随观测规划运行系统架构图	31
图 4-2	警报邮件示例图	32
图 4-3	观测规划制定系统组成模块图	35
图 4-4	观测规划存档系统数据库结构	37
图 4-5	LEIA 观测规划示例图	40
图 4-6	观测覆盖天区面积对比图	41
图 4-7	无协同观测覆盖区域图	41
图 4-8	协同优化观测覆盖区域图	42
图 5-1	Aladin Lite 核心概念	47
图 5-2	引力波事件 S231206cc 不同累计概率轮廓的可视化结果	48
图 5-3	引力波事件 S231206cc 候选宿主星系列表可视化结果	49
图 5-4	引力波事件 S231206cc XL_100 望远镜观测规划结果	49
图 5-5	引力波事件 S231206cc 望远镜网络观测规划结果	50

表目录

表 2-1	数学模型中的变量及符号定义	18
表 4-1	存档查询服务 API 表	38
表 4-2	服务望远镜网络配置表	39
表 4-3	XL_30 观测规划结果	40
表 4-4	XL_30 和 XL_100 引力波事件观测统计表	43

符号列表

缩写

GW	Gravitational wave, 引力波
LVC	The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration, LIGO-Virgo 科学合作组织
aLIGO	Advanced Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, 高新激光干涉仪引力波天文台
aVIRGO	Advanced Virgo, 高新室女 [座] 引力波探测器
CMB	Cosmic Microwave Background, 宇宙微波背景
PTA	Pulsar Timing Array, 脉冲星测时阵列
MMA	Multi-Messenger Astronomy, 多信使天文学
FOV	Field Of View, 视场
CBC	Compact binary coalescence, 致密双星并合
GWOPS	GW follow-up Observation Planning System, 引力波后随观测规划系统
HEALPix	Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelation, 分层等面积孤立像素化
BBH	Binary black hole, 双黑洞系统
BNS	Binary neutron star, 双中子星系统
NSBH	Neutron star black hole, 黑洞中子星系统
XL_30	兴隆 mini 司天 30 厘米望远镜
XL_100	兴隆 mini 司天 1 米望远镜
HMT	星明天文台半米望远镜
GOT	高崖子望远镜
XAONS_100	新疆南山观测站 1 米望远镜
XAONS_120	新疆南山观测站 1.2 米望远镜
Weihai_60	威海 60 厘米望远镜
Weihai_100	威海 1 米望远镜
Mstg_50	慕士塔格 50 厘米望远镜
EP	爱因斯坦探针卫星
LEIA	Lobster Eye Imager for Astronomy, 龙虾眼天文成像仪

第 1 章 绪论

引力波是爱因斯坦广义相对论的预言，是由大质量天体产生的“时空涟漪”。在爱因斯坦作出预言 50 多年后，Hulse 和 Taylor 在研究脉冲星的过程中，在 1974 年发现了一个特殊的脉冲双星系统 PSR B1913+16(Hulse 等, 1975)，从观测数据中发现其脉冲周期缓慢减少的速率与它们在引力波中损失能量的速率精确匹配，从而间接证明了引力波的存在。在 2015 年，激光干涉引力波探测器 aLIGO 探测到了引力波信号，实现了人类首次对引力波事件的直接探测 (Abbott 等, 2016)，该事件被命名为 GW150914，是一次由双黑洞并合产生的引力波事件。在之后的 2017 年，aLIGO 和 aVIRGO 引力波探测器网络联合探测到了一例由双中子星并合产生的引力波事件 (Abbott 等, 2017a)GW170817，并幸运地观测到了该引力波事件的不同波段上的电磁对应体 (Abbott 等, 2017b)，这是人类历史上第一次使用引力波和电磁波同时观测到同一个天体物理事件，标志着一个新的时代的开始——多信使天文学 (Multi-Messenger Astronomy, MMA) 的出现。

引力波探测提供了一种宇宙测距的新方法 (SUN YanRu, 2022)：通过对引力波波形的分析，不借助其他测量方法的校准，就能够独立地测量波源的光度距离，因此可以避免由其他测距方法造成的系统误差。同时，如果能够幸运地观测到引力波事件的电磁对应体，就能够获得引力波事件的红移信息。观测引力波及电磁对应体成为限制哈勃参数、宇宙各个组分的能量密度以及暗能量状态参数等各种宇宙学参数的新途径 (Coughlin 等, 2020)。同时，电磁对应体的确定可以减少引力波搜索参数空间 (高鹤 等, 2018)，特别是与定位相关的参数，进而提升引力波探测的灵敏度。探测到电磁对应体有利于更好地理解引力波源前身星的性质 (Radice 等, 2018)，更加丰富对于引力波结果的科学解读。

1.1 引力波探测的历史与发展

1915 年，爱因斯坦提出广义相对论，并根据广义相对论从理论上预言了引力波的存在。但人们对引力波的认识并非一帆风顺，人们围绕引力波是否真实存在、引力波是否能够携带和输送能量等问题进行了长时间的争论。1974 年，脉冲双星系统 PSR B1913+16 被发现，人们才在观测上找到了引力波存在的间接证据，并证明引力波携带能量。但人们希望能够直接探测到引力波信号，从而证明引力波的存在。

利用激光干涉仪探测引力波的方案在 20 世纪 60 年代初期被提出。Weiss 等人在 20 世纪 70 年代对激光干涉仪进行了广泛深入的研究和设计，考虑了几乎所有的关键部件，辨认出主要噪声源并全面论述了控制这些噪声的方法 (Weiss, 1983; 王运永 等, 2014)。到了 20 世纪 80 年代，若干小型样机陆续建成，并用它们做了大量基础研究，取得了宝贵的经验。20 世纪 90 年代，包括 LIGO、Virgo、

GEO600、TAMA 300 等一些大型激光干涉仪引力波探测器在世界各地开始筹建。到了本世纪初,已经建成了数台千米级的激光干涉仪引力波探测器,位于美国的 aLIGO(LIGO Scientific Collaboration 等, 2015)是由两台相同的臂长为 4 km 的迈克尔逊干涉仪组成;位于意大利比萨附近,由意大利和法国联合建造的臂长为 3 km 的 aVirgo(Acernese 等, 2015);位于日本神冈地下的臂长 3 km 的 KAGRA(Kagra Collaboration 等, 2019)。激光干涉仪引力波探测器在直接探测引力波信号上取得了巨大成功,在 2015 年实现了引力波的直接探测,并在 2017 年实现了引力波事件的多信使探测。

除了利用大型激光干涉仪,还可以借助脉冲星来获取引力波的信息。脉冲星测时阵列(Pulsar Timing Array, PTA)通过对一系列毫秒脉冲星的高精度时序信号作统计来判断是否存在引力波信号。脉冲星测时阵列是目前探测纳赫兹引力波的唯一途径(Xu 等, 2023)。目前国际上的脉冲星测时阵列主要有六个合作组织:澳大利亚的 Parkes Pulsar Timing Array (PPTA)(Manchester 等, 2013)、欧洲的 European Pulsar Timing Array (EPTA)(Kramer 等, 2013)、北美的 North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav)(McLaughlin, 2013)、印度的 Indian Pulsar Timing Array (InPTA)(Paul 等, 2019)、南非的 South Africa Pulsar Timing Array (SAPTA)(Miles 等, 2023)以及中国的 Chinese Pulsar Timing Array (CPTA)(Lee, 2016)。International Pulsar Timing Array (IPTA)(Hobbs 等, 2010)¹是区域 PTA 合作组织的联盟组织,旨在提高探测引力波事件的灵敏度。目前, PPTA、EPTA、NANOGrav 和 InPTA 是 IPTA 的正式成员,而 SAPTA 和 CPTA 是 IPTA 的观察员。在 2023 年, CPTA 通过分析 500 米口径球面射电望远镜(FAST)的观测数据,分析得出了纳赫兹引力波存在的直接证据(Xu 等, 2023)。

宇宙暴胀理论预测存在来自宇宙极早期的引力波背景场(原初引力波)。对于这个背景引力场的测量可以为一些暴胀理论所提出的宇宙膨胀机制提供有力的支持证据。宇宙微波背景(Cosmic Microwave Background, CMB)被认为是宇宙大爆炸遗漏下来的热辐射,其能谱分布具有很强的黑体辐射特征,其温度也具有全天各向同性,局域的温度涨落比例仅有 10^{-5} ,这些微小的温度涨落实际上来源于宇宙早期的非均匀性以及晚期大尺度结构的形成,其中蕴含着丰富的宇宙学信息。由于 CMB 的 B 模式偏振光在线性阶与标量扰动无关,通过观测 CMB 的 B 模式偏振光功率可以间接探测到原初引力波对 CMB 的影响,从而发现原初引力波存在的证据以及进一步探测出原初引力波参数。目前位于南极、智利和位于西藏(Li 等, 2017)的 CMB 偏振测量实验分别测量南天和北天的 CMB 偏振,以期望探测到原初引力波。

位于地面的干涉仪,受到臂长的限制以及地面震动噪声和地表重力梯度变化会产生低频噪声,使得地基引力波探测器很难探测 1 Hz 以下的引力波。太空基本上处于真空状态,温度接近绝对零度,又无地球上存在的震动噪声,实验条件非常好。因此,在太空中建立臂长为 10 万公里量级的激光干涉仪引力波探测

¹<https://www.ipta4gw.org>

器是探测毫赫兹频段引力波的最可行方案。在 20 世纪 90 年代，欧洲空间局提出了 LISA 项目，经过多次技术上调整，使用目前选定了 250 万公里边长的等边三角形编队方案 (Amaro-Seoane 等, 2017)，预期部署于距离地球约 5000 和 6500 万公里的位置，跟随地球围绕太阳运行，其探测器平面与探测器到太阳的连线保持 60° 夹角。我国目前也提出了太极计划 (Ruan 等, 2018)、天琴计划 (罗俊 等, 2021) 等项目，使用类似的技术方案，用于面向 $10^{-4} - 1$ Hz 的引力波信号的探测。

图1-1总结了上面提到了引力波探测的四个主要频段及其对应的探测器或探测实验，同时也列举了不同频段对应的引力波源。下面本文将对地基激光干涉仪引力波探测器能够探测到的引力波源进行详细的介绍。

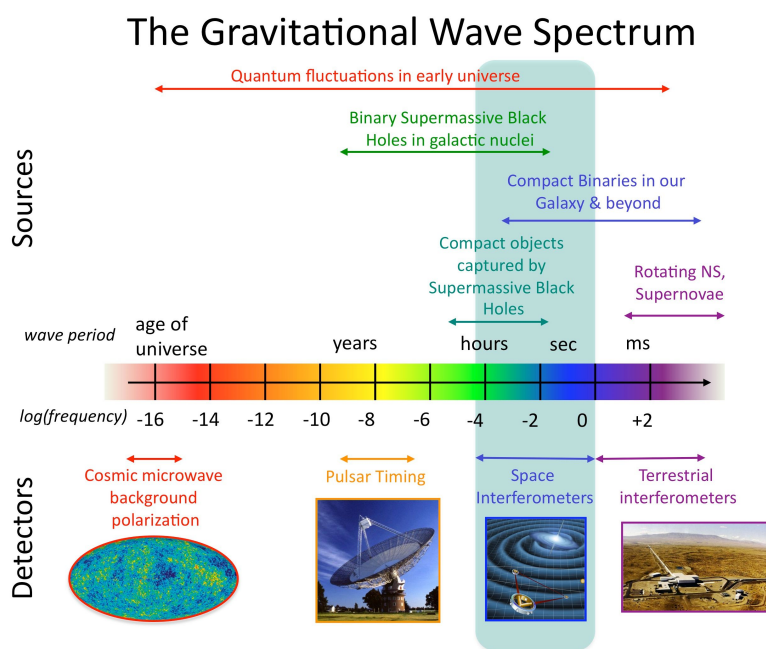


图 1-1 引力波谱

Figure 1-1 The Gravitational Wave Spectrum

图源: <https://science.gsfc.nasa.gov/663/research/index.html>

1.2 引力波源与电磁对应体

1.2.1 引力波源

考虑到目前在运行的引力波天文台，即地基激光干涉仪引力波探测器，目前能够探测到有伴随的电磁辐射的引力波源根据现有的观测数据和理论模型大致分为三类 (赵文 等, 2017)：一类是孤立中子星不稳定性产生的引力波，一类是核塌缩超新星产生的引力波，一类是致密双星并合产生的引力波。

1.2.1.1 孤立中子星不稳定性产生的引力波

孤立中子星可能产生两种不同类型的引力波信号：连续的和瞬时的。中子星的地壳可能存在静态密度不均匀性，这可能是连续引力波信号的来源。这些信号的频率通常位于中子星自转频率 f_{spin} 与 $2 * f_{\text{spin}}$ 之间。观测到的大多数中子星自转频率在 10 Hz 至 1 kHz 范围内，因此，由中子星快速自转产生的引力波信号很可能被地基激光干涉仪引力波探测器所探测到。另一方面，瞬时的引力波信号可能由中子星震产生，其频率可能低于其他瞬时引力波信号源，目前地基激光干涉仪引力波探测器很难捕捉到这类信号。

1.2.1.2 核坍缩超新星产生的引力波

超新星是主序恒星演化到末期发生的剧烈爆炸事件。当主序恒星的质量小于 8 倍太阳质量时，其核球会坍缩成一颗白矮星，靠电子简抵抗引力来达到平衡。如果白矮星位于双星系统中，可以通过吸积伴星的质量来使其质量升高，当质量增大到超过钱德拉塞卡极限时，会产生 Ia 型超新星爆发。当主序恒星质量大于 8 倍太阳质量时，演化末期会产生 II 型超新星爆发，其核球部分会坍缩为中子星或黑洞，坍缩的过程中会伴随伽马射线辐射，这是人类能够观测到的长时标伽马射线暴。

1.2.1.3 致密双星并合产生的引力波

致密双星并合产生的引力波事件是目前研究最多的引力波源，也是地基激光干涉仪引力波探测器最理想的探测对象，还是目前观测到的引力波信号对应的引力波源。

双黑洞并合：GW150914，人类首次直接探测到的引力波事件，就是一个双黑洞并合事件产生的引力波。尽管人类已经多次探测到双黑洞并合产生的引力波信号，但对其物理性质知之甚少，目前未观测到双黑洞并合引力波事件的电磁对应体。

双中子星并合：GW170817 是人类首次同时探测到引力波信号和观测到电磁波段的对应体的引力波事件，是由双中子星并合产生的引力波事件，这次多信使观测直接证实了千新星 (Kilonova) 的存在。双中子星并合的引力波事件可以明确会产生两种电磁对应体：短伽马暴和千新星。因此，双中子星并合事件是目前电磁对应体后随观测的主要目标。

中子星-黑洞并合：GW200105 和 GW200115 是人类最早探测到中子星-黑洞并合事件，但遗憾的是未能探测到中子星-黑洞并合事件的电磁对应体。理论预言上中子星-黑洞并合也会产生千新星，但亮度会比双中子星并合稍暗一些，因此，中子星-黑洞并合事件也是目前电磁对应体后随观测的目标。

1.2.2 引力波电磁对应体

目前已经被证实的引力波电磁对应体有两种：伽马暴和千新星。下面对这两种电磁对应体进行简单的介绍：

伽马暴：伽马暴，简单地说就是一种宇宙空间中伽马波段流量急剧增加又急剧衰减的现象。伽马暴的典型的爆发时间在 $0.01 - 1000\text{s}$ ，辐射的光子的能量主要集中在 $0.01 - 100\text{MeV}$ ，光子的流量介于 $0.01 - 100\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。伽马暴最早是在 20 世纪 60 年代被 Vela 卫星观测到的。伽马暴被划分为短伽马暴（爆发时间小于 2 秒）、长伽马暴（爆发时间大于两秒）。短伽马暴被认为是双致密星并合产生的电磁辐射，这样一猜想在 GW170817 事件的多信使观测中被得到证实 (Zhang 等, 2018)。长伽马暴与大质量恒星的坍缩有关，这一点也在与长伽马暴成协的 Ic 型超新星观测中得到了证实 (Woosley 等, 1999)，但目前还未观测到引力波事件的长伽马暴对应体。

千新星：千新星是理论上双中子星或中子星-黑洞并合的产物。两个致密星体相互碰撞并合并时，会释放出巨大的能量，同时向外抛射出大量的物质。这些抛射物中含有在并合过程中通过快中子俘获过程 (r 过程) 新合成的重元素。这些抛射物中的放射性重元素会经历衰变，释放出能量，导致抛射物加热并发出强烈的电磁辐射，在光谱上通常表现为紫外、光学到近红外波段的暂现源，其光度比普通超新星要低但比普通新星高，因理论预言其亮度是普通新星的一千倍而得名 (Metzger 等, 2010)。GW170817 事件在电磁波段观测到的 AT 2017gfo (Chornock 等, 2017) 暂现源，是人类第一次证明了千新星是双中子星并合的产物。

1.3 引力波电磁对应体后随观测

在 GW170817 事件被引力波探测器探测到引力波信号的 1.7 秒后，位于太空的费米伽马射线暴卫星和 INTEGRAL 卫星都观测到了一例极弱的短时伽马暴 GRB170817A。在收到引力波事件和伽马暴事件的警报后，多波段的地基和天基望远镜开始了后随观测，位于智利拉斯坎帕纳斯天文台的 Swope 望远镜在探测到引力波信号的 10 小时 52 分钟后 (Abbott 等, 2017b)，探测到了一例位于引力波源区域内的光学瞬变源 AT 2017gfo，其位于 NGC 4993 星系内。在随后的数天和数周内，红外、射电、X 射线波段的观测设备也在 NGC 4993 星系内观测到了瞬变源 (Andreoni 等, 2017; Dietrich 等, 2020)。经过后续的数据分析，证明短时伽马暴 GRB170817A 和后续在 NGC 4993 星系探测到一系列瞬变源，全部是一次双中子星并合事件产生的余辉，GW170817 也是这次事件产生的引力波信号。这次成功的多波段后随观测活动获得了大量有价值的观测资料，并证实 AT 2017gfo 的光变曲线和光谱与理论预言的双中子星并合所产生千新星的性质一致，这也是人类第一次完全确认观测到千新星。促成这次成功的引力波电磁对应体后随观测有以下的主要因素：一、完善的天文事件警报传递平台；二、观测团队使用的合理的后随观测策略；三、快速的暂现源识别算法；四、引力波源位于距离地球 40 MPc (Abbott 等, 2019)，计算出的源误差天区是 28deg^2 ，是距离较近的引力

波源。

1.3.1 天文警报传递平台

天文警报传递平台是随着时域天文学和互联网技术的发展逐步完善起来的。各个时域天文设备进行连续的巡天观测，发现值得报告的瞬变事件，通过互联网技术分发到世界各地。

在 1991 年，美国航天局发射了 CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) 卫星，一台用于观测伽马射线的空间望远镜。伴随着 CGRO 卫星对于伽马暴事件的观测，出现了 BACODINE 网络用于自动检测和分发伽马暴事件的坐标给各个天文台。之后 BACODINE 网络升级为 GCN (GRB Coordinates Network) 网络 (Barthelmy 等, 2000)，不仅分发伽马暴坐标给各个天文台，同时允许后随观测者发送最新的后随观测报告。20 世纪 90 年代，Pojmanski 等人提出了全天自动巡天 (All Sky Automated Survey) 项目 (Pojmanski, 2002) 的设想并制造出原型系统，并于 1997 年实现了自动运行。该项目目标是使用全自动、低成本的仪器对大面积天区进行光度监测，及早发现包括新星、超新星、小行星的光学瞬变源，并给出天文事件警报。随着时域天文学的发展，天文学家提出了一个用于表示、传输、发布和存档天文警报的虚拟天文台标准，VOEvent (Williams 等, 2006)。VOEvent 采用了结构化数据格式，而非传统的自然语言描述，确保了自动化系统能够无需人工介入即可高效处理和响应 VOEvent 数据包，以实现瞬变事件的快速后随观测，从而提高整个天文学界对瞬变天文事件的响应速度和观测效率。如图 1-2 所示，目前 GCN 网络升级为通用坐标网络 (General Coordinates Network) (Singer 等, 2023)，用于分发不同波段和多信使 (引力波、中微子) 的瞬变事件警报。GCN 网络目前包括两种类型的天文事件警报，一种是机器生成的，用于不同观测设备之间准实时传递信息的 GCN Notice；另一类是由天文学家提交的 GCN Circular，用于向其他天文学家分享当前的观测结果，后续观测计划等信息。GW170817 以及后随的多波段观测均是通过 GCN² 进行协同观测的。

1.3.2 后随观测策略

对于引力波电磁对应体后随观测目前主要有两种策略：一种是基于 Tiling 的巡天覆盖观测 (Ghosh 等, 2016; Coughlin 等, 2018; Almualla 等, 2020; Schüssler 等, 2023)；另一种是以星系为目标的宿主星系观测 (Nuttall 等, 2010; Fan 等, 2014; Gehrels 等, 2016; Rana 等, 2019a; Schüssler 等, 2023)。宿主星系观测策略以引力波源的可能宿主星系为目标进行观测，这样能够减少观测的区域，当误差天区的面积较大时，使用 Tiling 巡天覆盖观测策略的大视场望远镜在一个 Tile 内能够观测多个星系，往往比宿主星系策略更加有效。目前，大视场望远镜 (FOV $\geq 1\text{deg}^2$) 通常采用 Tiling 巡天覆盖观测策略进行后随观测，小视场望远镜 (FOV $< 1\text{deg}^2$) 通常采用宿主星系策略进行后随观测。

²<https://gcn.nasa.gov/circulars/21505>

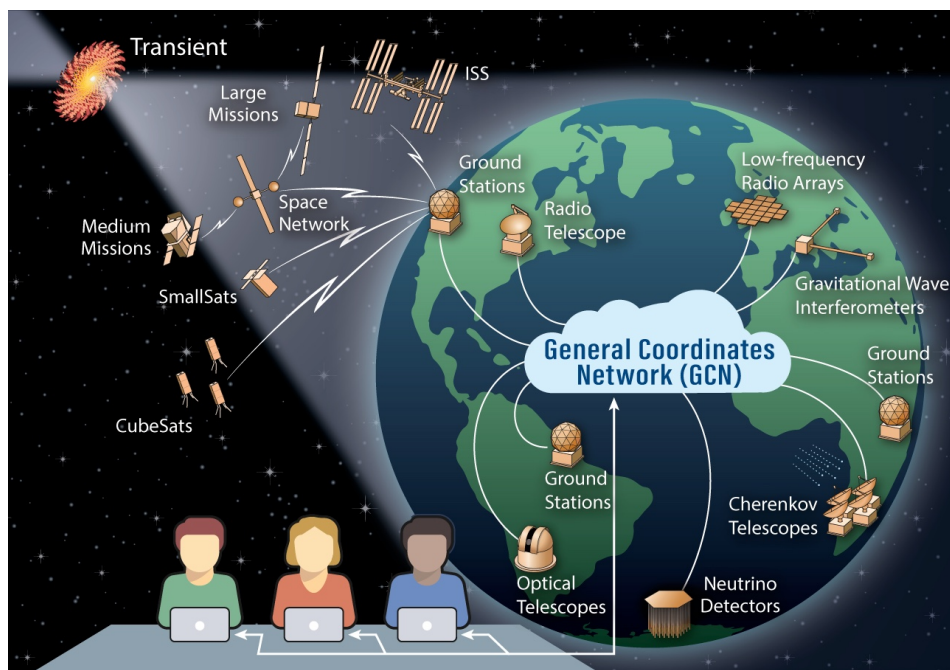


图 1-2 GCN 架构图

Figure 1-2 GCN diagram

图源: <https://gcn.nasa.gov/>

1.3.2.1 Tiling 巡天覆盖观测

Tiling 覆盖策略是根据望远镜视场大小、视场形状, 设计单位网格 Tile, 对被观测引力波事件误差天区进行覆盖。引力波事件的误差天区使用概率分布函数来表示每个坐标是引力波源的概率。将概率分布函数定义为函数 $L(\alpha, \delta)$, 其中 α 和 δ 是天球坐标。考虑视场为 $\Delta\alpha\Delta\delta$ 的望远镜, 根据视场大小构建相等面积的单元网格 Tile, 并沿赤经赤纬进行误差天区的覆盖, 那么每个 Tile 的累计概率是:

$$T_{ij} = \int_{\alpha_i}^{\alpha_i + \Delta\alpha} \int_{\delta_j}^{\delta_j + \Delta\delta} L(\alpha, \delta) d\Omega \quad (1-1)$$

其中 α_i, δ_j 是 (i, j) Tile 对应的天球坐标。

根据每个 Tile 的累计概率确定 Tile 的优先级, 因此, 引力波误差天区被划分为包括 Tile 编号, 优先级和天球坐标等信息的一组 Tile 网格。

1.3.2.2 宿主星系观测

Laura K. Nuttall 和 Patrick J. Sutton 在 2010 年提出了搜索致密双星并合产生的引力波的源的宿主星系的算法 (Nuttall 等, 2010), 他们根据位于引力波误差天区内的星系的位置、距离和光度信息, 对宿主星系进行排序, 以期能在优先级高的星系中观测到引力波的电磁对应体。Nuttall 等人的研究基于 GWGC 星表 (White 等, 2011), 该星表记录了 100Mpc 内 53,255 个星系的位置、距离、B 波段

星等、位置角和类型等详细信息。

1.3.3 暂现源识别算法

随着时域天文学的快速发展，面临海量的观测数据，这要求人们采用自动化方法来识别那些短暂出现的天体现象（暂现源）。目前，有两种主流的暂现源识别算法：

星表匹配算法：这种算法通过比较最新的观测数据与已有的天体目录，来寻找那些亮度有显著变化或新近发现的天体 (Bloom 等, 2012)。它的优势在于快速高效，且不会引入新的误报。但这种方法在面对天体密集或背景复杂的观测区域时，可能会出现识别错误或漏检的情况。

图像相减算法：这种算法通过对比新观测图像与同一天区的模板图像，创建出一张突出显示两者差异的图像 (Alard 等, 1998)。在这张差异图像中可以有效地识别出亮度变化、新出现、消失或移动的天体。图像相减算法的主要优点是不会遗漏处于星系附近或与其他点源混合在一起的目标。缺点是处理时间长，且容易产生系统性误差，导致假源的误报。

1.3.4 后随观测的挑战

与 GW170817 事件不同的是，在 LVC 已完成三次观测运行 (O1-O3) 得到的观测结果中，绝大多数得到的引力波事件的 90% 累计概率误差天区的面积是在数千平方度以上。在 2023 年开始的第四次观测运行 (O4a) 中，探测到的引力波事件的 90% 累计概率误差天区的面积最差的高达 29972deg^2 ($S231029y^3$)，最好的面积为 82deg^2 ($S230627c^4$)，其光度计算估计为 291MPc，误差天区的面积中位数为 2015deg^2 。引力波后随观测面临的最大挑战就是引力波源超大误差天区。同时，引力波信号伴随可能释放的电磁信号，如伽马暴，具有快速衰减的特点。为了捕捉这些短暂而又珍贵的电磁波信号，人们需要采用高效的后随观测策略，对引力波波源误差天区进行观测。

1.4 国内外研究现状

对于引力波电磁对应体的搜索观测工作最早可以追溯到 2010 年，在这一年，LVC 团队实施了首个针对引力波瞬变事件的快速电磁对应体后随观测的实验 (The LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration 等, 2012)。该次实验同时使用了“Tiling 巡天覆盖观测”和“宿主星系观测策略”，验证了多信使观测的可行性。之后，天文学家不断改进多波段联合观测的算法，既包括改进后随观测策略算法，也包括增强多台望远镜之间的协作算法。

³<https://gracedb.ligo.org/superevents/S231029y/>

⁴<https://gracedb.ligo.org/superevents/S230627c/>

1.4.1 后随观测策略的改进

1.4.1.1 Tiling 策略的改进

天文学家目前从减少 Tile 的数目、减小望远镜回转时间和改变 Tile 观测顺序以达到在观测时间内累计概率最大化等方式来改进 Tiling 策略。

除了上面提到的 Tile 沿赤经赤纬进行误差天区的覆盖的方式，Nihar Gupte 等人提出了一种基于遗传算法的选择 Tile 算法 (Gupte 等, 2020)，用于找到使用最少的 Tile 的数目完成对误差天区轮廓的平铺方案，该算法主要运用于视场为圆形的望远镜上。Shaon Ghosh 等人对比了简单轮廓平铺策略和概率排序平铺策略对于同一个引力波事件 Tile 的累计概率和达到 95% Tile 数目，得出的结果根据 Tile 的概率和降序排序进行选择，Tile 会以更少的数目使累计概率和达到 95%(Ghosh 等, 2017)。Rana 等人通过分析观测不同顺序 Tile 下望远镜回转时间，提出了一种基于旅行商问题的最小回转时间算法 (Rana 等, 2019b)，通过在不影响 Tile 可见性的情况下改变观测 Tile 的顺序，以实现减少望远镜回转时间，将更多的可见时间用在后随观测上。

1.4.1.2 宿主星系策略的改进

天文学家目前从两个方面优化宿主星系策略：一方面，通过完善星系星表信息，以提高数据完整性；另一方面，利用引力波信号参数建模，计算确定宿主星系的优先级。

目前，专门用于引力波电磁对应体后随观测的星表有 HECATE 星表 (Kovlakas 等, 2021)、GLADE+ 星表 (Dályá 等, 2022)、NED-LVS 星表 (Cook 等, 2023)。其中 NED-LVS 星表是目前包含星系最完善的星表，包括了距离 1000 MPc 以内的约 190 万个星系，其中包括在 30 MPc 以内的完整的星系质量信息，包括在 400 MPc 以内全部亮星系。在超过 80 MPc 距离上，NED-LVS 星表比 GLADE 星表和 HECATE 星表多 ~10%–20%(Cook 等, 2023)。

目前有多个基于贝叶斯推理的方法通过引力波信号的和星系的信息，计算是该星系是宿主星系的后验概率，并按照后验概率降序确定优先级。Singer 等人提出了基于光度距离的星系是宿主星系的算法 (Singer 等, 2016b):

$$P_{\text{pos}} = P_{\text{dV}} = \frac{P_{\text{pixel}}}{\text{Pixel area}} \cdot N_{\text{pixel}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{D_{\text{galaxy}} - \mu_{\text{pixel}}}{\sigma_{\text{pixel}}} \right)^2} \quad (1-2)$$

其中， P_{pixel} 是给定像素包含的后验概率， N_{pixel} 是给定像素的归一化因子，距离的估计值， μ_{pixel} 是给定像素处的平均距离值， σ_{pixel} 是给定像素处的标准差，而 D_{galaxy} 是从星系星表中获取的星系的光度距离。

Ducoin 等人提出了一种基于星系恒星质量的优化宿主星系优先级的算法 (Ducoin 等, 2020):

$$P_{\text{mass}} = \frac{P_{*,\text{galaxy}}}{\sum P_{*,\text{galaxy}}} \quad (1-3)$$

$$\alpha = \frac{\sum P_{\text{pos}}}{\sum P_{\text{pos}} P_{\text{mass}}} \quad (1-4)$$

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{pos}} \cdot (1 + \alpha \cdot P_{\text{mass}}) \quad (1-5)$$

其中 $P_{*,\text{galaxy}}$ 是给定星系的恒星质量, $\sum P_{*,\text{galaxy}}$ 是误差天区内所有星系的恒星质量的和。

1.4.2 多望远镜联合后随观测

由于单个望远镜的观测能力是有限的,也可能因为天气、地理位置等原因导致无法立刻投入到后随观测活动中去,因此,目前引力波电磁对应体后随观测通常采用分布于不同地理位置的多台望远镜联合观测的方式。分布在不同地理位置的望远镜首先增强了望远镜的容错率,当某台望远镜因为自身故障或天气原因无法观测时,其他望远镜可以继续后进行观测,避免错过最佳观测时间。多台望远镜也增加了观测能力,不同的望远镜选择引力波误差天区的不同位置观测,能够缩短覆盖观测完整误差天区的时间。一旦对该区域进行成像并确定了候选暂现源,位于世界各地的望远镜网络就可以对候选暂现源进行持续跟踪观测,避免单望远镜情况下只能在可观测时间内进行跟踪观测导致观测数据不全面的问题。

目前存在的引力波电磁对应体后随观测网络有 GROWTH⁵、GRANDMA⁶、BOOTES⁷和我国天文学家主导的 GWFUNC(Xu 等, 2020) 等。目前 GROWTH 和 GRANDMA 网络使用 Gravitational-wave Electromagnetic Optimization (gwemopt) 观测技术定制软件对引力波事件进行观测规划 (Coughlin 等, 2019)。该软件采用迭代方案来实现网络对引力波事件的观测规划,其基本思路是首先对网络中的望远镜按照优先级进行排序,之后对各望远镜依次按照观测目标分配、观测调度等步骤安排观测。对优先级最高的望远镜完成观测目标分配后,就在引力波定位天区中删去已分配目标覆盖的天区。之后再对第二台望远镜进行观测安排,由此迭代至最后一台望远镜。

BOOTES 网络中包含一台 $15^\circ \times 15^\circ$ 宽视场望远镜 BOOTES-1a, 其余望远镜为窄视场望远镜 (Hu 等, 2021)。BOOTES 网络的规划策略是通过使用 BOOTES-1a 以巡天覆盖观测的方式观测引力波误差天区,BOOTES 网络中的其他望远镜通过下载星系候选列表,选择各自可见的星系进行观测。

GWFUNC 网络使用 GWOPS 进行引力波事件的观测规划 (Xu 等, 2020)。GWOPS 是针对引力波事件的后随观测规划与暂现源证认系统,具备引力波事件监听、引力波定位天区数据处理、针对望远镜的观测目标分配和观测调度,以及观测数据处理和暂现源证认能力。对于小视场望远镜, GWOPS 同样采用星系星表进行星系筛选,并通过贝叶斯推断框架计算各星系的观测优先级,之后根据网络中望远

⁵<https://www.growth.caltech.edu/>

⁶<https://grandma.ijclab.in2p3.fr>

⁷<https://bootesnetwork.com>

镜的目标可见性和极限星等进行观测目标的分配和观测调度(许允飞, 2021)。对于大视场望远镜的平铺引力波定位天区观测方式, GWOPS 采用了基于望远镜位置作为观测目标分配的优先基准, 即首先为每个望远镜根据其所处经度, 将最先升起的目标分配给对应的望远镜, 再由望远镜自身对目标进行观测调度。

1.5 主要研究内容

面向当前国内望远镜网络联合后随观测引力波电磁对应体的需求, 本文构建了一套服务国内数台地面望远镜的引力波事件电磁对应体后随观测规划系统, 用于在 LVC 第四次运行(O4)期间为国内望远镜网络提供观测规划功能。该系统是对 GWOPS 系统的升级, 使其能够提供面向大视场望远镜网络的观测规划功能。主要研究内容包括: 针对引力波后随观测大视场望远镜网络的观测目标选择算法、观测目标协同分配算法和观测目标调度算法的研究:

观测目标选择算法: 从引力波误差天区中选择观测目标并设定观测目标的优先级, 在最小的观测目标数目下和合理的观测优先级下, 实现最大的累计概率的覆盖。

观测资源分配算法: 将引力波误差天区作为观测目标分配给网络中的各个望远镜, 实现网络对观测目标的协同覆盖。其目的是发挥望远镜网络的优势, 减少不同望远镜观测区域的重叠率, 最大效率地使用望远镜网络的观测能力。

观测目标调度算法: 由于引力波事件可用后随观测时间的限制, 望远镜一般只能完成观测目标部分子集的观测, 因此高效的调度算法对于引力波后随观测至关重要。观测目标调度算法将根据望远镜的可用观测窗口和观测目标的优先级, 安排各观测目标的观测顺序, 以实现在可观测时间内观测更大累计概率的引力波误差天区。

1.6 文章结构

本文分为六部分:

第一章绪论。主要介绍了本课题的研究背景, 引力波探测和引力波电磁对应体后随观测的历史与发展, 并介绍了本文的主要研究内容, 构建一套引力波事件电磁对应体后随观测规划系统。

第二章引力波后随观测规划问题的理论分析与建模。分析了引力波事件误差天区的特点和望远镜观测的约束条件, 并根据观测目标和约束条件, 提出了一个基于整数线性规划的数学模型, 为高效、科学地制定引力波后随观测规划提供了理论依据。

第三章引力波后随观测规划的优化策略设计和算法原理。本章主要介绍了面对实际观测中的复杂情况, 本文实现的面向望远镜网络的后随观测规划算法框架的设计与原理。

第四章引力波事件后随观测规划运行系统的实现与运行情况。介绍了本文

构建的观测规划运行系统的组成与实现以及在 LVC 第四次观测运行（O4）期间观测规划运行情况。

第五章观测规划用户交互系统的实现与运行。本章主要介绍了观测规划用户交互系统的实现。

第六章总结与展望。对本文的工作内容做了总结，并提出了一些以后可以改进的内容。

第2章 引力波后随观测规划问题的理论分析与建模

引力波后随观测是一类具有极强时效性的机遇目标观测，同时具有较高的科学价值。由于引力波事件给出的定位天区的面积很大，很难在一个很短的时间段内完成对全部天区的观测，因此后随观测需要选择合理的观测目标和观测时间进行观测。通过制定合理的观测计划，有助于增加观测到引力波电磁对应体的几率和提高望远镜资源的利用率。本章对引力波后随观测规划问题进行具体的分析，包括望远镜在实际观测时的约束条件、引力波事件误差天区的描述和如何确定观测的优先级，进而建立起引力波后随观测规划问题的数学模型，为下一步算法设计提供理论上的依据。

2.1 望远镜观测约束条件

在实际观测中，由于地球自转和公转造成天体视运动的变化，使观测目标在各个时期具有不同的目标可见性。望远镜观测活动受到多种条件的共同约束，根据能否违背，可以将约束条件分为两种，一种是不可违背的约束条件，通常被称为硬约束，它用来衡量一个调度方案的可行性；另一类是可以违背的约束条件，通常被称为软约束，它是影响调度方案质量的约束条件，需要尽可能地满足条件(李曼迪等, 2019)。

2.1.1 硬约束条件

(1) 地理约束：观测目标的可见性是观测活动最关键的约束条件，台址的地理位置和周围环境是影响观测目标可见性的不可违背的因素。由于地球的自转和公转导致时区差异和季节变化，同一时刻不同台址对于同一个观测目标的可见性是不同的，同一台址不同时刻对同一个观测目标的可见性也是不同的。

(2) 仪器设备约束：观测设备自身的特点也约束实际的观测活动。设备本身的视场大小、角分辨率、口径等因素决定了设备的观测能力，即使在同一台址，不同观测能力的望远镜能够观测的目标也是不同的。

(3) 天气和运行状况约束：当观测台址出现多云或下雨天气时，无法进行观测活动；当观测设备处于维护状态时，也无法进行观测活动。

(4) 观测目标约束：与常规天体不同，它们在人类寿命的时间尺度内变化不大，因此可以灵活安排在可见时间内进行观测。ToO (Target of Opportunity, 机遇目标) 指的是那些需要在发现后尽快观测的特定天文现象，例如超新星、新星、伽马暴和引力波等。这些现象的亮度随时间迅速变化，如果错过最佳观测时机，它们的亮度可能会下降到望远镜的探测极限以下，从而无法进行有效的观测。

(5) 月相约束：作为地球的自然卫星，月球表面将太阳光反射回地球，成为夜空中最为显著的光源。当月球在天空中接近或位于观测目标区域时，其强烈的光照会淹没目标天体的微弱光线，形成一种无法克服的背景干扰，使得望远镜在

该时段甚至无法有效观测受影响的目标。因此月球导致的观测目标不可见也是不可违背的约束条件。月相的周期性变化会导致月球的亮度也存在周期性变化,这进一步影响了其对周围天体可观测性的制约程度。因此需要权衡并计算月相及其亮度变化的影响,适时调整观测时间和角度策略,以最大程度降低月相对观测目标可见度的潜在干扰。

2.1.2 软约束条件

除了以上不可违背的硬约束外,还有其他一些约束条件虽非强制,但在规划时也应尽可能满足,下面是对望远镜观测中的一些软约束条件。

(1) 望远镜观测顺序的约束:在不同的观测顺序下,望远镜因为切换观测目标花费的回转时间是不同的,如果能够合理安排观测顺序,则能够减少回转时间,将宝贵的观测时间分配给观测目标本身。

(2) 观测目标的优先级约束:不同观测目标的优先级是不同的,观测优先级高的目标往往能够获得高的科学收益。优先级的制定更有利于高质量项目的完成,能够更高效地利用观测时间。因此,在进行观测活动时,尽量保证高优先级的观测目标的观测时间。

尽管这些条件并非绝对不可违背,但在规划过程中应尽可能予以满足,以提升观测计划的整体效益。

2.2 引力波源误差天区

引力波误差天区是引力波探测器确认的引力波源实际发生位置的不确定性区域,通常以统计方法计算得出 (Singer 等, 2016a),表示引力波源可能位于其中的概率分布。LVC 给出的引力波源误差天区以 HEALPix 全天图像 (Górski 等, 2005) 的形式保存在 FITS⁸文件中。目前 LVC 提供两种 HEALPix 格式的 FITS 文件,分别是标准 HEALPix 图像和多阶覆盖图像,本文下面将对 HEALPix 和这两种 HEALPix 格式的 FITS 文件进行介绍。

2.2.1 HEALPix 简介

HEALPix 是 Górski 等人提出的一种将球按照层级划分的算法,它在球面上构造自相似的、可细化的四边形网格,天球被划分的网格越多,其分辨率就越高。HEALPix 基础网格是由 12 个等面积的四边形组成,并根据参数 N_{side} 进行进一步细分,每一个四边形等面积的划分为四个等面积的小四边形。当 $N_{\text{side}} = 2^k$ 时,球面被递归地划分为 $N_{\text{pix}} = 12 \times N_{\text{side}}^2$ 个四边形,每个四边形区域称之为“像素 (pix)”,每个像素都有与之对应的编号。图2-1展示了当 $N_{\text{side}} = 1, 2, 4, 8$ 时对应的球面划分情况。

HEALPix 有两种区域编号模式,分别为“RING”模式和“NESTED”模式。RING 模式按照环形顺序,沿着纬线西到东的顺序依次编号,从北极依次扩展

⁸<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/fits.html>

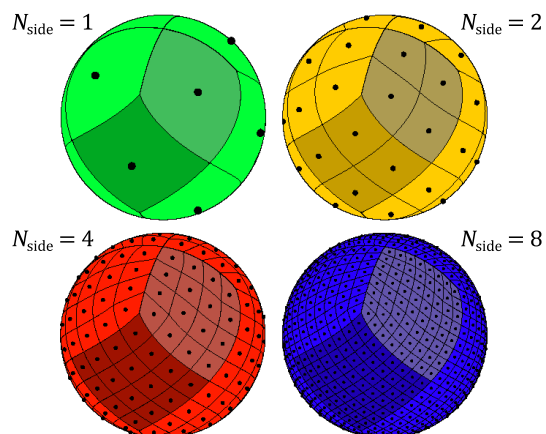


图 2-1 当 $N_{side} = 1, 2, 4, 8$ 时对应的球面划分情况

Figure 2-1 The partitioning of the sphere by HEALPix at $N_{side} = 1, 2, 4, 8$

图源: <https://healpix.sourceforge.io/>

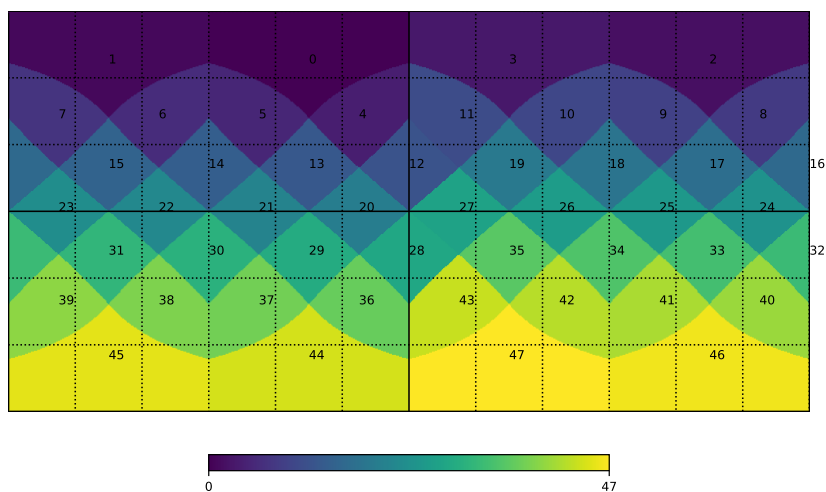


图 2-2 HEALPix RING 模式编号示意图

Figure 2-2 The number index in RING mode

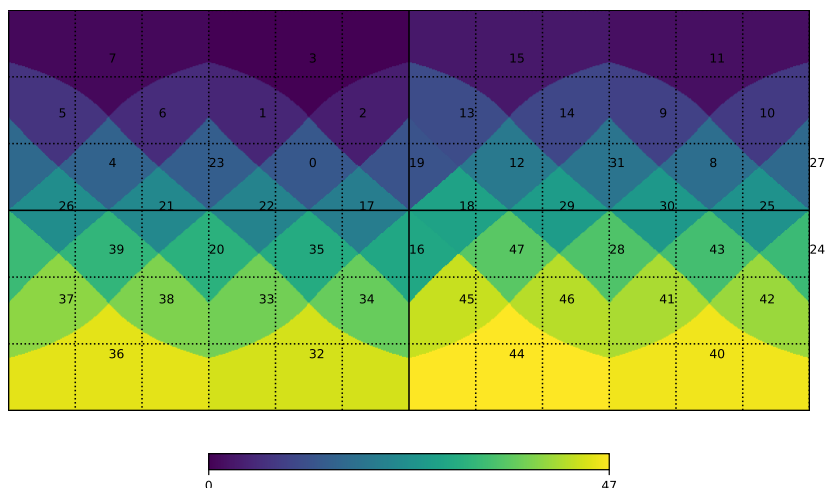


图 2-3 HEALPix NESTED 模式编号示意图

Figure 2-3 The number index in NESTED mode

到南极。RING 模式下，编号索引与经纬度坐标系统有很好的对应关系，很容易实现球谐函数上的傅里叶变换⁹。NESTED 模式基于二叉树结构去对像素进行编号，每个像素的编号索引与上一层级的父像素的编号索引有对应关系，如果一个像素在当前层级的编号是 $npix_i$ ，那么它的下一层级的四个细分网格的编号为 $[4 \times npix_i, 4 \times npix_i + 1, 4 \times npix_i + 2, 4 \times npix_i + 3]$ ，四个细分网格的顺序按照从左到右下的顺序进行编号。基础网格的 NESTED 模型下的编号索引和 RING 模式相同。NESTED 模式的优点是支持高效的搜索算法，如最近邻搜索、区域内查询等算法，NESTED 模式允许对像素进行快速的子采样或上采样，从而实现快速地对图像分辨率进行更改。图2-2 和图2-3 展示了在 $N_{side} = 2$ 情况下两种编码模式下索引编号的不同。

2.2.2 误差天区文件

因 HEALPix 具有均匀分割、自相似性、便于计算等优势，采用 HEALPix 方式表示引力波源误差天区，有利于精确刻画引力波源可能的位置分布。标准 HEALPix 图像是使用 NESTED 模式索引和隐式索引格式¹⁰（HEALPix 像素索引本身未标识在文件中，而是通过表格行号与 HEALPix 像素索引一一对应）的 HEALPix 全天图像，并保存在 FITS 文件中，每个 HEALPix 像素存储了所对应位置是引力波源发生位置的后验概率，全天球的整个后验概率和为一。对于 CBC (Compact binary coalescence, 致密双星并合) 事件，FITS 文件中还包含了引力波源的光度距离的估计。

⁹https://healpix.sourceforge.io/html/intro_Geometric_Algebraic_Propert.htm

¹⁰<https://gamma-astro-data-formats.readthedocs.io/en/latest/skymaps/healpix/index.html>

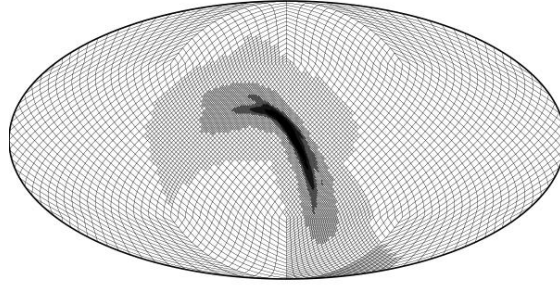


图 2-4 多阶覆盖图示例图

Figure 2-4 Multi-Order Sky Maps Example

多阶覆盖图像是一种使用显式索引格式¹¹ (HEALPix 像素索引显式地给出) 和 UNIQ 索引模式的 HEALPix 全天图像, 旨在减小误差天区文件的大小和增加局部区域的分辨率 (Singer 等, 2016a)。UNIQ 索引模式是一种描述多层级 HEALPix 像素的编码方案 (Fernique 等, 2022), 它基于 N_{side} 和 NESTED 模式下的像素索引 $ipix$, 编码出唯一的 UNIQ 索引

$$uniq = ipix + 4 \times N_{side}^2 \quad (2-1)$$

同样地, 根据 UNIQ 索引 $uniq$, 可以计算出

$$N_{side} = 2^{\lceil \log_2(uniq/4)/2 \rceil} \quad (2-2)$$

$$ipix = uniq - 4 \times N_{side}^2 \quad (2-3)$$

如图2-4所示, 当连续区域的后验概率相同时, 多阶覆盖图像使用低分辨率的 UNIQ 索引来统一描述, 而对于位置精度高的区域, 多阶覆盖图像使用高分辨率的 UNIQ 索引来描述。

2.3 引力波后随观测规划问题的数学模型

2.3.1 符号定义

为了描述引力波事件的后续观测规划问题, 本文在数学模型中定义了相关变量及符号, 具体定义请参见表2-1。

¹¹<https://gamma-astro-data-formats.readthedocs.io/en/latest/skymaps/healpix/index.html>

表 2-1 数学模型中的变量及符号定义
Table 2-1 Parameters and symbols definition

参数	含义
Tels	望远镜资源集合
N_{tel}	望远镜的数目
$[T_{start}, T_{end}]$	T_{start} 表示观测规划起始时间, T_{end} 表示观测规划结束时间
S	引力波事件误差天区 (以 HEALPix 表示)
$Tile_i$	望远镜 i 在硬约束条件下的可见天区集合
R	规划方案

2.3.2 基本定义

定义 1 望远镜资源集合 Tels

Tels 是望远镜资源的集合, 表示当前可以使用的望远镜的属性信息, 包括望远镜所在台站的地理位置 (Latitude, Longitude, Altitude)、望远镜的视场大小 (Field Of View, FOV)、视场形状、望远镜最小最大观测高度角 ($Altitude_{min}$, $Altitude_{max}$)、望远镜最短曝光时间 $Duration_{min}$ 等。

定义 2 引力波事件误差天区 S

引力波事件误差天区 S 是使用 HEALPix 描述的全天图像, 每个像素代表该位置是引力波源的后验概率, 并将标准 HEALPix 图像和多阶覆盖图像下采样为统一分辨率的标准 HEALPix 图像。

定义 3 望远镜 i 在硬约束条件下的可见天区集合 $Tile_i$

望远镜观测目标 $Tile_i$ 是望远镜 i 在使用 Tiling 算法计算出的能够覆盖 90% 累计概率天区, 并在观测硬约束条件下, 在 $[T_{start}, T_{end}]$ 内可见 $Tile$ 的集合, 包括 $Tile$ 的中心点的天球坐标 (ra, dec)、累计覆盖率 prob、编号 ID、所属望远镜的名称 Tel_{name} 、最早可见时间 $Visible_{start}$ 和最晚可见时间 $Visible_{end}$ 。其中 prob 可以当作当前观测目标的优先级。

定义 4 规划方案 R

规划方案 R 是对于望远镜 i , 对应一组有观测顺序的观测目标 $Tile_i$, 每个 $Tile$ 规划出实际规划观测时间 $Tile[Obs_{time}]$ 。

2.3.3 约束分析

约束 1 观测活动约束, 一台望远镜每次曝光只能观测一个目标。

约束 2 观测时间约束, 观测目标只能在望远镜对于该目标的可见时间范围内进行观测。

约束 3 观测目标约束，为了充分地利用望远镜的观测资源，不同望远镜不对同一区域进行重复观测。

2.3.4 数学模型

整数线性规划是一种优化方法，它要求决策变量取整数值，并通过线性不等式或等式约束来描述问题的约束条件，目标函数通常是线性的，旨在最大化或最小化某个指标。在本节中，本文构建一个基于整数线性规划的数学模型以解决引力波后随观测规划问题。该模型旨在最大化观测覆盖率，同时考虑观测重复度惩罚，且严格遵循先前定义的约束条件。

决策变量： $x_{i,j} \in \{0, 1\}$ ：二元决策变量，若望远镜 i 观测 Tile_j ，则赋值为 1；反之赋值为 0。

目标函数： 构建的目标函数旨在最大化观测覆盖概率，同时考虑重复观测的影响，

$$\text{maximize } Z = \sum_{i=1}^{N_{tel}} \sum_{j=1}^{|\text{Tiles}|} x_{i,j} \cdot \text{prob}_j - \sum_{i=1}^{N_{tel}} \sum_{j=1}^{|\text{Tiles}|} \sum_{k=1, k \neq i}^{N_{tel}} x_{i,j} \cdot x_{k,j} \cdot \text{Overlap}_{i,j,k} \quad (2-4)$$

其中 $\text{Overlap}_{i,j,k}$ ：表示望远镜 i 的 Tile_j 与望远镜 k 的任意一 Tile 之间的重叠面积占 Tile_j 总面积的比例，作为惩罚系数。

约束条件：

(1) 观测活动约束：

$$\sum_{j=1}^{|\text{Tiles}|} \mathbb{1}(t \in [\text{Tile}_j[\text{Obs}_{\text{time}}], \text{Tile}_j[\text{Obs}_{\text{time}}] + \text{Duration}_{\min}]) \cdot x_{i,j} \leq 1 \quad (2-5)$$

该约束利用指示函数 $\mathbb{1}(\cdot)$ 确保在任一时刻，望远镜 i 至多观测一个 Tile ，符合观测活动约束。

(2) 观测时间约束：

$$\begin{aligned} \text{Tile}_j[\text{Obs}_{\text{time}}] &\geq \text{Tile}_j[\text{Visible}_{\text{start}}] \\ \text{Tile}_j[\text{Obs}_{\text{time}}] + \text{Duration}_{\min} &\leq \text{Tile}_j[\text{Visible}_{\text{end}}] \end{aligned} \quad (2-6)$$

此约束确保望远镜 i 仅对在其可见时间范围内的 Tile 进行观测，遵循观测时间约束。

(3) 重复观测约束：

$$\begin{aligned} \sum_{k=1, k \neq i}^{N_{tel}} x_{k,j} \cdot \text{Overlap}_{i,j,k} \cdot \mathbb{1}(\text{Overlap}_{i,j,k} > \tau) < 1 &\implies x_{i,j} = 0, 1 \\ \sum_{k=1, k \neq i}^{N_{tel}} x_{k,j} \cdot \text{Overlap}_{i,j,k} \cdot \mathbb{1}(\text{Overlap}_{i,j,k} > \tau) \geq 1 &\implies x_{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (2-7)$$

其中, τ 为设定的重叠面积阈值, 如 0.3 (即允许 30% 的重叠), 此约束确保当望远镜 i 的 Tile j 与至少一个其他望远镜的 Tile 存在超过阈值的重叠面积时, 望远镜 i 不会观测该 Tile, 从而遵循观测目标约束。

2.3.5 模型求解

在本章提出的整数线性规划模型尽管形式简洁明了, 但因其固有的组合优化特性, 直接求解整数线性规划模型会面临计算复杂度较高的挑战。本文将在下一章介绍一种采用分层分解策略的近似算法, 该算法旨在有效降低计算负担, 同时保持求解过程的可靠性和时效性, 逐步逼近全局最优解。具体的算法设计和实施细节将在下一章详细阐述。

2.4 本章小结

本章集中讨论了引力波后随观测规划问题的关键要素。首先, 本章详述了望远镜观测活动受到的各种约束条件, 包括决定观测可行性的硬约束以及影响观测计划优劣的软约束。然后, 本章介绍了利用 HEALPix 技术对引力波源误差天区进行高效表示的方法, 以及如何根据 HEALPix 图像来确定位置的后验概率, 即优先级。最后, 本章构建了一种基于整数线性规划的数学模型, 通过合理设置决策变量和目标函数, 并设计了适应观测活动、时间和重复观测的约束条件, 旨在优化观测覆盖率并避免无效重复观测, 为高效、科学地制定引力波后随观测规划提供了理论依据。下一章讲围绕本章讨论的约束条件、引力波误差天区和后随观测目标, 提出了一套可用于望远镜网络联合观测的算法框架。

第3章 引力波后随观测规划的优化策略设计和算法原理

继上一章深入分析了引力波后随观测的约束条件和数学模型后，本章将进一步探讨如何将这些理论应用于实际观测场景，并设计了一套面向望远镜网络的后随观测规划算法框架，以适应实际观测中的复杂情况，提高观测效率和科学成果。该算法框架设计注重在实际应用中实现可行性和可控性的同时，尽可能实现数学模型的目标函数。本章将逐步介绍算法的核心模块，包括观测目标选择算法、望远镜网络的协同优化算法以及观测调度算法，最后对本章内容进行总结并展望未来的工作。

3.1 观测目标选择算法

观测目标选择是引力波后随观测的关键起始步骤，它直接影响后续观测计划的制定。面对大范围且概率分布不均匀的引力波源误差天区，首要任务是运用“Tiling 算法”将其分割成一系列可在一个观测周期内完成的子区域，即 Tiles。然后，需要根据一种高效的策略从 Tiles 观测目标数组中选择子集，并确定观测目标 Tile 的优先级。

3.1.1 Tiling 算法

“Tiling 算法”是一种在处理大规模数据或空间时广泛应用的优化技术，尤其在天文观测领域，它旨在将复杂且广阔的观测区域划分为若干个较小、易于管理的子区域，称为 Tiles。在引力波事件后随观测中，“Tiling 算法”适用于生成一组引力波源误差天区内的 Tiles 网格，确保在有限观测资源下实现对高概率区域的全面覆盖，同时通过控制 Tile 之间的重叠程度来提高观测的可靠性和灵敏度。

“Tiling 算法”作为一种广泛应用的技术，目前许多望远镜和巡天项目均使用“Tiling 算法”来划分观测目标 (Campbell 等, 2004; Blanton 等, 2003; Li 等, 2009)，因此望远镜观测团队通常提供一组预设的 Tiles 网格 (Bellm 等, 2019) 作为固定的观测目标，这些 Tiles 能够无缝拼接并完全覆盖整个天空，之后的算法选择预设 Tiles 网格作为下一步的观测目标。当望远镜观测团队未提供预设的 Tiles 网格时，需要运行一种“Tiling 算法”，根据望远镜的视场的大小和形状生成与之匹配的 Tile，如图3-1 所示的步骤，下面将对生成 Tiles 的算法进行介绍。

首先，根据赤纬方向的视场的宽度将天球沿赤纬方向分割为若干等宽的条带，每一条带均以赤道为基准，向上延伸至极点。条带的宽度由望远镜视场在赤纬方向的宽度决定，并通过向上取整确保每一条带都能完整覆盖天球。因此，总共的条带数目为

$$n_{dec} = \left\lceil \frac{90}{f_{dec}} \right\rceil \quad (3-1)$$

，其中 f_{dec} 是单个瓦片在赤纬方向上的视场宽度（单位是度）。

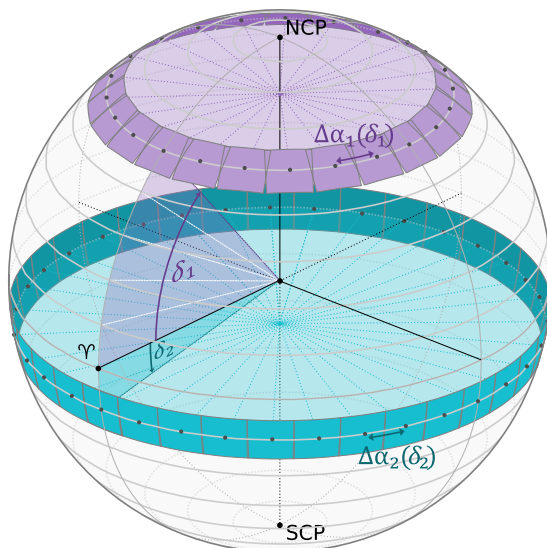


图 3-1 Tiling 算法示意图

Figure 3-1 Tiling Algorithm Illustration.

随后，算法在每个赤纬条带内沿赤经方向均匀分布一系列瓦片中心点，其间隔由望远镜视场在赤经方向的宽度和赤纬的余弦值联合决定，宽度

$$\Delta\alpha(\delta) = \frac{f_{ra}}{\cos(\delta)} \quad (3-2)$$

其中 $\cos(\delta)$ 是赤纬 δ 的余弦值， f_{ra} 是望远镜视场在赤经方向的宽度（单位是度）。通过应用余弦公式，从而确保瓦片在天球上的分布随纬度的增加而逐渐稀疏，以适应地球的曲率和望远镜视场的几何特性。

算法 1 根据 Tile 中心点坐标 (ra, dec), FOV 大小, 计算指定 N_{side} 下包含的 NESTED 模式下 HEALPix 像素索引

Require: (ra, dec): Tile 中心点坐标

Require: f_{ra}, f_{dec} , Tile 在赤经赤纬方向上的宽度

Require: N_{side} 得到 HEALPix 像素索引的 N_{side} 参数

Ensure: $pixes$: Tile 包含的 HEALPix 像素索引

$lons = ra + array([0.5, 0.5, -0.5, -0.5]) * f_{ra}$

$lats = dec + array([0.5, -0.5, -0.5, 0.5]) * f_{dec}$ 构建 Tile 四个点坐标, 构建四边形

$max_{depth} = \log_2(N_{side})$

$pixs = cdshealpix.polygon_search(lons, lats, max_{depth})$ 使用 cdshealpix 查询四边形包含的 HEALPix 像素索引

Return $pixs$

在得到 Tiles 网格后，在已知每一个 Tile 的中心点的坐标和望远镜视场大小和性质的情况下，下一步需要将 Tile 与 HEALPix 全天图像对应起来，根据算法1，

它可以用来计算每个 Tile 对应的包含的 HEALPix 像素的索引。由于每个望远镜使用固定的 Tiles 网格，因此只需计算出每个 Tile 包含的 HEALPix 的索引的集合，并保存为文件，即可通过求和的方式计算出每个 Tile 对应的累计概率和

$$\text{Tile}_{\text{prob}} = \sum_{i \in S} \text{pix}_i \quad (3-3)$$

其中 S 是 Tile 包含 HEALPix 像素对应的索引的集合， pix_i 是 HEALPix 像素对应的概率值。为了适应不同分辨率的 HEALPix 图像，预先计算出了 $N_{\text{side}} = 256, 512, 1024$ 情况下 Tile 对应的 NESTED 模式下索引的集合，并保存为 Tile-HEALPix 映射文件。

3.1.2 基于轮廓的层次选择算法

在前文中提到，Shaon Ghosh 等人对比了简单轮廓平铺算法和概率排序平铺算法对于同一个引力波事件 Tile 的累计概率和达到 95% Tile 数目 (Ghosh 等, 2017)，得出了概率排序平铺算法能够以更少的观测目标数目来覆盖相同的累计概率。换言之，当观测相同数目的 Tiles 时，使用概率排序平铺算法能够覆盖的累计概率更大。

尽管概率排序平铺算法在覆盖累计概率方面表现出色，但其在实际应用中存在潜在问题。由于引力波误差天区的复杂特性、HEALPix 像素计算的不确定性以及浮点数运算的累积误差，可能导致覆盖相近累计概率的 Tile 在天球位置上分布分散。当望远镜按照概率排序顺序进行观测时，这些分散的 Tile 导致望远镜在指向转换间产生较大的回转距离，从而增加不必要的回转时间和观测效率的损失。因此，有必要探索一种新的策略，能够在保持覆盖累计概率的同时，优化观测序列以减少回转时间和提高观测效率。

为了克服上述概率排序平铺算法的问题，本文提出了一种基于轮廓的层次选择算法。该算法利用引力波误差天区轮廓的特性，通过构建分层结构来优化观测顺序。如图3-2所示，轮廓算法计算出在最小化总面积条件下覆盖指定累计概率阈值的边界曲线，形成一系列层级 (Layer)。每个层级内的 Tile 使用相同的优先级，且内部层级的优先级大于外部层级，确保了高概率区域首先被安排观测。同一层级内的 Tile 优先级与其覆盖的累计概率无关，望远镜可以自由调度其观测顺序。在同一层级内的 Tile 相对集中，这种选择方式确保了在保持高覆盖率的同时，望远镜在切换观测目标时仅需较小的回转距离，从而最大限度地降低了无效移动的时间成本。这种设计避免了概率排序平铺算法因严格依赖 Tile 覆盖概率导致的优先级相邻 Tile 在空间位置上的分离，从而有望显著降低回转时间从而提升观测效率。下面根据图3-3所示的流程图，对该算法进行详细的描述。

(1) 根据引力波误差天区 HEALPix 图像的 N_{side} ，读取对应的预先计算得到的 Tile-HEALPix 映射文件。

(2) 按照 5% 为间隔计算出 [0.05, 0.10, 0.15...0.85, 0.9, 0.95] 对应的区域的边界曲线，进而计算出所需的层级和其包含的 HEALPix 像素的索引。其中选择 5%

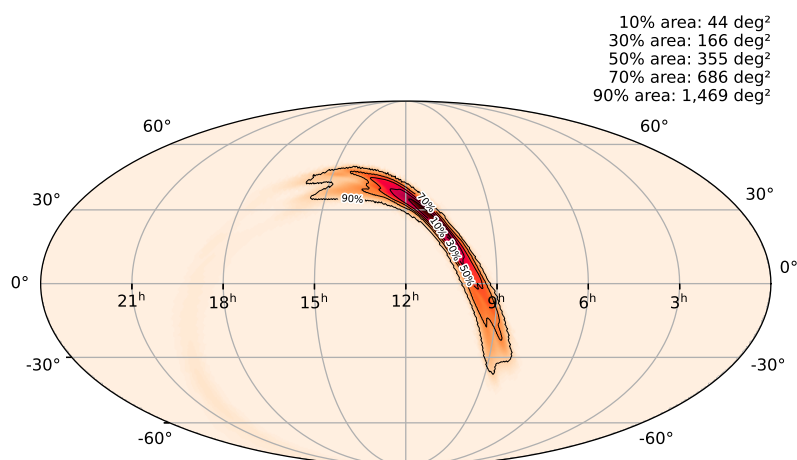


图 3-2 引力波误差天区不同层级示意图

Figure 3-2 Diagram of different levels of the GW skymap according to probability thresholds

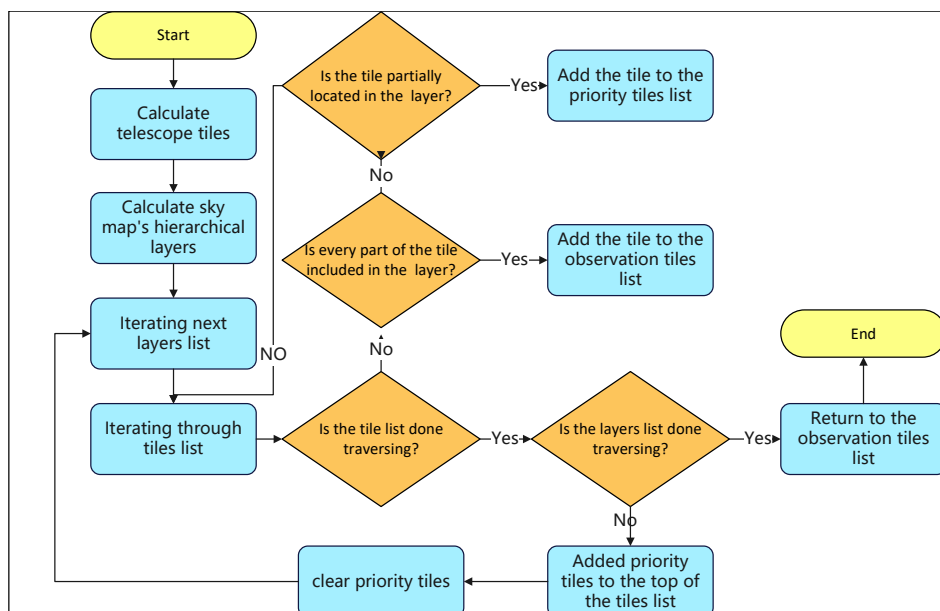


图 3-3 层次选择算法流程图

Figure 3-3 The steps in the hierarchical selection algorithm.

作为间隔是多次实验后找到的经验值。

(3) 按照从内到外遍历不同层次，然后遍历 Tile 列表，对照 HEALPix 索引，可以计算出完全位于该层级、部分位于该层级和不位于该层级的 Tile，将完全位于该层级的 Tile 设置为当前层级的优先级，并将部分位于该层级的 Tile 在遍历下一层级时优先遍历。

(4) 收集设置优先级的 Tile 列表，并按照高优先级到低优先级排序输出。

针对 LVC 提供的部分引力波事件，本文比较了层次选择算法与概率排序平铺算法在相同观测面积（ 200 deg^2 ，以视场面积是 1 平方度，曝光时间 3 分钟，能够连续观测整个可观测夜晚情况，通常的最大可观测天区面积）下的表现，主要从回转距离和覆盖累计概率和这两个指标进行评估。回转距离采用了 Great Circle 公式来计算两个相邻观测目标间的距离：

$$d = \arccos(\sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)) \quad (3-4)$$

其中， α_1 和 α_2 表示它们的赤经， δ_1 和 δ_2 分别代表两个目标的赤纬。通过 Great Circle 公式计算两个观测目标间的回转距离，可以定量评估两种算法在实际观测过程中的效率差异。

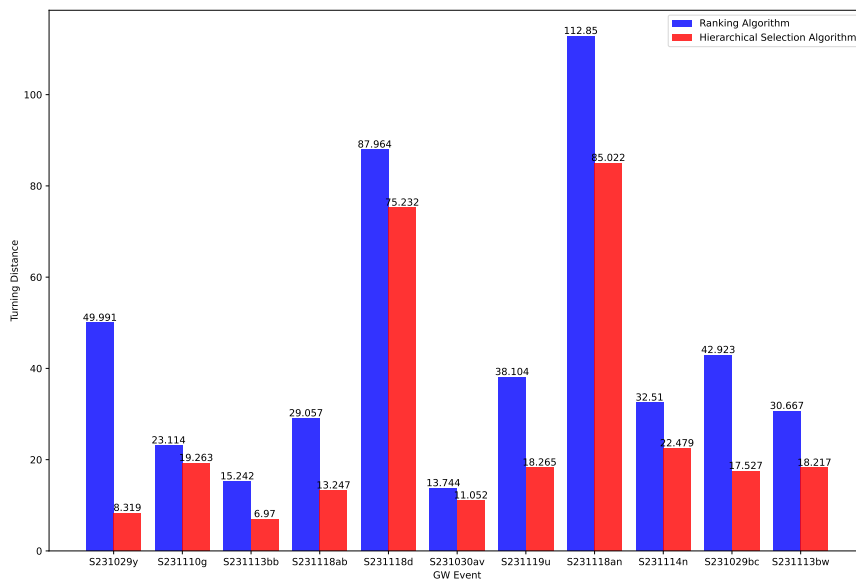


图 3-4 回转距离对比图

Figure 3-4 The Comparison of Turning Distances

如图3-5所示，层次选择算法在相同观测面积（ 200 deg^2 ）情况下，与概率排序平铺算法覆盖几乎相同的累计概率。但从图3-4可以看出，层次选择算法与概率排序平铺算法相比，不同优先级目标的回转距离能够大幅度的减少，平均回转距离减少了 40.92%，最高可达 83.36%。这直接转化为增加实际的可观测时间，提升了发现引力波电磁对应体的机率。

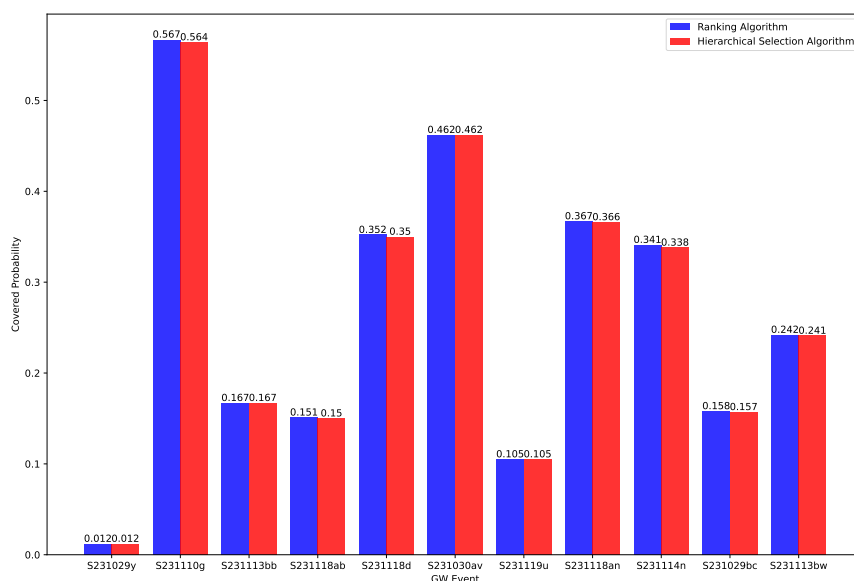


图 3-5 覆盖累计概率和上的对比图

Figure 3-5 The Comparison of Cumulative Coverage Probabilities

3.2 望远镜网络的协同优化算法

面对有限的观测资源，如何高效地分配观测任务至各个望远镜，实现对引力波误差天区的最大化覆盖观测是需要解决的关键问题。作为本文的核心工作，本节将详细介绍一种基于视场大小的望远镜网络的协同优化算法，该算法旨在根据各望远镜的视场特性，将引力波误差天区划分，并以有序的方式将观测目标指派给不同的望远镜，以期在有限条件下实现观测效益的最大化。

3.2.1 观测目标可见性计算

在进行观测规划时，望远镜观测的目标必须是在观测时间段内可见的。因此，本文使用 `astroplan`(Morris 等, 2018) 计算出望远镜 Tiles 网格的在引力波事件发生后 24 小时内满足望远镜硬约束条件的可见 Tile 的时间范围，下面是使用的约束条件：

- **地理坐标与位置限制：**依据望远镜的实际地理位置（经度、纬度、海拔）和给出的最小观测高度角和最大观测高度角，确保观测目标在望远镜的有效观测范围内。

- **日间与夜间限制：**如图3-6所示，选择太阳高度角在地平线 18° 以下的时间段，作为观测活动的时间段。

- **月相与月球位置：**根据时间计算出月相以及对应的月球的亮度 I （数据范围 0-1），然后利用月球的亮度计算出观测目标与月球之间的最小夹角 ($I \times 30^\circ$)，以降低月光背景对观测的干扰。

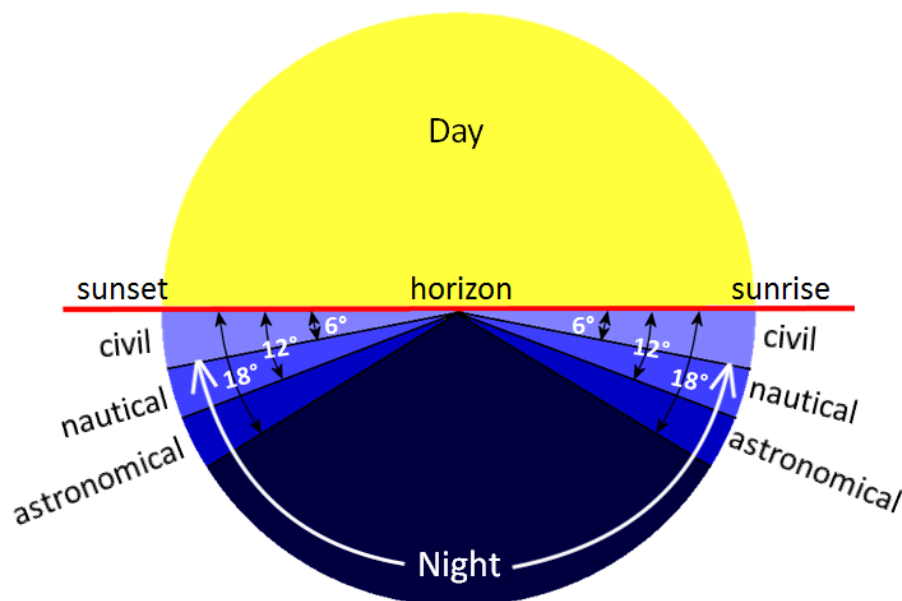


图 3-6 曙暮光示意图
Figure 3-6 Twilight Types

图源: <https://www.weather.gov/lmk/twilight-types>

在实际操作中, 使用 `astroplan` 库可以实现计算出每个 `Tile` 的详细可见时段, 并将其标记为可分配状态, 这些信息将作为后续观测目标分配的重要依据:

```

1 def observable(telescope, tiles, times):
2     observer = Observer(longitude=telescope.lon*u.deg, latitude=telescope.lat*u.deg,
3                         elevation=telescope.altitude*u.m, name=telescope.name, timezone=
4                         telescope.timezone)
5     # 计算月相照明百分比并据此设置月亮远离观测目标的安全距离
6     illuminated = observer.moon_illumination(times[0])
7     moon_separation = np.ceil(illuminated * 30)
8     # 定义观测约束条件
9     constraints = [AtNightConstraint(max_solar_altitude=telescope.twilight*u.deg),
10                  AltitudeConstraint(
11                      min=telescope.min_altitude_constraint*u.deg, max=telescope.max_altitude_constraint*u
12                      .deg), MoonSeparationConstraint(min=moon_separation*u.deg)]
13     targets = tiles['coord']
14     observability = is_event_observable(constraints, observer, targets, times)
15     # 过滤出符合条件的Tile
16     keep = numpy.any(observability, axis=1)
17     return tiles[keep]

```

3.2.2 视场优先原则与连续拼接原则

在分配过程中, 遵循以下核心原则:

(1) **视场优先原则**: 依据望远镜视场大小进行排序, 优先赋予视场大的望远镜观测任务, 以充分发挥其大面积覆盖能力, 快速填充并覆盖引力波误差天区。

(2) **连续拼接原则**: 在分配过程中, 确保相邻望远镜观测区域边界观测区域有部分重叠区域, 避免产生遗漏区域, 确保天区的完整、连续覆盖。在实际分配中, 设定一个合理的重叠率阈值 (例如 10%-30%), 确保相邻望远镜观测区域边界有足够的重叠区域。

3.2.3 算法实施步骤

(1) **视场排序与优先级确立**: 按照视场大小对所有参与观测的望远镜进行降序排列, 构建视场优先级序列, 视场越大, 优先级越高。

(2) **初步区域划分与分配**: 选取视场最大的望远镜, 从待分配的 Tile 开始分配观测目标。后续望远镜按照视场优先级顺序, 依次沿已分配的观测天区外围开始分配, 确保相邻望远镜视场边界有一定的重叠率, 以避免产生遗漏区域。

(3) **观测目标调度算法**: 在保持整体分配结构稳定性的同时, 根据上面计算出的 Tile 的优先级, 对观测顺序上做调整, 使得能够最大化地使用观测时间, 下一节将具体介绍观测目标调度算法实现。

(4) **观测规划的制定**: 根据最终确定的各望远镜观测目标和观测顺序, 系统根据实际观测时间段, 制定详细的观测规划, 包括观测目标坐标、观测时段和所需设备参数等具体信息, 供观测团队执行观测活动。

3.3 观测目标调度算法

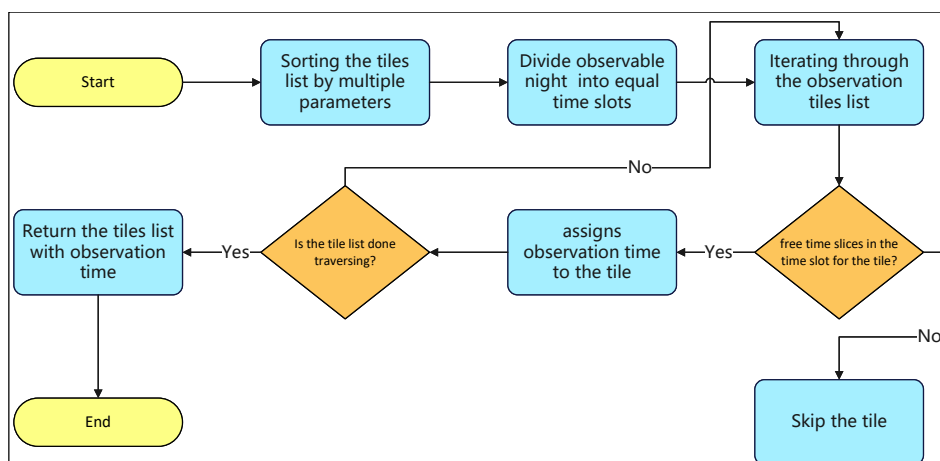


图 3-7 观测目标调度算法流程图

Figure 3-7 Observation Target Scheduling Algorithm

观测目标调度算法是在得到具体的观测目标坐标、可见时间窗口和观测优先级后, 针对望远镜进行时间分配的算法, 其核心目的是在有限的观测时间内尽可能多地满足科研需求。结合图3-7所示的步骤, 下面对本文采用的观测目标调度算法进行介绍。

3.3.1 目标排序策略

在考虑到观测目标的优先级、天体位置、数据质量和观测窗口后，本文依照下面的策略对观测目标进行排序：

(1) **优先级排序**：在上文中，观测目标 Tile 根据所在层级的不同设置了不同的优先级，因此首先需要按照优先级从高到低排序，尽早观测高优先级的目标。

(2) **目标升起时间排序**：将观测目标高度角为高于望远镜的最小观测高度角，方位角小于 180° 的时刻定义为观测目标的升起时间。在优先级相同的情况下，按照目标升起时间的早晚顺序安排观测计划。尽早开始观测可以充分利用观测目标的观测时段，减少因目标过早落下造成的观测上的损失。

(3) **赤经排序**：对于同一优先级并且升起时间接近的目标，进一步按照目标的赤经从小到大进行排序。按照赤经从小到大的顺序观测，有利于在随动模式下减少望远镜调整频率，从而降低定位和跟踪延迟。

3.3.2 时间资源分配方案

在完成了对观测目标的综合排序后，算法将进入时间资源的具体分配阶段。这一阶段的核心任务是将排序后的观测目标合理地融入到有限的观测时间段中，确保观测活动既满足优先级要求，又能最大限度地提高观测效率和数据质量。为此，本文采取了一种不考虑回转时间的理想化情况的分配方案，以达到在实际观测时保持观测目标的冗余度：

(1) **时间槽分配**：依据总观测时间和单个目标标准曝光时间计算出相应数量和长度的时间槽。

(2) **动态填充时间槽**：在排序后的观测目标列表中，从排序后的观测目标顶部 Tile 开始，根据其所需曝光次数，依次将其分配至在可见时间范围内的时间槽内，并将时间槽设置为已占用。若当前观测目标无法找到合适的空闲时间槽，算法将尝试调整已分配的低优先级目标，若仍无法解决，则记录该目标以待未来更适合的观测窗口。

(3) **优化余量时间**：若所有时间槽分配完毕后仍有剩余观测时间，算法将再次检查目标列表，优先对已部分分配但未达预期观测次数且优先级较高的目标进行补充观测。

3.4 本章小结

本章重点设计了一套面向望远镜网络的后随观测规划算法框架，包括观测目标选择、望远镜网络协同优化与观测目标调度三大核心模块。首先，Tiling 算法被应用于生成高效覆盖引力波源误差天区的 Tiles 网格，结合基于轮廓的层次选择算法选择和设定观测目标 tile 的优先级。相较于按照概率排序分配算法，该算法减少了 40.92% 的回转距离。在望远镜网络协同优化分配观测目标环节，通过视场优先与连续拼接原则，算法合理分配观测任务至不同望远镜，确保天区的完整覆盖和望远镜网络观测资源的高效利用。最后，观测目标调度算法结合优先

级、升起时间和赤经等因素进行综合排序，并运用时间槽分配方法优化观测时段安排。下一章中本文将介绍运行这套算法框架的观测规划运行系统以及该系统的观测规划运行情况。

第4章 引力波后随观测规划运行系统的实现与运行情况

基于前文章节中对引力波后随观测问题的深入分析与所构建的算法模型,在本章中,本文设计并实现了一套自动化观测规划运行系统,该系统是对 **GWOPS** 系统的升级,主要目标是实现了针对宽视场望远镜网络的引力波后随观测规划。

在 2023 年 5 月 24 日, LVC 团队开启了第四次观测运行 (O4), 这次观测周期持续至 2024 年 1 月 16 日, 完成了第一阶段 (O4a) 共计 237 天的观测工作, 期间共探测到 81 例具有高统计显著性的事件。该系统已经在 (O4a) 期间稳定运行, 持续监听引力波事件警报并及时作出观测规划。

该系统如图4-1所示, 主要由用户交互系统、观测规划与存档系统、数据接收存储系统和网络传输层四个模块构成。本章将重点介绍观测规划与存档系统, 以及数据接收与存储系统的技术细节, 包括引力波警报的获取与解析、观测规划的制定、发布与存档流程, 以及在 O4a 期间的实际运行效果。

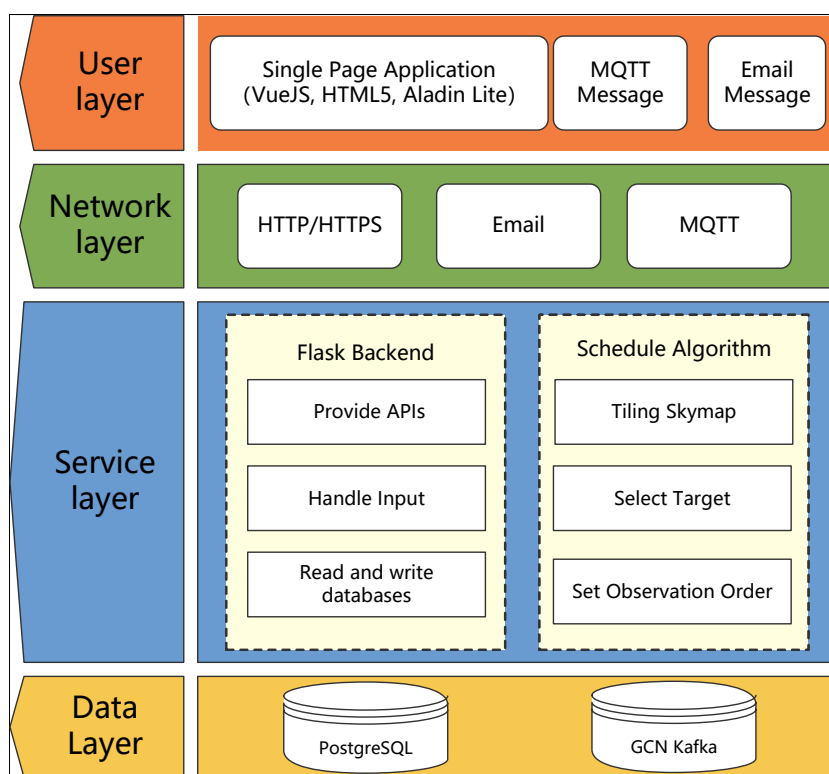


图 4-1 后随观测规划运行系统架构图

Figure 4-1 Architecture of Updated GWOPS

4.1 获取与解析引力波警报

在第一章中提到, GCN 是一个用于共享有关高能事件、多信使事件和暂现源事件警报的公共协作平台。LVC 团队在检测到引力波信号后, 通过 GCN 发布

引力波事件的警报，警报信息包含以下四种内容，一、引力波事件的名称，由区分测试事件和正式事件的前缀、日期和按照字母顺序递增的后缀组成；二、引力波事件的误报率，用于衡量信号来源于天体还是噪声；三、引力波事件的定位天区，由引力波源的坐标的后验概率分布组成，以 HEALPix 全天区图像的形式保存在 FITS 文件中；四、引力波源类型的参数估计，对于 CBC 事件，警报会给出引力波源类型的详细参数估计，包括上面提到的 BNS、NSBH、BBH 和来自地面噪声的概率。

GCN 通过 Apache Kafka¹²消息队列来发布消息，Kafka 是一个高吞吐量的分布式消息系统，采用发布-订阅模式传递消息，使用 Scala 语言开发。Kafka 架构分为 Broker, Topic, partition, Producer 和 Consumer。Producer 产生消息，向 Broker 的 Topic 发布；Consumer 订阅 Broker 的 Topic，主动从 Broker 中拉取消息进行消费，通过指定 offset 可以消费任意位置的消息。系统通过构建 Kafka Consumer，订阅了标识符为 ‘igwn.gwalert’ 的 Topic，实现了引力波警报的接收。

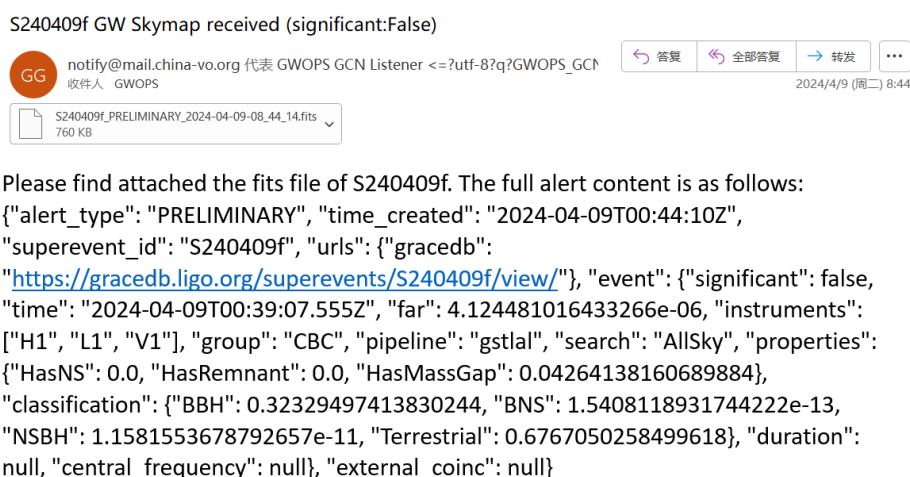


图 4-2 警报邮件示例图
 Figure 4-2 Alert Email Example

从 Kafka 消息队列接收到的引力波警报以 JSON¹³格式的文本呈现。解析这些文本后，本系统可以获得包含以上四种主要内容的结构化警报信息。特别的，定位误差天区文件采用 Base64 编码，将 FITS 格式的二进制数据转换为文本字符串以便于传输。为了获取原始的 FITS 文件，本系统需要应用 Base64 解码算法将这些字符串还原为二进制数据。随后，将解码后的 FITS 文件、引力波事件的名称、触发时间以及引力波源类型的参数估计等信息传递给观测规划系统，以制定针对特定望远镜和望远镜网络的观测计划。同时，系统还会将引力波事件警报发送至管理员的电子邮箱，并针对具有高统计显著性（‘significant’: true）的事件，向订阅用户发送邮件，及时通知他们进行后随观测。图4-2展示了系统发送的邮件正文示例，其中包含了引力波事件的相关信息和说明，并附有包含 HEALPix

¹²<https://kafka.apache.org/>

¹³<https://www.json.org/json-en.html>

全天图像格式的引力波定位误差天区数据的 FITS 文件。下面的例子是引力波事件 S231206cc 通过 Kafka 消息队列接收到的引力波警报具体内容：

```
1 {
2   "alert_type": "UPDATE",
3   "time_created": "2023-12-07T12:27:13Z",
4   "superevent_id": "S231206cc",
5   "urls": {
6     "gracedb":
7     ↪ "https://gracedb.ligo.org/superevents/S231206cc/view/"
8   },
9   "event": {
10    "significant": true,
11    "time": "2023-12-06T23:39:01.498Z",
12    "far": 1.931982867404817e-35,
13    "instruments": [
14      "H1",
15      "L1"
16    ],
17    "group": "CBC",
18    "pipeline": "gstlal",
19    "search": "AllSky",
20    "properties": {
21      "HasNS": 0.0,
22      "HasRemnant": 0.0,
23      "HasMassGap": 0.0
24    },
25    "classification": {
26      "BNS": 0.0,
27      "NSBH": 1.1609442144219883e-52,
28      "BBH": 1.0,
29      "Terrestrial": 0.0
30    },
31    "duration": null,
32    "central_frequency": null,
33    "skymap": "U0INUExFICA9ICAgICAg...."
34  },
35  "external_coinc": null
36 }
```

4.2 观测规划制定系统

在观测规划制定系统的总体框架内，包含了若干关键功能模块，图4-3展示引力波警报给出的数据进入观测规划制定系统后的数据的走向，各个模块承担着不同的任务，下面对各个模块进行介绍：

宿主星系筛选模块：此模块是 GWOPS 系统已具备的功能，其主要工作是根据引力波误差天区和星系星表，筛选出位于误差天区内的候选宿主星系，然后运用贝叶斯统计推断方法，结合引力波事件的距离概率分布、星系的光度距离等参数，为每个候选星系计算一个观测优先级，以便后续窄视场望远镜的观测规划的制定。

观测目标选择模块：该模块的核心作用是在引力波误差天区内，选择出一组观测目标，每个观测目标能够在一个曝光时间内完成观测。它首先采用了 Tiling 算法，将误差天区划分为 Tile 数组。然后通过基于轮廓的层次选择算法，选择出 Tile 数组的子集作为观测目标，同时计算出 Tile 的优先级，为下面的观测目标调度做准备。

观测目标分配模块：在此模块中，系统需要综合考虑各望远镜的地理位置、指向范围、视场大小等因素，分析并确定不同望远镜对已选观测目标的可见性情况。然后，根据这些信息以及望远镜网络的能力，合理分配每个观测目标至各个望远镜，以期实现整个望远镜网络资源的最优配置和协同观测效能的最大化。

观测目标调度模块：该模块负责对已分配到本望远镜的观测目标进行详细的观测顺序排定。通过对观测目标的优先级、可见时间、具体位置等信息，对观测顺序进行调整，然后根据实际的曝光时间和曝光次数，规划出预计的观测时间。

扩展模块：扩展模块是为了满足多元化的科研需求和应对未来可能出现的新挑战而设计的。这一模块允许其他观测团队或研究者接入他们自定义或开发的观测规划算法，从而使得观测规划制定系统具有高度的开放性和适应性。

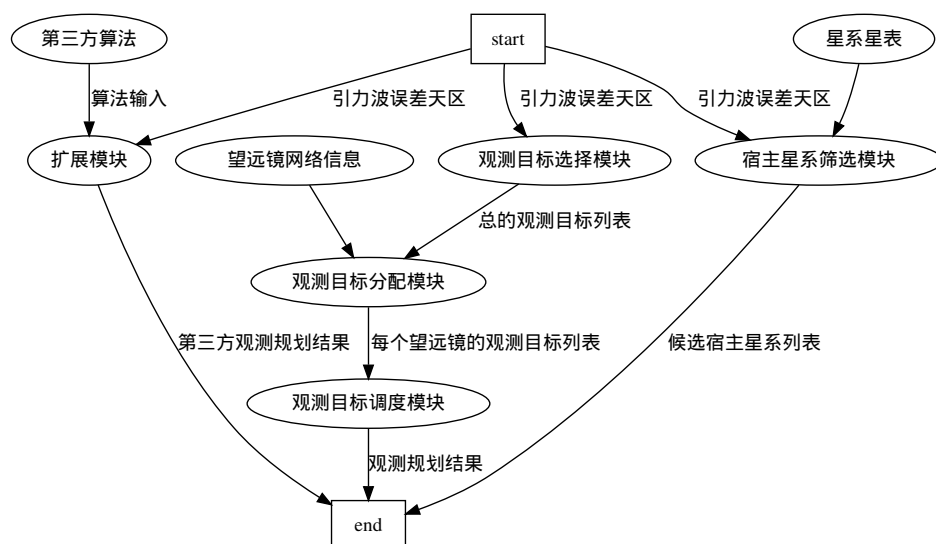


图 4-3 观测规划制定系统组成模块图

Figure 4-3 Modules of Observation Planning System

4.3 观测规划发布系统

观测规划发布系统包括两方面的内容：通过消息队列准实时发布系统和通过浏览器访问的观测规划存档在线发布平台，下面就对这两方面的内容进行详细的介绍。

4.3.1 消息队列发布系统

观测规划发布系统通过使用 RabbitMQ¹⁴消息代理软件和 MQTT¹⁵协议发布观测规划到观测团队，下面对 RabbitMQ 消息队列和 MQTT 协议进行简单的介绍。

RabbitMQ 是一个开源的消息代理软件，支持 MQTT 协议，服务端使用 Erlang¹⁶ 语言实现。MQTT 协议是一种轻量级的消息传输协议，RabbitMQ 通过其官方提供的 MQTT 插件实现对 MQTT 协议的支持。MQTT 采用发布/订阅模式进行通信，实现了消息发布者和消息订阅者的解耦，同时消息发布者和消息订阅者可以在运行时动态增加或删除，使得整个系统有很好的扩展性。MQTT 协议中的消息发布者和消息订阅者处于同等地位，一个消息发布者同时也可以是消息接收者，从而方便的实现了不同设备间的交互通信。

MQTT 协议采用发布/订阅模式，围绕主题展开通信，主题是区分不同来源消息的唯一标识符。主题通过分隔符“/”划分为不同的层级，每个分隔开的字符串子串都代表一个 Topic 层级。消息发布者在发布 MQTT 消息时，必须使用完整的主题，不能够携带通配符。消息接收者可以使用带有通配符的字符串进行订阅，这样可以一次性订阅多个主题。

¹⁴<https://www.rabbitmq.com/>

¹⁵<https://mqtt.org/>

¹⁶<https://www.erlang.org/>

MQTT 协议设置不同基本的 Qos 来确保消息的可靠性和有序性。Qos 分为三种不同的层级：Qos 0、Qos 1、Qos 2，不同层级决定了消息的可靠性和效率。下面分别对这三种 Qos 进行介绍：

Qos 0：最多发送一次。设置 Qos 0 的消息，一条 MQTT 消息能否成功发送，完全取决于网络链路质量的好坏，消息订阅者不会向发布者响应报文，消息发布者也不会重传报文。

Qos 1：至少发送一次。在 Qos 1 模式下，发布者能够确保消息至少有一次到达订阅者。如果消息因为网络链路的原因丢失，发布者会重传该消息，订阅者会接收到多个重复的消息。

Qos 2：只发送一次。Qos 2 模式是对 Qos 1 模式的进一步升级，在 Qos 2 模式下，消息报文既不会丢失，也不会被重复传输多次。Qos 2 通过复杂的四次握手的方式，确保了发布者确定了消息报文一定传输到了订阅者，在协议层面实现了消息去重。

Qos 0 模式不能保证消息报文能够发送成功，Qos 1 模式下订阅者可能接收到多次重复的消息报文，Qos 2 模式下既能确保消息不丢失，又能保证消息只发送一次。

在本文中使用 MQTT 协议发送消息时，选择设置 Qos 2 模式下进行消息报文的发送与接收。为了方便发送者和订阅者快速方便的解析消息报文，消息报文是由 JSON 字符串构成，对于观测规划文件，系统选择使用 base64 编码后发送，以便于在各种文本环境中传输和存储。观测团队可以通过 MQTT 客户端订阅对应的 Topic 来接收观测规划，然后通过 base64 解码算法得到实际的观测规划文件。

4.3.2 存档在线发布平台

存档在线发布平台是存储引力波警报、误差天区、候选宿主星系列表以及望远镜观测规划的网页应用系统。该平台使用 Flask Web¹⁷服务器框架，实现灵活且高效的后端逻辑处理；并结合 PostgreSQL¹⁸关系型数据库管理系统，确保了引力波警报等数据的安全存储与高效检索。前端使用 VueJS¹⁹渐进式 JavaScript 框架和 Aladin Lite(Boch 等, 2014) 构建的单页应用，实现了动态、响应式的用户界面和流畅的交互体验。整个系统采用前后端分离的架构设计，提高了开发效率及系统的可维护性。前端的内容将会在下一章详细介绍，下面主要介绍存档数据库的设计与查询服务的构建。

4.3.2.1 存档数据库

关系型数据库是一种基于关系模型的数据管理技术，它以表格形式组织数据，并通过预定义的关系和约束确保数据的一致性和完整性。在这样的系统中，

¹⁷<https://github.com/pallets/flask>

¹⁸<https://www.postgresql.org/>

¹⁹<https://vuejs.org>

实体及其属性被抽象为表格的行和列，而实体间的关联则通过表间的外键关联体现。

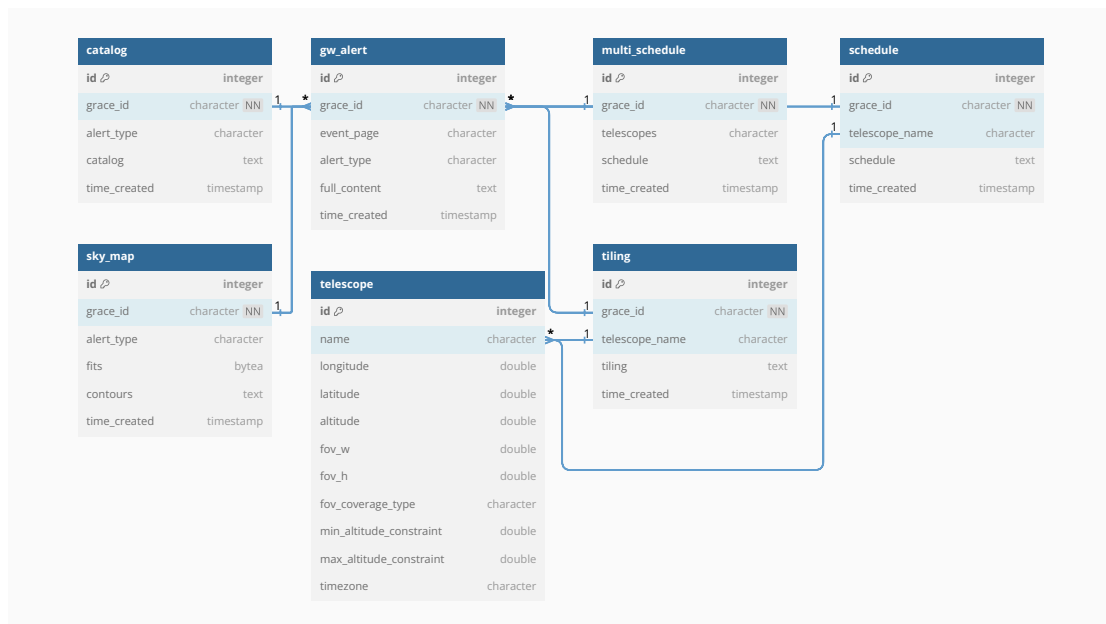


图 4-4 观测规划存档系统数据库结构

Figure 4-4 Database Structure of Updated GWOPS

本系统中，存档数据库的设计遵循了关系型数据库的原则，有效地组织和管理的引力波后随观测规划的相关数据。为了直观展示数据库内部的表结构及表间关联，本文绘制了数据库表关系图（图 4-4），它是对整个存档系统数据库逻辑设计的图形化表现。接下来本文将对各关系表的结构和功能进行具体描述：

GW_Alert 表：GW_Alert 表存储了引力波警报事件的基本详情，`grace_id` 是引力波警报的编号，也是作为与其他表关联的关键字段，不能为空。`event_page` 是引力波事件在 GraceDB²⁰ 上的页面链接，`alert_type` 是警报的类型，分为（Early Warning、Preliminary、Initial、Update、Retraction）五种，`full_content` 存储了完整的警报内容，`time_created` 记录了获取到警报的时间。

catalog 表：catalog 表存储计算得出的宿主星系列表。`grace_id` 列关联到 GW Alert 事件，其值不能为空。catalog 字段以字符串的形式存储了宿主星系列表。

sky_map 表：sky_map 表存放引力波误差天区的相关信息。`grace_id` 关联了相应的 GW Alert 事件，`fits` 字段存储 fits 格式的二进制 HEALPix 图像，`contours` 字段存储了按照累计概率计算出的覆盖天区范围。

telescope 表：telescope 表存储了所有可用望远镜的基本参数，其中 `name` 表示望远镜名称，地理位置信息由经度 (`longitude`)、纬度 (`latitude`) 和海拔 (`altitude`) 给出。视场大小 (`fov_w`, `fov_h`)、视场形状 (`fov_coverage_type`)、最小仰角限制 (`min_altitude_constraint`)、最大仰角限制 (`max_altitude_constraint`) 以及所在时区 (`timezone`) 也在此表中详细记录。

²⁰<https://gracedb.ligo.org/>

tiling 表：tiling 表记录了针对特定望远镜（通过 telescope_name 关联）和引力波事件（通过 grace_id 关联）得到的观测目标 Tiles 数组，tiling 字段以字符串的形式存储了具体的 Tiles 数组的天区坐标、覆盖累计概率等信息，time_created 记录了计算观测目标 Tiles 数组的时间戳。

schedule 表：schedule 表记录针对特定望远镜（通过 telescope_name 关联）和引力波事件（通过 grace_id 关联）得到的观测规划，schedule 字段存储了具体的观测规划，包括观测目标坐标、优先级、可见时间范围、规划观测时间和观测曝光时间与曝光次数等信息，time_created 记录了生成观测规划的时间戳。

multi_schedule：multi_schedule 表记录了针对引力波事件（通过 grace_id 关联）望远镜网络的协同观测规划，telescopes 存储了协同观测的望远镜集合，schedule 使用数组存储了每个望远镜的观测规划信息，time_created 记录了生成观测规划的时间戳。

4.3.2.2 存档查询服务

存档查询服务是使用 Flask Web 框架作为基础架构，设计并实现了高效且易于管理的后端系统，用于检索和查询与引力波后随观测规划相关数据。存档查询服务提供高效、便捷的在线检索功能，下面表4-1详细列出的主要 API 接口的设计与功能。

表 4-1 存档查询服务 API 表
Table 4-1 Query Service API Table

API 接口	功能描述
/api/gwList	获取数据库中进行观测规划的引力波事件列表
/api/gwInfo/<GW_ID>	获取给定引力波事件名称的详细警报信息
/api/telList	获取数据库参与观测规划的望远镜列表
/api/telInfo/<Tel_ID>	获取给定望远镜名称的详细信息
/api/skymapContour/<GW_ID>	获取给定引力波事件的覆盖天区范围
api/galaxyCatalog/<GW_ID>	获取给定引力波事件的宿主星系列表
/api/schedule/<GW_ID><Tel_ID>	获取给定望远镜对于给定引力波事件的观测规划
/api/tiling/<GW_ID><Tel_ID>	获取给定望远镜对给定引力波事件的 Tiles 数组
/api/multiSchedule/<GW_ID>	获取望远镜网络对给定引力波事件的协同观测规划

4.4 系统运行情况

在 O4a 观测运行期间，本系统部署在国家天文科学数据中心提供的云虚拟机，配置如下：

- CPU：Intel(R) Xeon(R) Platinum 8369B CPU @ 2.70GHz

- 内存：64 GB
- 硬盘：492 GB
- 操作系统：Ubuntu 22.04.1 LTS，内核版本：5.15.0-46-generic
- 编程语言：Python 3.10.12
- 数据库：PostgreSQL 9.6.22

系统在 O4a 观测运行期间，为多台分布在国内各地、具备不同视场大小的望远镜（如表4-2所示）生成引力波后随观测规划方案，并及时将观测规划发送到对应的观测团队。同时，通过扩展模块为 EP-WXT 探路者 LEIA 卫星 (Zhang 等, 2022) 运行团队提供的引力波后随观测算法，并将观测规划结果发送到卫星科学运行维护团队。

表 4-2 服务望远镜网络配置表

Table 4-2 Telescope Network Configuration Table

望远镜名称	地理位置(经度, 纬度)	海拔高度(米)	视场尺寸(°)	观测方式
XL_30	117.5775°E, 40.3958°N	900	2° × 1.35°	Tiling
XL_100	117.5775°E, 40.3958°N	900	1° × 0.7°	Tiling
HMT	87.1777°E, 43.4708°N	2080	1° × 0.66°	Tiling
GOT	88.5772°E, 43.5224°N	1795	1.2° × 0.8°	Tiling
XAONS_100	87.17E43.47N	2037	1.125° × 1.125°	Tiling
XAONS_120	87.17E43.47N	2030	0.12° × 0.12°	Galaxy
Weihai_60	122.0509E37.5358N	110	0.5° × 0.5°	Galaxy
Weihai_100	122.0509E37.5358N	110	0.2° × 0.2°	Galaxy
Mstg_50	74.8967E38.3297N	4526	0.072° × 0.072°	Galaxy
EP	空间卫星		3600 deg ²	Tiling and Galaxy
LEIA	空间卫星		18.6° × 18.6°	Tiling

4.4.1 观测规划情况

在 O4a 观测运行期间，系统总共接收到 1790 次引力波事件警报，去除相同引力波事件发送的不同类型的引力波警报后，接收到 1698 个候选的引力波事件警报，其中包含 80 例具有高统计显著性的事件。系统接收到警报后立刻对望远镜网络中所有望远镜进行引力波后随观测规划，初始观测时间是接收引力波警报后 24 小时内的可观测时间，生成观测规划后发送到观测团队。下面以引力波事件 S231206cc²¹为例，S231206cc 事件累计概率 90% 的误差天区的大小是 342deg²，推断出的源距离是 1467 ± 264 Mpc，下面是详细介绍得到观测规划情况。

²¹<https://gracedb.ligo.org/superevents/S231206cc/view/>

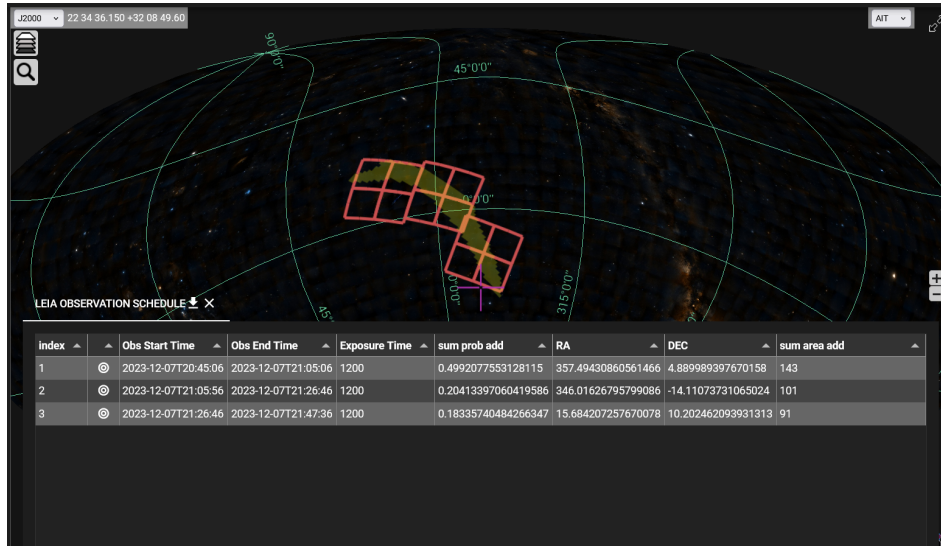


图 4-5 LEIA 观测规划示例图

Figure 4-5 The Example of LEIA Observation Plann

系统在 UTC 时间“2023-12-07T12:27:13Z”接收到引力波事件 S231206cc 类型为 UPDATE 的警报，并开始运行观测规划算法；在 UTC 时间“2023-12-07T12:28:26Z”完成对 EP-WXT 探路者 LEIA 卫星的后随观测规划，图4-5为观测规划结果；在 UTC 时间“2023-12-07T12:28:49Z”计算得到候选宿主星系列表；在 UTC 时间“2023-12-07T12:34:05Z”至“2023-12-07T12:48:02Z”依次完成了对表4-2中的望远镜的后随观测规划。以兴隆 mini 司天 30cm 望远镜 (XL_30) 望远镜为例，表4-3展示了系统对该望远镜对 S231206cc 后随观测规划部分结果，附录中包含了完整的观测规划结果。

表 4-3 XL_30 观测规划结果

Table 4-3 XL_30 Observation Planning Results

ID	规划观测时间	曝光时间	曝光次数	目标升起时间	目标落下时间	累计覆盖概率	天球坐标
7963	2023-12-07T12:28:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T15:01:34.990	0.017939109664580028	[355.954896, 1.8]
8144	2023-12-07T12:33:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T15:13:21.243	0.01749508504485927	[357.169737, 3.15]
6881	2023-12-07T12:38:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T14:02:43.724	0.013191471103168713	[349.612467, -6.3]
8682	2023-12-07T12:43:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T15:36:53.750	0.009384289650498088	[359.141963, 7.2]
9040	2023-12-07T12:48:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T16:12:12.510	0.017385562923939363	[4.64, 11.25]
8860	2023-12-07T12:53:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T15:48:40.003	0.01599616631082765	[359.997785, 8.55]
7783	2023-12-07T12:58:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T14:49:48.737	0.01804312730590954	[354.743386, 0.45]
8504	2023-12-07T13:03:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T15:36:53.750	0.018612380831433614	[0.312485, 7.2]

针对 LVC 所提供的引力波事件，本文对望远镜网络（采用 Tiling 观测方式的前四台望远镜）应用协同观测算法与不应用此算法的观测规划进行了比较。如图4-6所示，红色区域表示望远镜网络在应用协同观测算法后覆盖的天区面积，而蓝色区域则表示未使用该算法时的覆盖面积。通过应用协同观测算法，望远镜网络显著扩大了其观测覆盖范围，从而提升了捕捉到引力波电磁对应体的可能性。在最佳情况下，应用协同算法后的观测覆盖面积可达到未使用协同观测算法观测覆盖面积的两倍以上；而在最不利情况下，由于不同望远镜的可见天区的不

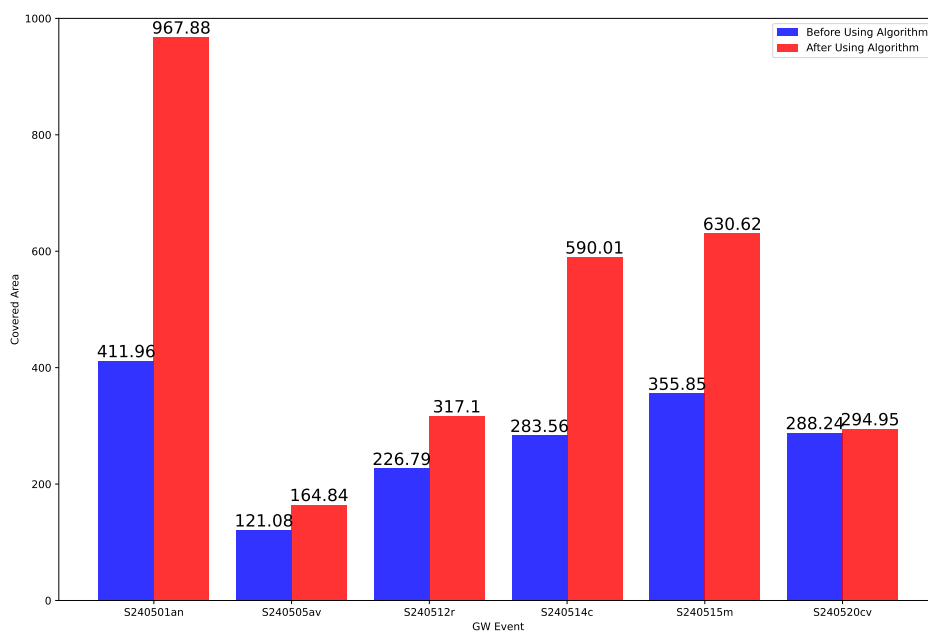


图 4-6 观测覆盖天区面积对比图

Figure 4-6 The Comparison of Observational Coverage Areas

同导致观测天区重叠区域较小，使得未使用协同观测算法的观测覆盖面积与应用协同观测算法的观测覆盖面积相当。

4.4.2 实际观测情况

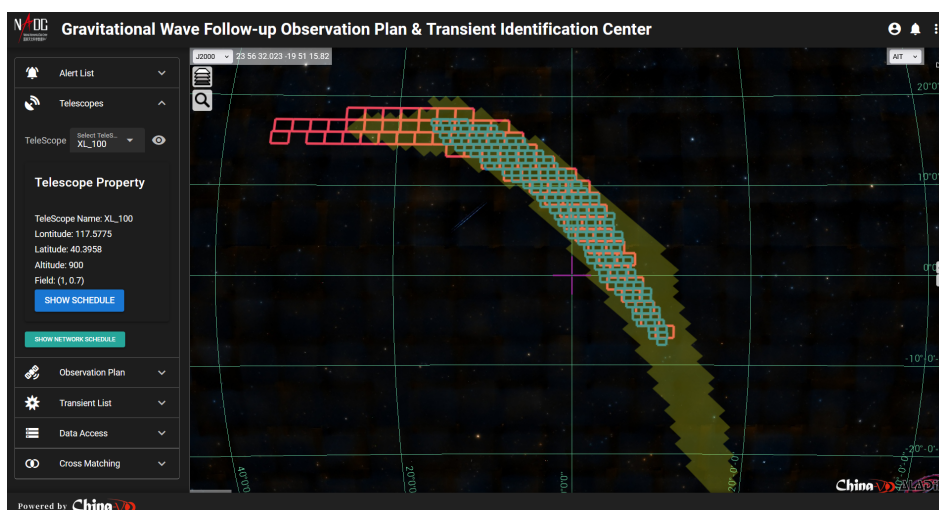


图 4-7 无协同观测覆盖区域图

Figure 4-7 Map of Independent Observation Coverage Area

图4-7与图4-8分别展示了XL_30和XL_100望远镜后随观测引力波事件SS231206cc，无协同后随观测覆盖的天区和使用本文构建的后随观测系统后协同后随观测覆盖的天区。在图中，黄色方格代表了XL_30望远镜观测覆盖的天区，绿色方格代表了XL_100望远镜观测覆盖的天区。可以明显看出，在无协同后随观测的情况

下,不同望远镜的观测天区大部分区域是重叠在一起的,对于引力波这种瞬态事件而言,这样造成了观测资源的浪费;在通过系统进行协同优化后,不同望远镜的观测天区之间重复观测的区域大大减少,从而有效利用了多望远镜观测能力。

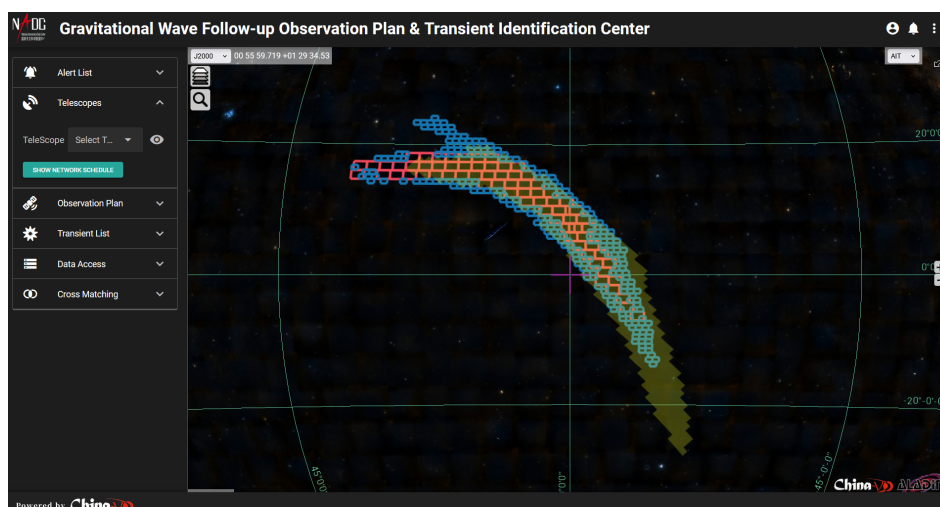


图 4-8 协同优化观测覆盖区域图

Figure 4-8 Map of Collaborative Optimized Observation Coverage Area

XL_30 和 XL_100 望远镜在 O4a 期间,使用系统提供的协同优化的观测方案,共对 33 次引力波事件(如表4-4所示)进行后随观测。由于观测的事件全部推断是双黑洞并合产生的引力波信息,且距离地球非常遥远,从目前的观测结果分析来看,未能观测到引力波的光学对应体。

表 4-4 XL_30 和 XL_100 引力波事件观测统计表

Table 4-4 XL_30 and XL_100 GW Event Observation Statistics Table

引力波事件	观测天数	观测日期	总观测天区数 (至少 1 次)
s230521k	10	2023-05-22	21
s230520ae	9	2023-06-01	21
s230522a	7	2023-06-01	20
s230522n	5	2023-06-01	3
s230524b	6	2023-06-04	23
s230524x	1	2023-06-07	1
s230529ay	5	2023-06-06	15
s230601bf	9	2023-06-02	33
s230605o	1	2023-06-06	8
s230606d	3	2023-06-06	26
s230608as	1	2023-06-13	2
s230609u	3	2023-06-12	15
s230615az	3	2023-06-16	2
s230619aa	2	2023-06-20	19
s230619bd	1	2023-06-21	17
s230621ap-f	1	2023-06-24	14
s230622ba	1	2023-06-29	1
s230627c	4	2023-06-27	25
s230630am	3	2023-06-30	13
s230702an	2	2023-07-04	12
s230704f	1	2023-07-05	7
s230911ae	1	2023-09-12	49
s230914ak	1	2023-09-14	66
s230919bj	1	2023-09-20	5
s230920al	1	2023-09-20	36
s230922g	1	2023-09-22	73
s230922q	2	2023-09-22	43
s230927l	2	2023-09-27	58
s230927be	1	2023-09-28	47
s230928cb	2	2023-09-29	52
s231008ap	1	2023-10-09	49
s231014r	1	2023-10-14	2
s231020ba	1	2023-10-20	43

4.5 本章小结

本章主要介绍了本文构建的引力波后随观测规划运行系统的主要模块与具体实现。系统通过 Apache Kafka 客户端实现了对引力波事件警报的接收与解析，并通过宿主星系筛选、观测目标选择、目标分配与调度子系统为不同望远镜生成面向引力波后随观测的观测规划。系统通过 RabbitMQ 消息代理软件使用 MQTT 协定将观测规划发送到观测团队，同时提供了一个在线存档平台可供查询存档的引力波以及对应的观测规划信息。在 O4a 期间，系统在云服务器上稳定运行，为多台望远镜提供后随观测规划服务。相较于每台望远镜各自独立进行后随观测，该系统通过优化协同分配策略，在相同观测时间内，望远镜网络协同观测覆盖天区的面积在最好情况下能够达到相互独立后随观测覆盖天区面积的二倍以上。观测团队对部分事件进行了实际后随观测，但遗憾的是未能观测到电磁对应体。在未来，本文将继续优化系统性能，并不断完善后随观测规划算法的准确性和实时性，以更好地应对未来的引力波后随观测挑战。

第 5 章 观测规划用户交互系统的实现与运行

在前文详述观测规划制定系统的理论和技术基础之后，本章聚焦于该系统与用户交互层面的设计与实现，特别是在天文数据可视化方面的创新。本章着重探讨如何借助先进可视化技术，尤其是通过集成 Aladin Lite 这一强大的 Web 天文数据可视化工具 (Boch 等, 2014)，将观测规划的复杂数据信息转化为用户友好的可视化界面，以提升系统易用性。本章探讨了 Aladin Lite 的关键功能模块以及如何制作定制化应用。之后，本章将介绍使用 Aladin Lite 实现引力波误差天区、候选宿主星系列表以及望远镜观测规划的可视化。最后，本章将讨论如何将用户交互系统部署在公网上，以便于用户进行操作和交互。

5.1 Aladin Lite 在天文数据可视化中的应用

随着现代天文学步入大数据时代，各类大型巡天项目产生的海量的天文数据，这既带来了科研领域的广阔机遇，也催生了对高效数据管理和可视化解决方案的迫切需求。层次渐进模式 (Hierarchical Progressive Surveys, HiPS) 是 CDS (Le Centre de Données astronomiques de Strasbourg) 提出并被天文学界广泛采纳、用于管理和发布大型巡天数据集的标准 (Fernique 等, 2015)。HiPS 基于 HEALPix 框架，实现了数据的分层、递进式可视化组织，通过将数据按层级划分和存储，解决了海量数据的快速加载和流畅显示问题。Aladin Lite 是由 CDS 开发的一款基于 WebGL 技术的轻量级天文数据可视化工具，可在现代网页浏览器上直接运行，无需额外安装插件。得益于其对 HiPS 标准的原生支持，Aladin Lite 能够方便快捷地加载和展现大规模天文数据集，提供包括但不限于全景星空浏览、多源数据叠加、坐标转换以及丰富的测量工具等功能。

鉴于上述特性以及其对 HiPS 标准的良好支持和 WebGL 技术带来的跨平台优势，考虑到开发效率、兼容性和用户友好性等因素，本文选择 Aladin Lite 作为观测规划用户交互系统中的可视化模块基础。结合 VueJS 构建的单页网页应用，单页应用是一种网络应用程序或网站的模型，它通过动态重写当前页面来与用户交互。用户交互系统能够实现快速、动态的数据交互，并通过内嵌的 Aladin Lite 模块，将复杂的引力波事件和望远镜观测规划信息以直观、生动的可视化形式呈现给用户，极大提升了用户体验。

5.2 Aladin Lite 核心概念和功能简介

为了进行基于 Aladin Lite 的二次开发，需要深入了解 Aladin Lite 的核心概念和提供的应用程序接口，并在此基础上构建观测规划可视化系统。图5-1 显示了 Aladin Lite 核心概念的组织结构，下面将对各个概念进行详细解释。

天球视图：Aladin Lite 提供了一个基于 Web 的动态天区图像浏览环境，能

够自动适应容器大小的变化，并依据选定的坐标框架及可选的投影模式来准确展示天球图像。

坐标与投影系统：Aladin Lite 内建坐标转换功能，支持多种坐标系统的切换，同时提供了多样化的投影技术选择，确保用户可以从不同视角查看天区视图。

交互元素与事件监听：天区视图界面内嵌了一系列交互式组件，如十字准线、坐标网格、投影控制面板、缩放控制按钮、全屏模式切换键、图层管理工具以及用于快速定位的 GOTO 按钮等。同时，通过内置的事件监听机制，开发者能够捕获并处理用户交互行为，如鼠标悬停事件显示源信息、点击事件触发特定操作。通过注册回调函数，开发者可以自定义事件响应逻辑，例如，当用户点击天区视图中的某个天体时，可以弹出一个包含该天体详细信息的窗口，从而提升用户与天文数据交互的直观性和便捷性。

图像图层：天区视图上能够加载和显示基于 HiPS 数据集的来自各种图像调查项目的背景图像，如 DSS2 彩色图像。这些图像图层为用户提供丰富且高质量的天区背景信息。

覆盖图层：覆盖图层在天区视图之上叠加多种形式的表现，如星表目录中的天体位置以自定义形状进行可视化，同时支持 HTML Canvas 元素或图像作为特殊标记。此外，还支持高级功能如多边形、折线等复杂几何形状，以及使用 MOC 规范描述的天区覆盖范围。

目录图层：针对星表数据提供的目录图层，能够读取和展示来自不同数据源（VOTable、HiPS Cat）的星表信息，并且允许对显示的天文物体进行个性化设定，如标签列的选择、标签颜色和字体样式、点击事件响应（显示数据表格、弹出窗口等）以及源数量的限制。

几何图层：几何图层通常指的是用户自定义的天体位置和形状，这在某些案例中可能特指那些不是直接来源于目录数据但根据研究需求手动创建和添加到视图中的几何元素。

MOC 图层：MOC (Multi-Order Coverage) 是一种描述天区覆盖范围的编码方式 (Fernique 等, 2022)。MOC 图层是用于表示和可视化天区覆盖范围的一种高效方式，尤其适用于大型观测项目、巡天区域或特定兴趣区域。通过 MOC 图层，用户可以清晰地看到观测计划的覆盖区域。结合如星系目录、星表目录、背景图像层等其他数据层，用户能够对观测计划进行更全面的评估，从而进行进一步的人工优化。

Aladin Lite 提供了一个强大的基于 Web 的天文数据可视化工具，其核心概念包括天区视图、坐标与投影系统、交互元素与事件监听、图像图层、覆盖图层、目录图层、几何图层以及 MOC 图层。通过这些功能，用户可以灵活地加载、展示和分析天文数据，从而支持各种观测计划和科学研究。本文也基于以上的优势，通过对 Aladin Lite 二次开发，实现了对引力波误差天区、候选宿主星系列表和望远镜观测规划的可视化。

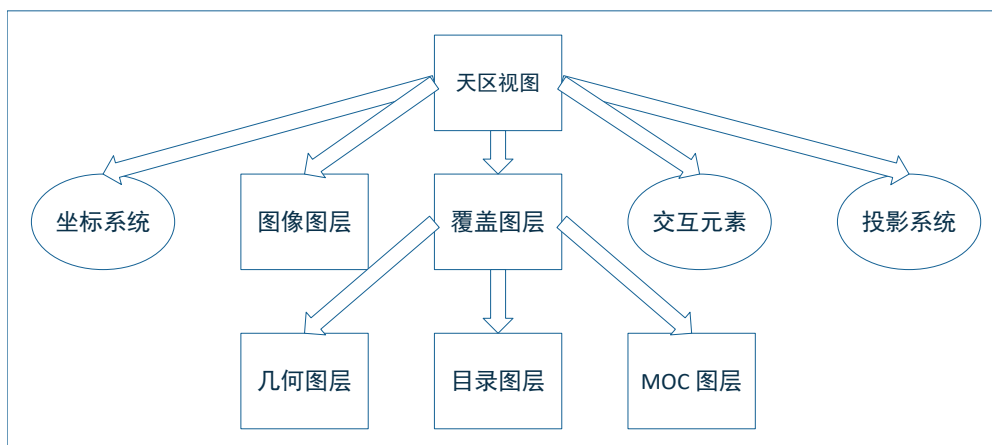


图 5-1 Aladin Lite 核心概念

Figure 5-1 The concept of Aladin Lite.

5.3 引力波误差天区的可视化

引力波事件的误差天区以概率密度分布的形式表示，并使用 HEALPix 格式存储于 FITS 文件中。由于 HEALPix 网格上每个像素所记录的是对应区域作为引力波源头的概率值，而非可以直接用于图像可视化的边界或轮廓信息，因此要实现引力波误差天区的可视化，必须首先通过第三章提到的算法处理这些概率信息，计算出在不同累积概率阈值下的天区轮廓，进而计算出不同累积概率阈值下的 HEALPix 像素集合，然后使用 MOC 编码方案序列化为 JSON 字符串，以便于通过计算机网络进行传输。

MOC 编码是一种用于描述天区覆盖范围的编码方式。MOC 编码的基本数据结构单元是 HEALPix 像素，它唯一地定义了天球上的一个区域。每个 MOC 单元由两个 HEALPix 属性组成：HEALPix 层级和 HEALPix 像素索引。MOC 编码可以按照下面的语法序列化为 JSON 字符串：

```
{ "order" : [index, index, ...], "order" : [index, index..., ...] }
```

在观测规划用户交互系统实际应用中，本文按照 10% 的概率间隔，计算从 10% 至 90% 累积概率对应的 HEALPix 像素集合并用 MOC 编码进行序列化为 JSON 字符串。随后在 Aladin Lite 通过 MOC 图层进行加载显示，依据不同的累积概率赋予不同颜色层次，直观展示出引力波事件源的位置的天区分布及其不确定性范围。

如图 5-2 所示，图中演示了引力波事件 S231206cc 的误差天区在不同累积概率下的轮廓可视化结果，色彩的变化反映了概率的变化。用户可以通过访问 GWOPS²² 查看更多引力波事件的类似可视化结果。

²²<https://nadc.china-vo.org/gwops/>

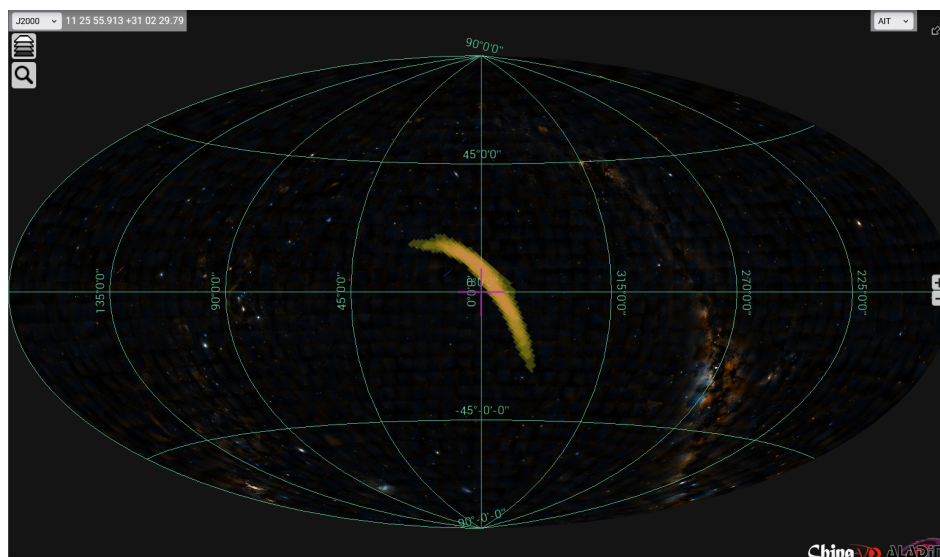


图 5-2 引力波事件 S231206cc 不同累计概率轮廓的可视化结果

Figure 5-2 S231206cc GW event visualized with various probability contours.

5.4 候选宿主星系列表的可视化

在上一章中运行系统通过星系星表和引力波误差天区匹配并使用贝叶斯推断框架计算各星系的观测优先级得到的引力波源的候选宿主星系列表。用户交互系统以 Aladin Lite 的目录图层形式展现出候选宿主星系的位置分布。如图 5-3 所示, 下方表格按照优先级列出了引力波事件 S231206cc 在误差天区内的按照优先级排序前 500 的候选宿主星系列表, 上方 Aladin Lite 的目录图层以绿色方块展示了候选宿主星系位置上的分布。点击候选宿主星系列表条目可以将 Aladin Lite 天区视图的中心点定位到星系对应的坐标, 在天图上点击星系可以直接显示星系的性质。点击列表上方的下载按钮可将按照优先级排序前 500 的候选宿主星系列表下载到本地。

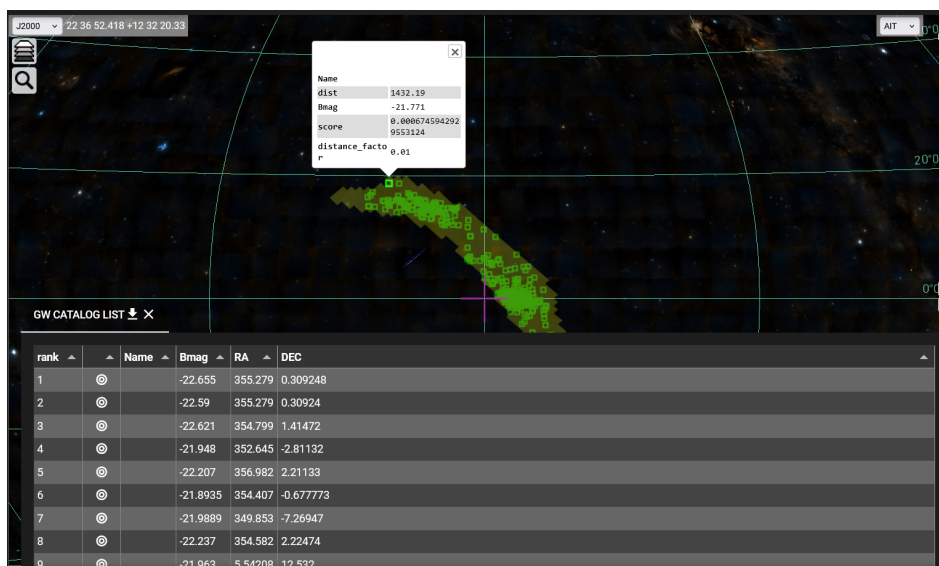


图 5-3 引力波事件 S231206cc 候选宿主星系列表可视化结果

Figure 5-3 The visualization of the candidate host galaxy for the GW event S231206cc.

5.5 望远镜观测规划的可视化

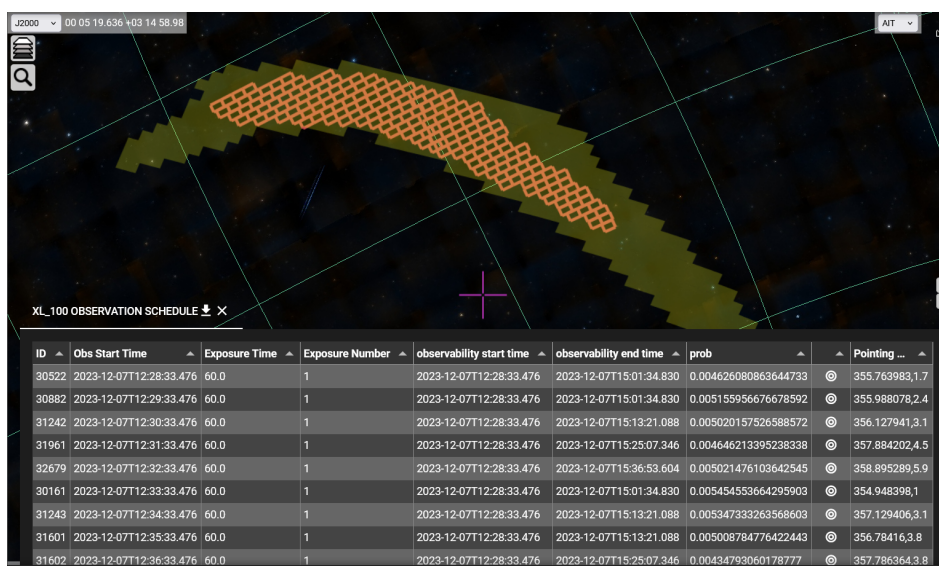


图 5-4 引力波事件 S231206cc XL_100 望远镜观测规划结果

Figure 5-4 Observation planning for the GW event S231206cc with XL_100 telescope.

望远镜观测规划结果包含两个主要部分：每个望远镜观测的 Tile 数组和每个 Tile 观测的顺序、坐标以及其他属性。在前面的章节中，单个 Tile 的四个顶点的坐标和 Tile 覆盖的 HEALPix 像素都已经计算得出，在用户交互系统中，使用 Aladin Lite 构建几何图层，通过遍历 Tile 数组绘制每一个 Tile。如图5-4所示，图中展示了后随观测规划运行系统对望远镜XL 100针对引力波事件 S231206cc 作出的观测规划。下方表格按照优先级列出了 Tile 的 ID、坐标、可见时间范围、规划观测时间和覆盖的累计概率，上方展示了 Tile 的在引力波误差天区上的位置

分布。同样的，点击表格条目可以将 Aladin Lite 天区视图的中心点定位到 Tile 中心点对应的坐标，在天图上点击 Tile 可以将表格滑动至对应的条目。图5-5展示了望远镜网络联合观测对引力波事件 S231206cc 作出的观测规划结果，不同颜色代表了不同望远镜的观测规划，下方不同的表格列出了不同望远镜的 Tile 的 ID、坐标等属性，在天图上点击 Tile 可以切换到对应表格的对应的条目位置。

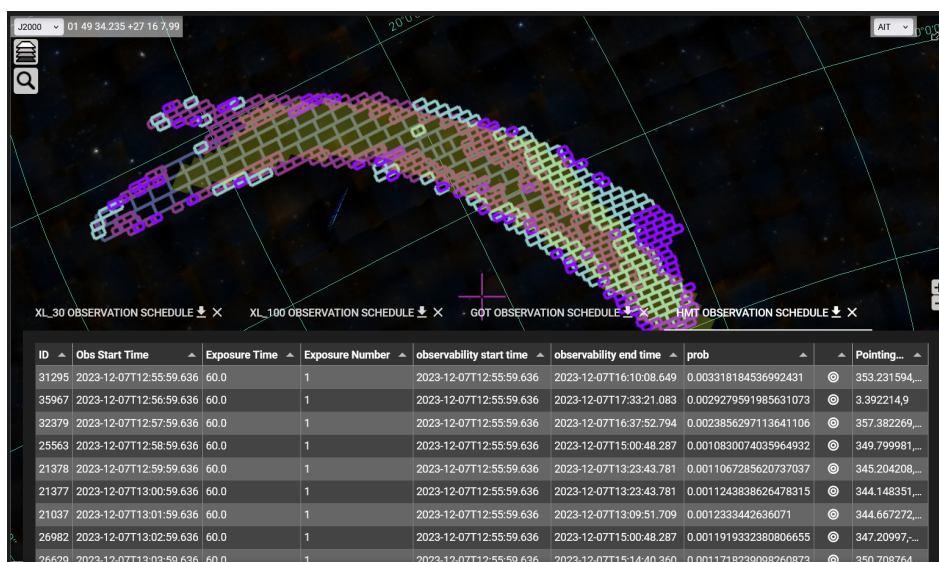


图 5-5 引力波事件 S231206cc 望远镜网络观测规划结果

Figure 5-5 Observation planning for the GW event S231206cc for The Telescope Network.

5.6 系统部署与运行

在观测规划用户交互系统的部署过程中，本文涉及了容器化部署的具体实践、负载均衡与代理服务的有效整合，以及前端资源优化打包等多个重要层面的具体技术，下面就这些技术方案进行介绍。

观测规划用户交互系统总体采用 Docker²³ 技术作为系统部署的基础架构层，实现了对应用软件生命周期的标准化与自动化管理。Docker 的容器化模型不仅抽象出了操作系统级的虚拟化环境，确保了应用的独立运行与环境一致性，还通过分层的镜像构建机制，显著提升了资源利用率和部署效率。通过创建 Docker 镜像，将应用与依赖环境打包到容器化环境内。在部署时，基于镜像启动 Docker 容器，确保了环境一致性，从而简化了运维工作。因为每个容器都是独立且可移植的单元，可以在任何支持 Docker 的宿主机上运行，从而确保无论是在开发、测试还是生产环境中，应用程序都能以一致的方式运行。

在系统架构中，Nginx²⁴作为一种高性能的 HTTP 和反向代理服务器，承担着关键的流量管理和反向代理任务。在部署过程中，Nginx 服务器配置对外公开，并负责接收来自互联网的 HTTP(S) 请求，然后根据配置规则将请求转发给观测

²³<https://www.docker.com/>

²⁴<https://www.nginx.com>

规划用户交互系统服务以及反向代理到其他后端服务，从而实现了灵活的路由策略、提高响应速度、实现静态资源缓存，并增强系统的扩展性和容错能力。

在现代 Web 应用开发模式下，编写的前端代码通常会进行编译工作，编译后生成便于传输和加载的小体积、高效的 JavaScript²⁵和 CSS²⁶资源。编译后的静态资源可以托管在 Nginx 服务器上，使得用户能够快速获取并执行这些前端代码。

在实际部署流程中，首先会对前端应用进行构建和优化，得到最小化、按需加载的静态资源包；然后，将后端服务封装进 Docker 容器内；最后，通过配置 Nginx 代理规则和服务发现机制，确保所有组件协同工作，并将系统安全地暴露在公网环境供用户访问。用户目前可以通过<https://nadc.china-vo.org/gwops/>访问和体验观测规划用户交互系统。

5.7 本章小结

本章专注于观测规划用户交互系统的实现与运行，采用 Aladin Lite 作为可视化核心技术，构建了一套可在公网访问的单页网页应用。系统利用 Aladin Lite 的动态天图视图、天球坐标转换、丰富的交互元素和可视化方法，对后随观测得到的不同数据进行了可视化输出。针对引力波误差天区，系统处理 HEALPix 格式的概率密度数据，通过 MOC 编码实现轮廓可视化，展现不同概率阈值下引力波源可能的位置分布。对于候选宿主星系列表，利用目录图层以直观方式表达星系在天球上的分布，支持用户查询和导航。在望远镜观测规划上，系统通过几何图层可视化单个和多个望远镜的观测计划，将观测时间、坐标等信息与空间布局相结合，便于用户查看和操作。最后，本章还介绍了当前主流的软件系统和运行环境的部署方案——容器化部署。通过容器化技术，本文对软件及其运行环境进行了封装，极大地简化了运行和维护的复杂性，减轻了维护人员的心智负担。

²⁵<https://en.wikipedia.org/wiki/JavaScript>

²⁶<https://en.wikipedia.org/wiki/CSS>

第6章 总结与展望

引力波作为一种区别于传统电磁波的信息载体，为人类打开了认识宇宙的新的一扇窗。LVC 第四次观测运行正在进行，以期望再一次成功实现对引力波进行多信使、多波段联合观测。引力波较大的误差天区和电磁对应体短暂的时间窗口，对望远镜后随观测电磁对应体带来了巨大的挑战。本文针对宽视场望远镜网络协同后随观测引力波电磁对应体，提出了多种优化策略，并构建了一套自动运行的引力波后随观测规划运行系统。本文研究成果主要包括以下几个方面：

针对如何从引力波误差天区中选择出观测目标并设定观测优先级，本文提出了一种新的选择目标并设置优先级的方法，该方法基于引力波误差天区的轮廓，并按照轮廓从内到外设定从高到低的优先级。相较于直接将观测目标覆盖的累计概率作为优先级，相比于直接按照优先级顺序观测，该方法平均减少了40.92% 回转距离，从而增加了实际可用于观测的时间。

为了提高望远镜网络联合观测整体的观测效率，本文采取了基于视场大小分配观测目标的方法，先分配给大视场望远镜以充分发挥其大面积覆盖能力；同时考虑观测目标之间的重叠率，使不同望远镜的观测目标之间既不存在未观测的区域，又不出现全部观测目标重叠在一起。通过这种策略，一个由4台望远镜组成的网络在相同的观测时间内，其覆盖的天区面积和累计观测概率均可以超过单台望远镜独立观测的4倍以上。

此外，本文所构建的引力波后随观测规划运行系统已实现了自动化运行，能够实时接收引力波事件警报，并利用内置的观测规划算法生成观测计划。同时，系统具备集成第三方算法的能力，能够为不同类型的望远镜执行定制化的后随观测策略。该系统还配备了 Web 界面，以可视化形式展示引力波误差天区及观测规划结果，并在 O4a 运行阶段中表现稳定，成功为多台望远镜提供了高效服务。

在下一阶段的工作中，本文所提到的工作仍有可以进一步优化与改进的空间：

- 扩展观测规划系统，使其能够实时监控各个望远镜的运行状态和观测条件。通过闭环反馈机制，系统将这些信息整合并反馈给观测规划算法，从而动态调整各个望远镜的优先级，并以此制定出联合观测计划。

- 目前观测规划系统的观测规划模块集中部署在单台服务器上，这不仅可能因服务器故障导致观测规划过程的中断，而且不利于高效利用计算资源。因此，可考虑将其重构为分布式计算节点架构，每个节点负责特定望远镜的观测规划算法，并配备一个智能调度系统，以便在某个节点发生故障时，能够迅速将计算任务转移到其他可用节点。

- 从算法设计源头着手，优化现有观测规划代码，采用如 CUDA²⁷等通用并

²⁷<https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>

行计算技术，以提升算法执行速度，缩短响应时间。

- 深化与国际间的合作，通过 GW Treasure Map²⁸(Wyatt 等, 2020) 平台实时获取全球其他观测团队针对引力波误差天区的实际观测情况，据此主动选择尚未被观测的区域进行观测，并及时上报自身的观测计划和进度。

本文作为中国虚拟天文台的研发成果之一，将与中国虚拟天文台提供的交叉证认、暂现源识别与分类等服务集成在一起，以实现从接收引力波警报到识别引力波电磁对应体的全流程在线服务。

²⁸<https://treasuremap.space>

参考文献

- 高鹤, 范锡龙, 吴雪峰, 等. 引力波爆发事件的电磁对应体的探测 [J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2018, 48(03): 39-47.
- 李曼迪, 葛亮, 姜晓军. 望远镜观测调度系统研究进展 [J]. 天文学进展, 2019, 37: 455-468.
- 罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽, 等. 天琴计划简介 [J/OL]. 中山大学学报 (自然科学版), 2021, 60(Z1): 1-19. DOI: [10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.12.23.2020B154](https://doi.org/10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.12.23.2020B154).
- 许允飞. 多波段、多信使天文数据高效融合关键技术研究与应用 [D]. 中国科学院国家天文台, 2021.
- 王运永, 朱兴江, 刘见, 等. 激光干涉仪引力波探测器 [J/OL]. Progress in Astronomy, 2014, 32: 348-382. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8349.2014.03.06](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8349.2014.03.06).
- 赵文, 张星, 刘小金, 等. 引力波与引力波源 [J]. 天文学进展, 2017, 35: 316-344.
- Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Binary Black Hole Mergers in the First Advanced LIGO Observing Run [J/OL]. Physical Review X, 2016, 6(4): 041015. DOI: [10.1103/PhysRevX.6.041015](https://doi.org/10.1103/PhysRevX.6.041015).
- Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral [J/OL]. Physical Review Letters, 2017, 119(16): 161101. DOI: [10.1103/PhysRevLett.119.161101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101).
- Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger [J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 2017, 848(2): L12. DOI: [10.3847/2041-8213/aa91c9](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9).
- Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Properties of the binary neutron star merger gw170817 [J/OL]. Phys. Rev. X, 2019, 9: 011001. DOI: [10.1103/PhysRevX.9.011001](https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.011001).
- Acernese F, Agathos M, Agatsuma K, et al. Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector [J/OL]. Classical and Quantum Gravity, 2015, 32(2): 024001. DOI: [10.1088/0264-9381/32/2/024001](https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/2/024001).
- Alard C, Lupton R H. A Method for Optimal Image Subtraction [J/OL]. The Astrophysical Journal, 1998, 503(1): 325-331. DOI: [10.1086/305984](https://doi.org/10.1086/305984).
- Almualla M, Coughlin M W, Anand S, et al. Dynamic scheduling: target of opportunity observations of gravitational wave events [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 495(4). DOI: [10.1093/mnras/staa1498](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1498).
- Amaro-Seoane P, Audley H, Babak S, et al. Laser Interferometer Space Antenna [J/OL]. arXiv e-prints, 2017: arXiv:1702.00786. DOI: [10.48550/arXiv.1702.00786](https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.00786).
- Andreoni I, Ackley K, Cooke J, et al. Follow Up of GW170817 and Its Electromagnetic Counterpart by Australian-Led Observing Programmes [J/OL]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2017, 34: e069. DOI: [10.1017/pasa.2017.65](https://doi.org/10.1017/pasa.2017.65).
- Barthelmy S D, Cline T L, Butterworth P, et al. GRB Coordinates Network (GCN): A status report [C/OL]//Kippen R M, Mallozzi R S, Fishman G J. American Institute of Physics Conference Series: volume 526 Gamma-ray Bursts, 5th Huntsville Symposium. 2000: 731-735. DOI: [10.1063/1.1361631](https://doi.org/10.1063/1.1361631).
- Bellm E C, Kulkarni S R, Graham M J, et al. The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results [J/OL]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2019, 131(995): 018002. DOI: [10.1088/1538-3873/aaecbe](https://doi.org/10.1088/1538-3873/aaecbe).

- Blanton M R, Lin H, Lupton R H, et al. An Efficient Targeting Strategy for Multiobject Spectrograph Surveys: the Sloan Digital Sky Survey “Tiling” Algorithm [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2003, 125(4): 2276-2286. DOI: [10.1086/344761](https://doi.org/10.1086/344761).
- Bloom J S, Richards J W, Nugent P E, et al. Automating Discovery and Classification of Transients and Variable Stars in the Synoptic Survey Era [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2012, 124(921): 1175. DOI: [10.1086/668468](https://doi.org/10.1086/668468).
- Boch T, Fernique P. Aladin Lite: Embed your Sky in the Browser [C]//Manset N, Forshay P. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: volume 485 Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIII*. 2014: 277.
- Campbell L, Saunders W, Colless M. The tiling algorithm for the 6dF Galaxy Survey [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, 350(4): 1467-1476. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07745.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07745.x).
- Chornock R, Berger E, Kasen D, et al. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/Virgo GW170817. IV. Detection of Near-infrared Signatures of r-process Nucleosynthesis with Gemini-South [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, 848(2): L19. DOI: [10.3847/2041-8213/aa905c](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa905c).
- Cook D O, Mazzarella J M, Helou G, et al. Completeness of the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) Local Volume Sample [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2023, 268 (1): 14. DOI: [10.3847/1538-4365/acdd06](https://doi.org/10.3847/1538-4365/acdd06).
- Coughlin M W, Tao D, Chan M L, et al. Optimizing searches for electromagnetic counterparts of gravitational wave triggers [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 478(1): 692-702. DOI: [10.1093/mnras/sty1066](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1066).
- Coughlin M W, Antier S, Corre D, et al. Optimizing multitelescope observations of gravitational-wave counterparts [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 489(4): 5775-5783. DOI: [10.1093/mnras/stz2485](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2485).
- Coughlin M W, Dietrich T, Heinzel J, et al. Standardizing kilonovae and their use as standard candles to measure the hubble constant [J/OL]. *Phys. Rev. Res.*, 2020, 2: 022006. DOI: [10.1103/PhysRevResearch.2.022006](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.022006).
- Dietrich T, Coughlin M W, Pang P T H, et al. Multimessenger constraints on the neutron-star equation of state and the Hubble constant [J/OL]. *Science*, 2020, 370(6523): 1450-1453. DOI: [10.1126/science.abb4317](https://doi.org/10.1126/science.abb4317).
- Ducoin J G, Corre D, Leroy N, et al. Optimizing gravitational waves follow-up using galaxies stellar mass [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 492(4): 4768-4779. DOI: [10.1093/mnras/staa114](https://doi.org/10.1093/mnras/staa114).
- Dálya G, Díaz R, Bouchet F R, et al. GLADE+ : an extended galaxy catalogue for multimessenger searches with advanced gravitational-wave detectors [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, 514(1): 1403-1411. DOI: [10.1093/mnras/stac1443](https://doi.org/10.1093/mnras/stac1443).
- Fan X, Messenger C, Heng I S. A Bayesian approach to multi-messenger astronomy: Identification of gravitational-wave host galaxies [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 795(1): 43. DOI: [10.1088/0004-637X/795/1/43](https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/43).
- Fernique P, Allen M G, Boch T, et al. Hierarchical progressive surveys. Multi-resolution HEALPix data structures for astronomical images, catalogues, and 3-dimensional data cubes [J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 578: A114. DOI: [10.1051/0004-6361/201526075](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526075).
- Fernique P, Nebot A, Durand D, et al. MOC: Multi-Order Coverage map Version 2.0 [Z]. 2022: 727.

- Gehrels N, Cannizzo J K, Kanner J, et al. GALAXY STRATEGY FOR LIGO-VIRGO GRAVITATIONAL WAVE COUNTERPART SEARCHES [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 820(2): 136. DOI: [10.3847/0004-637X/820/2/136](https://doi.org/10.3847/0004-637X/820/2/136).
- Ghosh S, Bloemen S, Nelemans G, et al. Tiling strategies for optical follow-up of gravitational-wave triggers by telescopes with a wide field of view [J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 592: A82. DOI: [10.1051/0004-6361/201527712](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527712).
- Ghosh S, Chatterjee D, Kaplan D L, et al. Hunting Electromagnetic Counterparts of Gravitational-wave Events Using the Zwicky Transient Facility [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2017, 129(981): 114503. DOI: [10.1088/1538-3873/aa884f](https://doi.org/10.1088/1538-3873/aa884f).
- Górski K M, Hivon E, Banday A J, et al. HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2005, 622(2): 759-771. DOI: [10.1086/427976](https://doi.org/10.1086/427976).
- Gupte N, Bartos I. Optimal gravitational-wave follow-up tiling strategies using a genetic algorithm [J/OL]. *Physical Review D*, 2020, 101(12): 123008. DOI: [10.1103/PhysRevD.101.123008](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.123008).
- Hobbs G, Archibald A, Arzoumanian Z, et al. The International Pulsar Timing Array project: using pulsars as a gravitational wave detector [J/OL]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(8): 084013. DOI: [10.1088/0264-9381/27/8/084013](https://doi.org/10.1088/0264-9381/27/8/084013).
- Hu Y D, Li X Y, Castro-Tirado A J, et al. THE BOOTES NETWORK IN THE GRAVITATIONAL WAVE ERA [J/OL]. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Serie de Conferencias*, 2021, 53: 75-82. DOI: [10.22201/ia.14052059p.2021.53.18](https://doi.org/10.22201/ia.14052059p.2021.53.18).
- Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system. [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1975, 195: L51-L53. DOI: [10.1086/181708](https://doi.org/10.1086/181708).
- Kagra Collaboration, Akutsu T, Ando M, et al. KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector [J/OL]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 35-40. DOI: [10.1038/s41550-018-0658-y](https://doi.org/10.1038/s41550-018-0658-y).
- Kovlakas K, Zezas A, Andrews J J, et al. The Heraklion Extragalactic Catalogue (HECATE): a value-added galaxy catalogue for multimessenger astrophysics [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 506(2): 1896-1915. DOI: [10.1093/mnras/stab1799](https://doi.org/10.1093/mnras/stab1799).
- Kramer M, Champion D J. The European Pulsar Timing Array and the Large European Array for Pulsars [J/OL]. *Classical and Quantum Gravity*, 2013, 30(22): 224009. DOI: [10.1088/0264-9381/30/22/224009](https://doi.org/10.1088/0264-9381/30/22/224009).
- Lee K J. Prospects of Gravitational Wave Detection Using Pulsar Timing Array for Chinese Future Telescopes [C]//Qain L, Li D. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: volume 502 Frontiers in Radio Astronomy and FAST Early Sciences Symposium 2015*. 2016: 19.
- Li G W, Zhao G. A network flow algorithm to position tiles for LAMOST [J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2009, 9(11): 1277-1284. DOI: [10.1088/1674-4527/9/11/010](https://doi.org/10.1088/1674-4527/9/11/010).
- Li H, Li S Y, Liu Y, et al. Probing Primordial Gravitational Waves: Ali CMB Polarization Telescope [J/OL]. *arXiv e-prints*, 2017: arXiv:1710.03047. DOI: [10.48550/arXiv.1710.03047](https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.03047).
- LIGO Scientific Collaboration, Aasi J, Abbott B P, et al. Advanced LIGO [J/OL]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, 32(7): 074001. DOI: [10.1088/0264-9381/32/7/074001](https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/7/074001).
- Manchester R N, Hobbs G, Bailes M, et al. The Parkes Pulsar Timing Array Project [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2013, 30: e017. DOI: [10.1017/pasa.2012.017](https://doi.org/10.1017/pasa.2012.017).
- McLaughlin M A. The North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves [J/OL]. *Classical and Quantum Gravity*, 2013, 30(22): 224008. DOI: [10.1088/0264-9381/30/22/224008](https://doi.org/10.1088/0264-9381/30/22/224008).
- Metzger B D, Martínez-Pinedo G, Darbha S, et al. Electromagnetic counterparts of compact object mergers powered by the radioactive decay of r-process nuclei [J/OL]. *Monthly Notices of the*

- Royal Astronomical Society, 2010, 406(4): 2650-2662. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.16864.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16864.x).
- Miles M T, Shannon R M, Bailes M, et al. The MeerKAT Pulsar Timing Array: first data release [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, 519(3): 3976-3991. DOI: [10.1093/mnras/stac3644](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3644).
- Morris B M, Tollerud E, Sipőcz B, et al. astroplan: An Open Source Observation Planning Package in Python [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(3): 128. DOI: [10.3847/1538-3881/aaa47e](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa47e).
- Nuttall L K, Sutton P J. Identifying the host galaxy of gravitational wave signals [J/OL]. *Physical Review D*, 2010, 82(10): 102002. DOI: [10.1103/PhysRevD.82.102002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.102002).
- Paul A, Susobhanan A, Gopakumar A, et al. The indian pulsar timing array (inpta) [C/OL]// 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC). 2019: 1-1. DOI: [10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738505](https://doi.org/10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738505).
- Pojmanski G. The All Sky Automated Survey. Catalog of Variable Stars. I. 0 h - 6 h Quarter of the Southern Hemisphere [J/OL]. *Acta Astronomica*, 2002, 52: 397-427. DOI: [10.48550/arXiv.astro-ph/0210283](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0210283).
- Radice D, Perego A, Zappa F, et al. GW170817: Joint Constraint on the Neutron Star Equation of State from Multimessenger Observations [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2018, 852(2): L29. DOI: [10.3847/2041-8213/aaa402](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa402).
- Rana J, Mooley K P. Galaxy-Targeting Approach Optimized for Finding the Radio Afterglows of Gravitational Wave Sources [M]. arXiv, 2019a.
- Rana J, Anand S, Bose S. Optimal Search Strategy for Finding Transients in Large-sky Error Regions under Realistic Constraints [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 876(2): 104. DOI: [10.3847/1538-4357/ab165a](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab165a).
- Ruan W H, Guo Z K, Cai R G, et al. Taiji Program: Gravitational-Wave Sources [J/OL]. arXiv e-prints, 2018: arXiv:1807.09495. DOI: [10.48550/arXiv.1807.09495](https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.09495).
- Schüssler F, Ashkar H, de Lavergne M d B, et al. tilepy: rapid tiling strategies in mid/small FoV observatories [C/OL]//Proceedings of 38th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2023). 2023: 1501. DOI: [10.22323/1.444.1501](https://doi.org/10.22323/1.444.1501).
- Singer L, Racusin J. General Coordinates Network (GCN): NASA's Next Generation Time-Domain and Multimessenger Astronomy Alert System [C]//American Astronomical Society Meeting Abstracts: volume 55 American Astronomical Society Meeting Abstracts. 2023: 108.02.
- Singer L P, Price L R. Rapid bayesian position reconstruction for gravitational-wave transients [J/OL]. *Phys. Rev. D*, 2016, 93: 024013. DOI: [10.1103/PhysRevD.93.024013](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.024013).
- Singer L P, Chen H Y, Holz D E, et al. GOING THE DISTANCE: MAPPING HOST GALAXIES OF LIGO AND VIRGO SOURCES IN THREE DIMENSIONS USING LOCAL COSMOGRAPHY AND TARGETED FOLLOW-UP [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, 829(1): L15. DOI: [10.3847/2041-8205/829/1/L15](https://doi.org/10.3847/2041-8205/829/1/L15).
- SUN YanRu L S H B, WANG RenJie. Cosmology application of the astrophysics originated gravitational wave [J/OL]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022, 52(8): 289504. DOI: <https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0365>.
- The LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Abadie J, Abbott B P, et al. Implementation and testing of the first prompt search for gravitational wave transients with electromagnetic counterparts [J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 539: A124. DOI: [10.1051/0004-6361/201118219](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118219).

- Weiss R. A study of a long baseline gravitational wave antenna system prepared for the National Science Foundation [M]. 1983.
- White D J, Daw E J, Dhillon V S. A list of galaxies for gravitational wave searches [J/OL]. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, 28(8): 085016. DOI: [10.1088/0264-9381/28/8/085016](https://doi.org/10.1088/0264-9381/28/8/085016).
- Williams R D, Seaman R. VOEvent: Information Infrastructure for Real-Time Astronomy [C]// Gabriel C, Arviset C, Ponz D, et al. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: volume 351 Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*. 2006: 637.
- Woosley S E, Eastman R G, Schmidt B P. Gamma-Ray Bursts and Type IC Supernova SN 1998BW [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 1999, 516(2): 788-796. DOI: [10.1086/307131](https://doi.org/10.1086/307131).
- Wyatt S D, Tohuvavohu A, Arcavi I, et al. The Gravitational Wave Treasure Map: A Tool to Coordinate, Visualize, and Assess the Electromagnetic Follow-up of Gravitational-wave Events [J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 894(2): 127. DOI: [10.3847/1538-4357/ab855e](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab855e).
- Xu H, Chen S, Guo Y, et al. Searching for the Nano-Hertz Stochastic Gravitational Wave Background with the Chinese Pulsar Timing Array Data Release I [J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, 23(7): 075024. DOI: [10.1088/1674-4527/acdfa5](https://doi.org/10.1088/1674-4527/acdfa5).
- Xu Y, Xu D, Cui C, et al. GWOPS: A VO-technology Driven Tool to Search for the Electromagnetic Counterpart of Gravitational Wave Event [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2020, 132(1016): 104501. DOI: [10.1088/1538-3873/aba69f](https://doi.org/10.1088/1538-3873/aba69f).
- Zhang B B, Zhang B, Sun H, et al. A peculiar low-luminosity short gamma-ray burst from a double neutron star merger progenitor [J/OL]. *Nature Communications*, 2018, 9: 447. DOI: [10.1038/s41467-018-02847-3](https://doi.org/10.1038/s41467-018-02847-3).
- Zhang C, Ling Z X, Sun X J, et al. First Wide Field-of-view X-Ray Observations by a Lobster-eye Focusing Telescope in Orbit [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, 941(1): L2. DOI: [10.3847/2041-8213/aca32f](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aca32f).

续表

ID	规划观测时间	曝光时间	曝光次数	目标升起时间	目标落下时间	累计覆盖概率	天球坐标
9923	2023-12-07T17:48:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T17:58:08.789	0.0007988434570662039	[25.078184, 18.0]
9753	2023-12-07T17:53:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T18:09:55.043	0.0007791700584206319	[29.17005, 16.65]
9580	2023-12-07T17:58:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T18:09:55.043	0.0006633060990945805	[29.453348, 15.3]
9754	2023-12-07T18:03:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T18:21:41.296	0.000621006333467042	[31.257573, 16.65]
9755	2023-12-07T18:08:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T18:21:41.296	0.00043138175253056607	[33.345097, 16.65]
9582	2023-12-07T18:13:33.697	300.0	1	2023-12-07T12:28:33.697	2023-12-07T18:21:41.296	0.0004308201531292075	[33.600327, 15.3]

致 谢

时光匆匆，如白驹过隙，转眼间三年的时光即将结束。在这个重要的时刻，我满怀感激地回望过去，心中充满了对那些给予我帮助和支持的人的深深谢意。

首先，我要感谢我的导师崔辰州研究员和许允飞副研究员。“大厦之下而诵诗书，无奔走之劳矣；有司业、博士为之师，未有问而不告、求而不得者也”²⁹。在整个硕士学习期间，崔老师和许老师提供了大量无私的指导与帮助。在科研方面，崔老师以扎实的理论基础、严谨的治学态度为我的研究内容指明了大方向。崔老师在学习和生活上给予了我巨大的支持，并且为我营造了优越的学习和科研环境。许老师以其和蔼可亲的性格和深厚的专业素养，深受学生敬仰。他不仅为我的研究工作指明了方向，提供了宝贵的思路和方法，还总是耐心细致地解答我在研究过程中遇到的每一个疑问。在论文的撰写过程中，崔老师和许老师在百忙之中多次为我提供指导，提出了许多宝贵的意见，使得我的论文得以顺利完成。

然后，我还要感谢国家天文台天文信息技术团组的其他各位老师，他们是樊东卫、韩军、何勃亮、李长华、李珊珊、米琳莹、陶一寒、王有芬、杨涵溪、杨丝丝。各位老师们在科研和生活上都给予了我很多关心和帮助，让我能够顺利度过硕士期间的科研生活。

接下来，我要向同组的张震、张琦乾、吴莹、杨嘉宁、邵务俊、左肖雄、朱珈莹、汤超、陈朗表达我的感激之情。在生活的点点滴滴中，这些亲爱的同学们向我伸出了援手，给予了我无尽的关心与帮助。在学术探索上，我们并肩前行，相互激励，共同追求卓越。

此外，我还需特别感谢国家天文台教育处的梁艳春老师、李响老师和马怀宇老师。他们以默默无闻的奉献精神，为我的研究工作提供了坚实的支持。他们的努力和付出，不仅为我解决了诸多实际问题，更为我营造了一个安心科研的良好环境。

最后，我要感谢我的家人，我的父母和姐姐，你们是最可靠、最坚强的后盾。在每一个学业阶段，都有你们默默的支持和无私的奉献。在我心中，家永远是最温暖的港湾，是力量的源泉，无论我遇到多大的挑战或困难，我都能在这里找到安慰和鼓励。

最后的最后，再次由衷地感谢所有帮助过我的老师、同学、工作人员，谢谢你们！

2024年6月

²⁹出自：宋濂 [明]《送东阳马生序》

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历：

2017年9月——2021年6月，在中国地质大学（武汉）计算机学院获得学士学位。

2021年9月——2024年6月，在中国科学院国家天文台攻读硕士学位。

申请或已获得的专利：

发明专利：马鹏辉，许允飞，张震，崔辰州；针对目标天区的望远镜网络协同观测规划系统；CN202311559490.4（已进入实审）

参加的研究项目及获奖情况：

参与中国科学院基础与交叉前沿科研先导专项(B类先导专项)《罕见致密天体爆发的天地一体化多波段协同观测与数据融合》

