

望远镜网络协同观测引力波事件的策略优化研究

硕士学位论文答辩

答辩人：马鹏辉

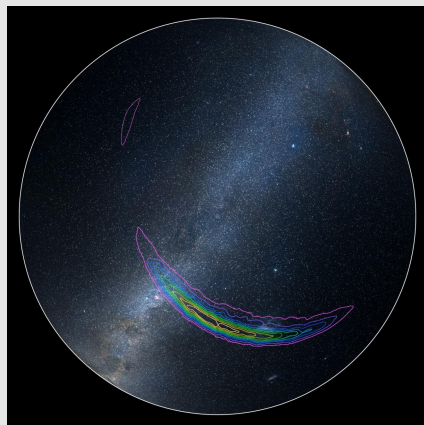
指导教师：崔辰州研究员 许允飞副研究员

天文信息技术研究团组

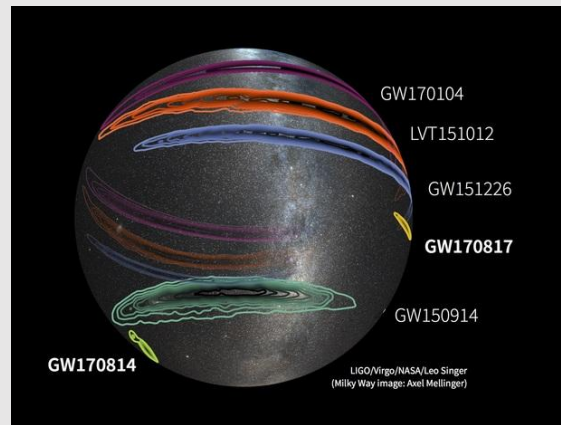


选题背景 及意义

- GW150914: 人类首次直接探测到的引力波事件;
- GW170817: 人类首次观测到引力波电磁对应体的引力波事件。



图源: <https://www.ligo.org/detections/GW150914.php>



图源: <https://www.ligo.caltech.edu/page/press-release-gw170817>



选题背景 及意义

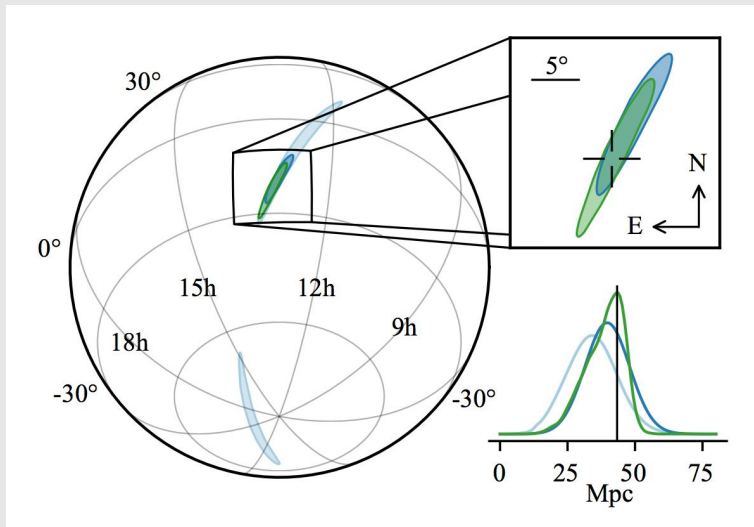
引力波电磁对应体探测的意义：

- 估计哈勃常数的新方法（Abbott 等, 2017, Palmese 等, 2024）；
- 中子星状态方程（David Radice 等, 2018）；
- 千新星模型的完善和发展（Coughlin 等, 2020）；
- 重元素的可能形成原因（Mansi 等, 2019）；
- 提高定位引力波源空间位置和距离的精度（Goldstein 等 2017）。



选题背景 及意义

GW170817位于距离地球 40 Mpc,
计算出的源定位天区是28平方度。



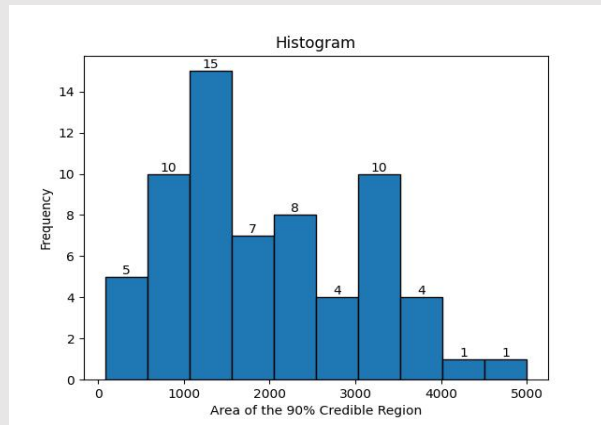
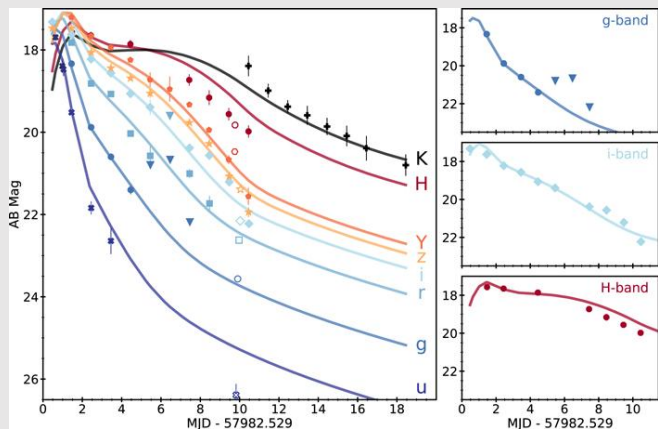
图源: <https://www.ligo.org/science/Publication-GW170817BNS/>



选题背景 及意义

在O4a期间探测到的高概率引力波事件的90%累计概率定位天区的最小值为82 平方度，最大值为29972 平方度，**中位数为2015 平方度**。

千新星的光度在合并后的**1到2天**内达到峰值。

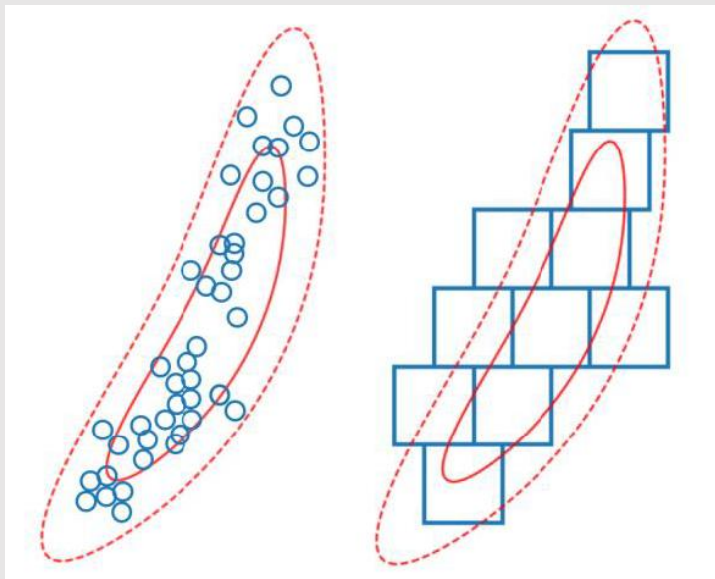


图源: Cowperthwaite, P. S., "The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/Virgo GW170817. II. UV, Optical, and Near-infrared Light Curves and Comparison to Kilonova Models",

引力波源**超大定位天区**和电磁对应体的**短暂观测窗口**，
需要采用**高效的后随观测策略**来制订观测计划

国内外 发展现状

- 宿主星系观测策略;
- Tiling 巡天覆盖观测策略;



国内外 发展现状

单个望远镜后随观测的劣势：

- 观测能力有限，一个观测夜能够观测的天区有限；
- 受到天气、地理位置限制，可能不能立刻投入到后随观测；

望远镜网络联合后随观测优势：

- 提高观测能力、覆盖更大的天区；
- 分布在世界各地的望远镜，能够连续后随观测，保证数据的完整性；

目前主要后随观测网络

GROWTH

GRANDMA

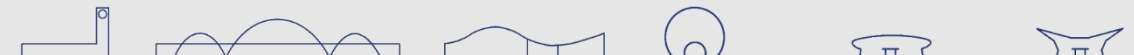
BOOTES

GWFUNC

gwemopt

BOOTES

GWOPS



国内外 发展现状

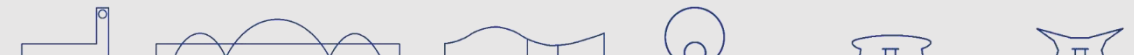
GWOPS的特点

- 观测目标分配：根据望远镜的可见性和极限星等，分配观测目标；
- 星系筛选：使用星系星表进行星系筛选，并通过贝叶斯推断框架计算观测优先级；

GWOPS的不足

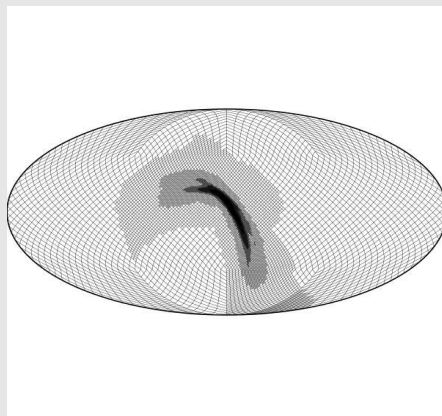
- 观测资源分配不均：对于大视场望远镜，当多个望远镜均对同一片天区可见时，观测目标没有被有效分摊，而是集中在某一区域。

本课题的目标是针对**大视场望远镜网络**，实现**多望远镜协同优化**后随观测引力波事件，并更新到GWOPS系统上。

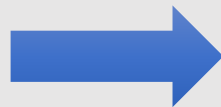


问题分析 与建模

LIGO-Virgo 团队使用HEALPix刻画引力波源可能的位置分布

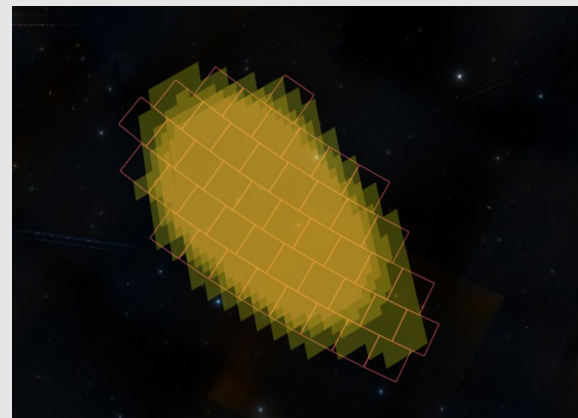


Tiling 算法

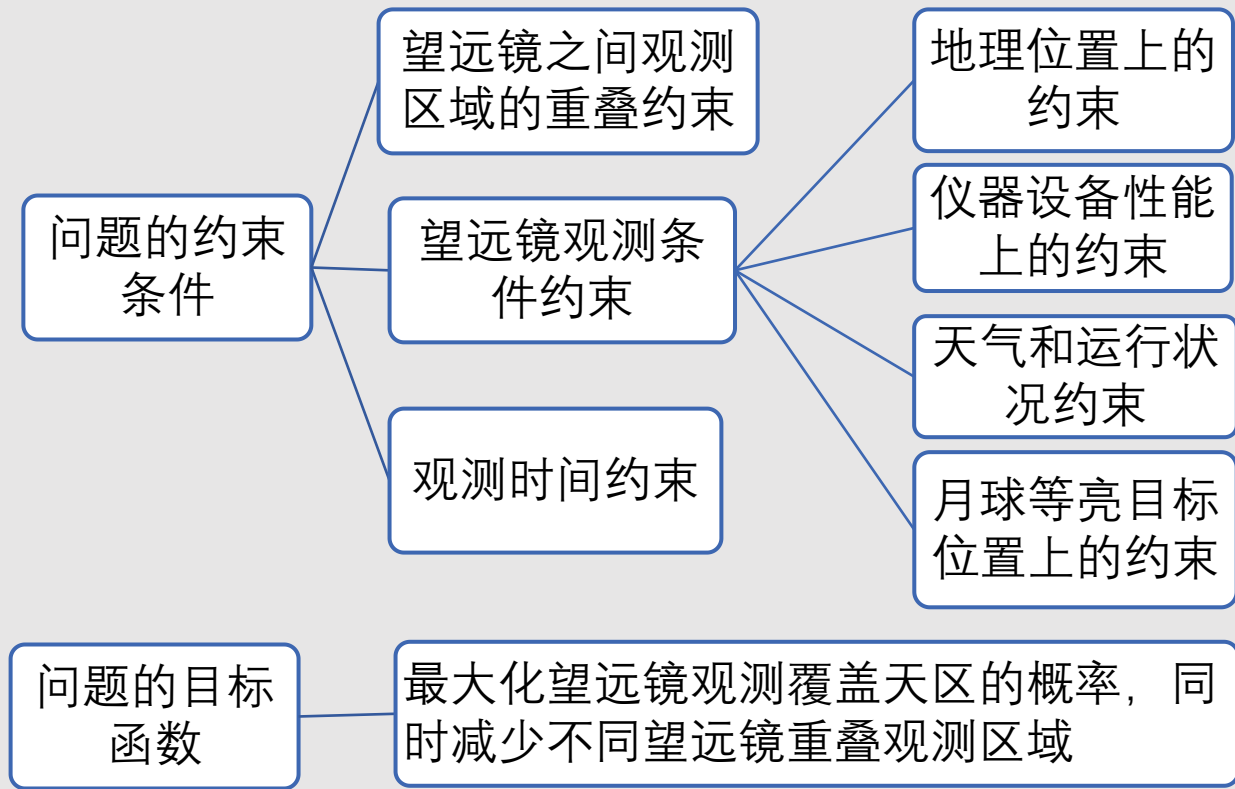


望远镜的观测目标集合

$$\text{Tile}_{\text{prob}} = \sum_{i \in S} \text{pix}_i$$



问题分析 与建模



主要 研究内容

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;

观测目标分配算法

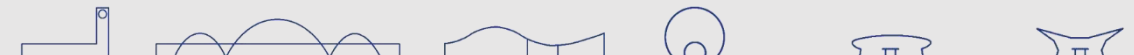
- 将引力波误差天区的观测目标分配给望远镜网络中的各个望远镜;

观测目标调度算法

- 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;

观测规划系统实现

- 实现从接收引力波事件警报到发布观测计划的自动化运行系统;

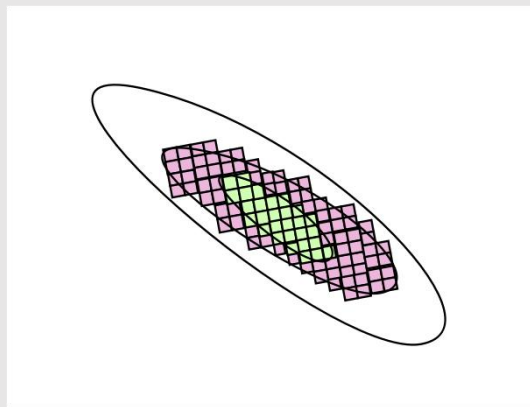


算法设计部分

- 观测目标选择算法的设计
- 观测目标分配算法的设计
- 观测目标调度算法的设计



观测目标选择算法的设计



Ranked Tile 算法

对网格累计概率进行排序

概率高的优先级高

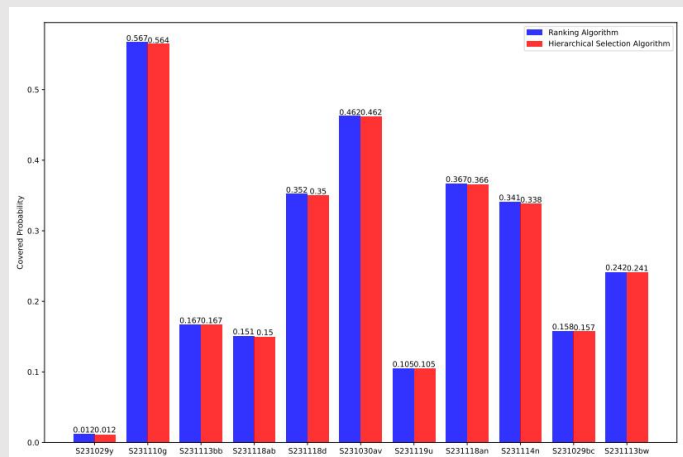
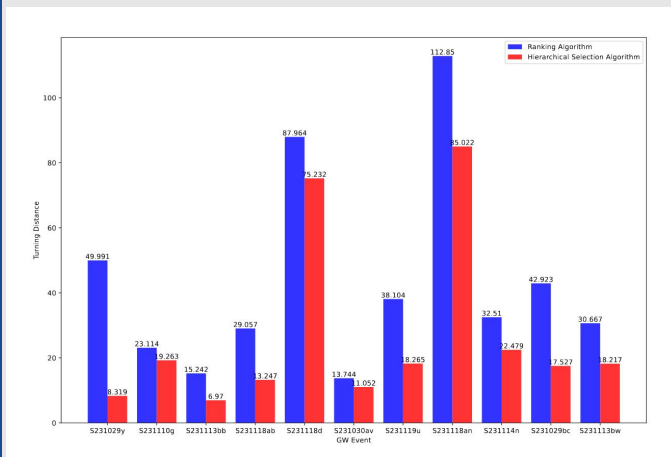
基于轮廓的层次选择算法

按照累计概率的轮廓分层

同一层内的网格的优先级相同，内层的网格优先级更高

观测目标选择算法的设计

基于轮廓的层次选择算法与Ranked Tile 算法得到结果在回转距离和覆盖概率上的对比图



观测目标 分配算法 的设计

视场优先原则

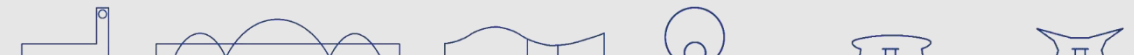
- 望远镜视场大小进行排序，视场大的优先级高

连续拼接原则

- 确保相邻望远镜观测区域有部分重叠区域，避免产生遗漏区域

观测可见性的计算

- 地理位置限制
- 观测时间限制
- 月相与月球位置限制



观测目标分配算法的设计

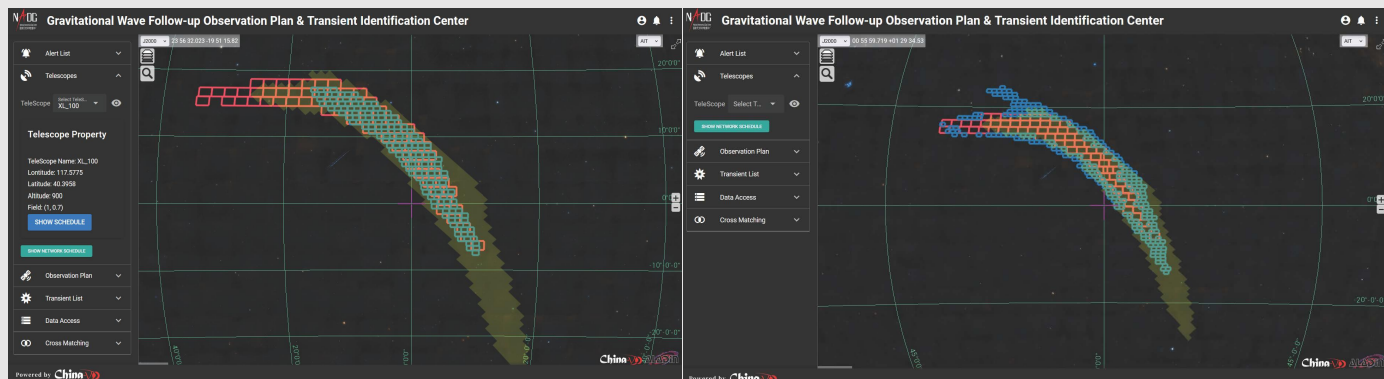
按照视场大小确定望远镜的优先级

选择未分配的观测目标分配给当前望远镜

观测目标进行调度以最大化使用观测时间

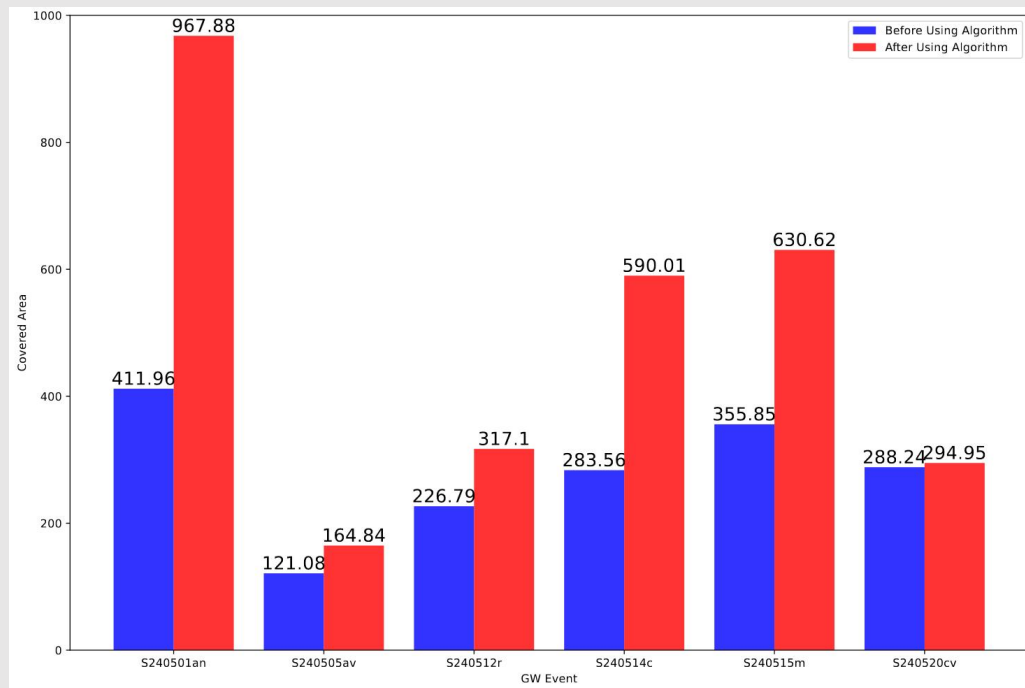
标记当前望远镜的观测区域为已分配

对下一台望远镜分配观测目标



观测目标 分配算法 的设计

协同分配后随观测策略与独立后随观测覆盖面积的对比图



观测目标 调度算法 的设计

优先级排序策略

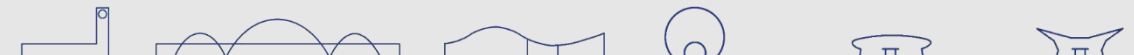
- 根据观测目标的优先级进行排序;
- 优先观测高优先级目标;

升起时间排序策略

- 在优先级相同的情况下, 根据目标升起时间安排观测计划;
- 优先观测升起时间早的目标, 以充分利用观测时段。

赤经排序策略

- 对于优先级和升起时间相近的目标, 按照赤经从小到大排序;
- 减少望远镜调整频率, 降低定位和跟踪目标的时间。



观测规划系统的实现

- 引力波警报接收模块的实现
- 观测规划制订模块的实现
- 观测规划存档和发布模块的实现
- 用户交互模块的实现
- 观测规划系统运行情况



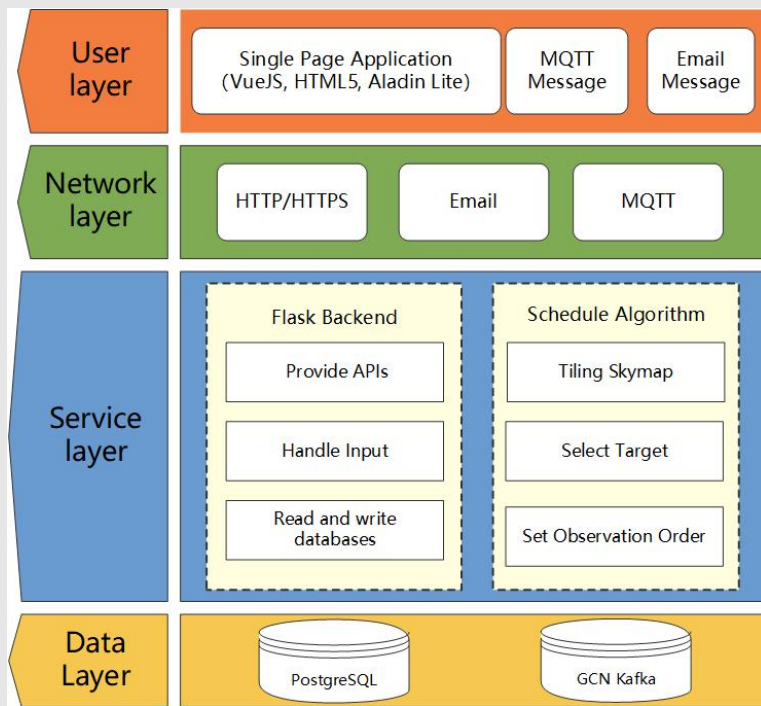
观测规划系统的实现

用户交互系统

网络传输层

观测规划与存档系统

数据接收存储系统



引力波警报接收模块的实现

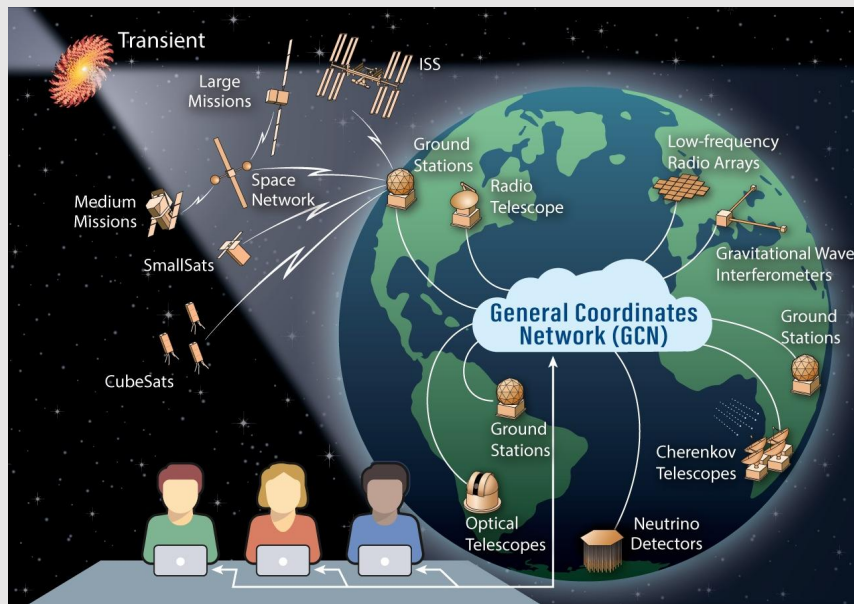
LVC的引力波警报



GCN Kafka消息队列



GWOPS接收模块

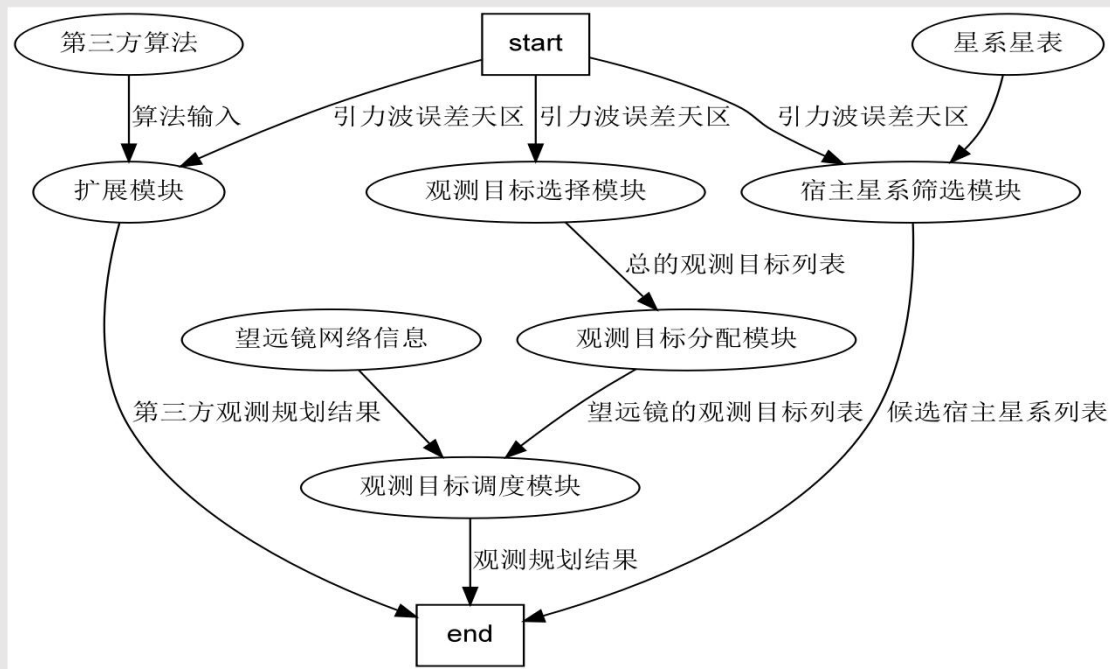


图源: <https://gcn.nasa.gov/>

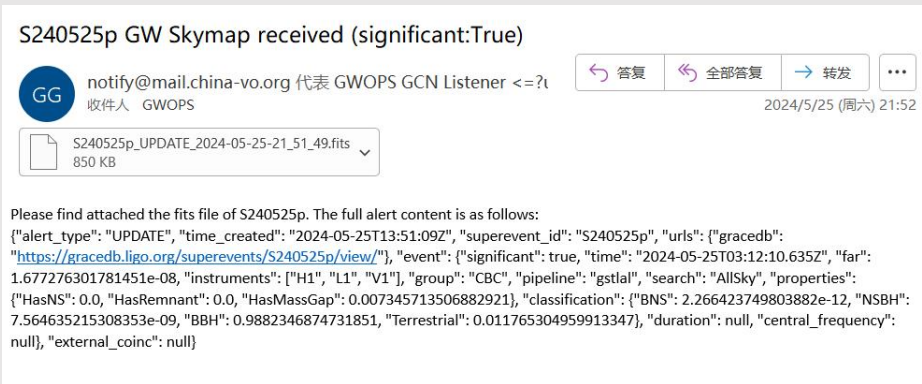


观测规划 制订模块 的实现

观测规划制订模块是对上面算法的具体实现，同时也支持运行**第三方算法**，来得到更有针对性的观测规划。

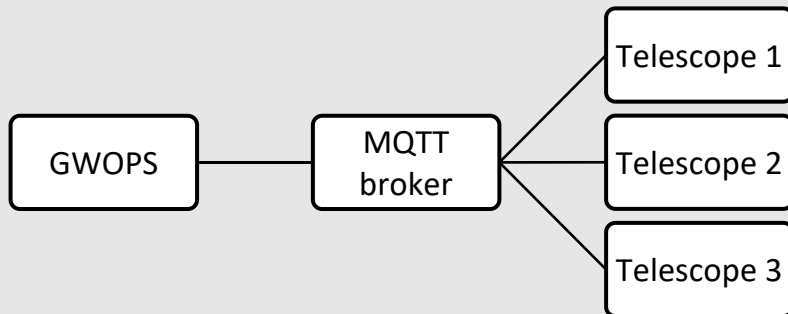


通过邮件发送引力波警报通知



观测规划 发布模块 的实现

通过MQTT消息队列发送后随观测规划



观测规划 存档查询 的实现

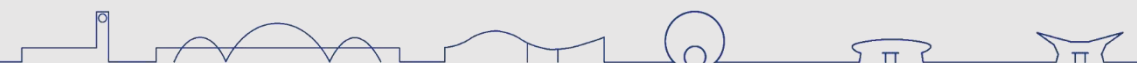
存档数据库实体关系图



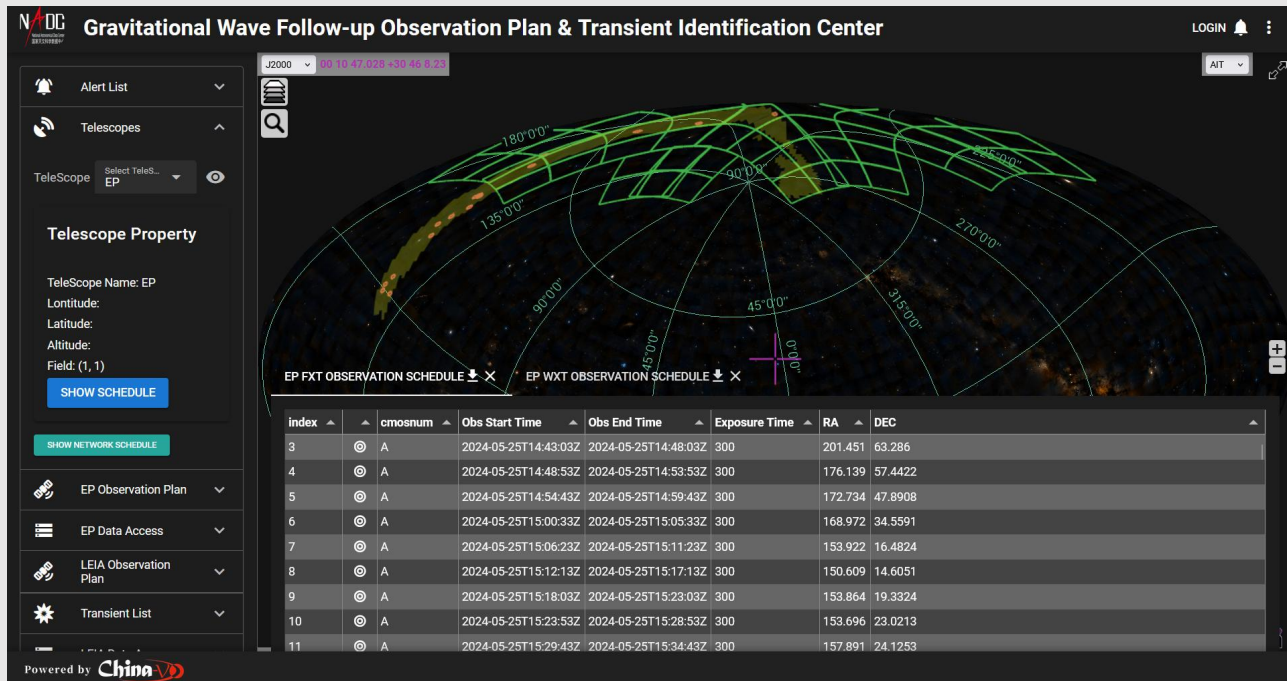
观测规划 存档查询 的实现

存档查询服务提供的 API

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



用户交互系统的实现



访问地址: <https://nadc.china-vo.org/gwops>

04期间系统运行情况

04期间系统服务望远镜列表

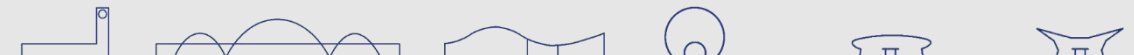
望远镜名称	地理位置(经度, 纬度)	海拔高度(米)	视场尺寸(°)	观测方式
XL_30	117.5775°E, 40.3958°N	900	2° × 1.35°	Tiling
XL_100	117.5775°E, 40.3958°N	900	1° × 0.7°	Tiling
HMT	87.1777°E, 43.4708°N	2080	1° × 0.66°	Tiling
GOT	88.5772°E, 43.5224°N	1795	1.2° × 0.8°	Tiling
XAONS_100	87.17E43.47N	2037	1.125° × 1.125°	Tiling
XAONS_120	87.17E43.47N	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



04期间系统运行情况

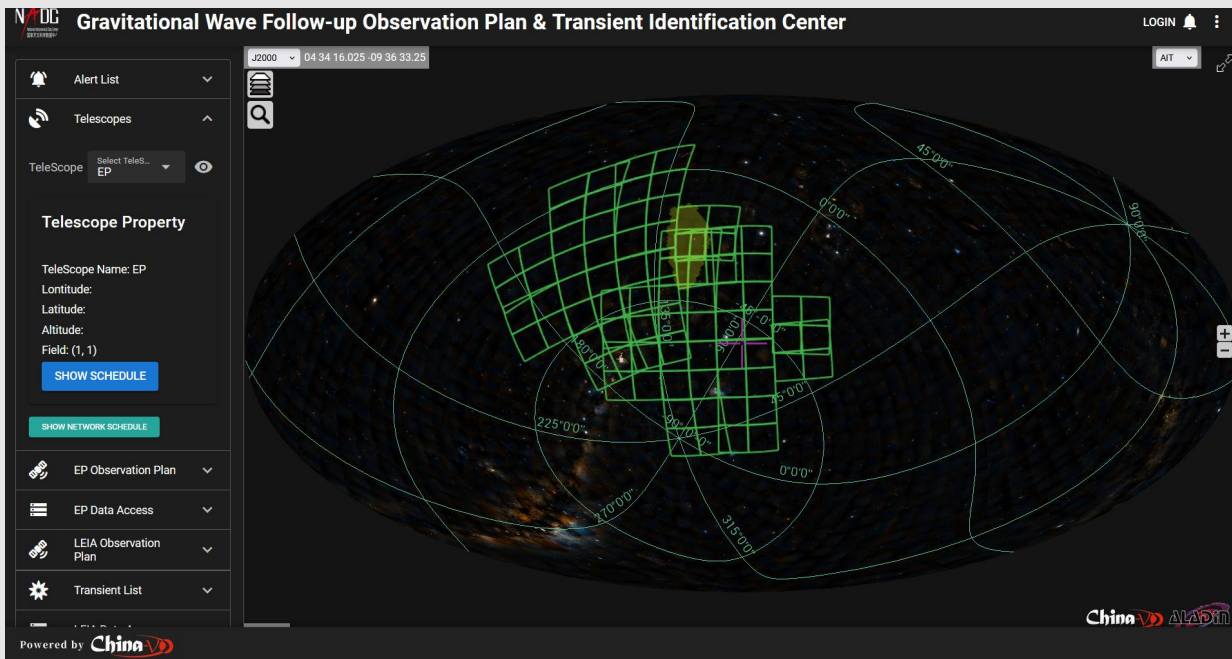
O4a期间兴隆mini 司天望远镜实际后随观测统计

#	A	B	C	D	E	F	G	H
1	引力波事件	观测天数	总观测天区数 (至少1次)	总观测≥3次天区数 (当天多色不叠加计数)	总观测2次天区数	总观测1次天区数	观测日期	≥3次观测天区
2	s230521k	10	21	21			2023-05-22	10
3	s230520ae	9	21	18	1	2	2023-06-01	
4	s230522a	7	20	20			2023-06-01	4
5	s230522n	5	3	2	1		2023-06-01	
6	s230524b	6	23	22	1		2023-06-04	2
7	s230524x	1	1	1			2023-06-07	
8	s230529ay	5	15	12	1	2	2023-06-06	2
9	s230601bf	9	33	13	15	5	2023-06-02	4
10	s230605o	1	8	7	1		2023-06-06	7
11	s230606d	3	26	8	1	17	2023-06-06	4
12	s230608as	1	2	2			2023-06-13	2
13	s230609u	3	15	14	1		2023-06-12	11
14	s230615az	3	2	2			2023-06-16	2
15	s230619aa	2	19	19			2023-06-20	13
16	s230619bd	1	17	14	1	2	2023-06-21	14
17	s230621ap-f	1	14	13	1		2023-06-24	13
18	s230622ba	1	1			1	2023-06-29	
19	s230627c	4	25	24	1		2023-06-27	11
20	s230630am	3	13	7	5	1	2023-06-30	
21	s230702an	2	12	12			2023-07-04	6
22	s230704f	1	7	7			2023-07-05	7
23	s230911ae	1	49		45	4	2023-09-12	
24	s230914ak	1	66	1	42	23	2023-09-14	
25	s230919bj	1	5			5	2023-09-20	
26	s230920al	1	36		33	3	2023-09-20	
27	s230922g	1	73		65	8	2023-09-22	



EP 卫星的后随观测规划

04期间系统
运行情况



04期间系统运行情况

EP 后随观测发送的GCN通报

GCN Circular 36313

Subject LIGO/Virgo/KAGRA S240422ed: EP-FXT detection of a candidate counterpart EP240426a
Date 2024-04-26T11:13:02Z [a month ago]
From EP Team at NAOC/CAS <ep_ta@bao.ac.cn>
Via Web form

H. Sun, D. Y. Li (NAOC, CAS), Y. Chen, J. Guan, C. K. Li, S. M. Jia, H. S. Zhao, J. Zhang, M. Y. Ge, W. W. Cui, H. Feng, W. Li, C. Z. Liu, F. J. Lu, L. M. Song, J. Wang, J. J. Xu, D. W. Han, S. N. Zhang, X. F. Zhao (IHEP, CAS), C. C. Jin, J. W. Hu, M. Zhang, H. Q. Cheng, H. Y. Liu, Y. Liu, Z. X. Ling, C. Zhang, M. H. Huang, H. W. Pan, Y. F. Xu, W. Yuan, W. D. Zhang (NAOC, CAS), Y. C. Fu (BNU), B. Zhang (UNLV), V. Burwitz, P. Friedrich, N. Meidinger, K. Nandra, A. Rau (MPE), E. Kuulkers, A. Santovincenzo (ESA), P. O'Brien (Univ. of Leicester), B. Cordier (CEA), on behalf of the Einstein Probe team

We report on the detection of a possible X-ray counterpart candidate of S240422ed (The LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration, GCN [36236](#)), designated EP240426a, by the Follow-up X-ray telescope (FXT) on board the Einstein Probe (EP) mission. This source was found in a series of snapshots of EP-FXT targeting galaxies within the probable location of S240422ed. The observation started at 2024-04-26T04:23:21 (UTC) with an exposure time of 534 seconds.

The source is located within the 90% credible region of the updated LVK sky localization (The LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration, GCN [36240](#)). The position is R.A. = 121.8567 deg, Dec. = -29.4609 (R.A. = 08:07:25.61, Dec. = -29:27:39.2) with an uncertainty of 10" (90% C.L. statistical and systematic). This position is 5.5 arcsec away from the galaxy 2MASX J08072584-2927344 at a luminosity distance of 188 Mpc. The absorption-corrected flux in 0.5-10 keV is about 9.2×10^{-13} erg/s/cm² assuming a power-law spectrum with a photon index of 2.0 with Galactic absorption.

No previously known X-ray sources are found within the error circle around this position. A flux upper limit set by the eRASS1 survey is 1.2×10^{-13} erg/s/cm² (99.9% C.L.) in 0.2-5.0 keV .

For any questions concerning this source please contact by email the Transient Advocates of EP240426a, H. Sun (hsun@nao.cas.cn) and D. Y. Li (dyl@nao.cas.cn) from the EP science center. Please note that EP-FXT is currently undergoing in-flight calibration, and the derived source parameters may be subject to larger uncertainties than quoted here; so please use them with caution. Launched on January 9, 2024, EP is a space X-ray observatory to monitor the soft X-ray sky with X-ray follow-up capability (Yuan et al. 2022, Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics). EP is a mission of the Chinese Academy of Sciences in collaboration with ESA, MPE and CNES.



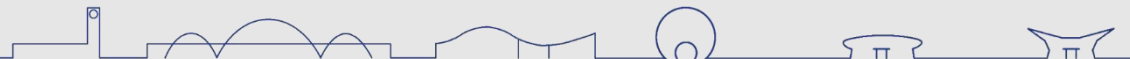
研究主要创新点

- 提出了一种基于引力波事件误差天区轮廓，由内而外选择目标并设定优先级的新方法，减少了望远镜的回转时间；
- 优化了望远镜网络联合观测策略，基于视场大小分配观测目标，在保证天区覆盖的前提下，进一步提升了观测效率；
- 开发了一套具备可扩展性、可自动运行的引力波后随观测规划系统，并投入实际使用且运行稳定。



研究成果

- 论文：《Enhancing GWOPS for Multitelescope Detection of Gravitational Wave Electromagnetic Counterpart》(已投稿PASP)
- 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（实质审查中）



未来工作计划

- 对望远镜运行状态的实时监控与动态调整
 - 扩展观测规划系统，实现对望远镜运行状态和观测条件的实时监控，
 - 通过反馈机制，整合望远镜运行状态并动态调整望远镜优先级。
- 分布式计算架构
 - 重构观测规划模块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，提升系统稳定性。
- 国际合作与信息共享
 - 通过GW Treasure Map平台获取全球其他望远镜后随观测信息，
 - 主动选择未观测区域进行观测，提高观测效率，
 - 及时上报观测计划和进度，实现信息共享和资源优化配置。
-



敬请各位老师批评指正!

