



贵州岩溶地区射电望远镜方案探讨

朱博勤, 钱磊*, 岳友岭

中国科学院FAST重点实验室, 中国科学院国家天文台, 北京 100101

*联系人, E-mail: lqian@nao.cas.cn

收稿日期: 2019-11-19; 接受日期: 2020-02-16; 网络出版日期: 2020-05-21

国家重点研发项目(编号: 2017YFA0402600)、中国科学院青年创新促进会(会员编号: 2018075)、中国科学院“西部之光”人才培养引进计划和贵州省科技计划项目(编号: 黔科合支撑[2020]4Y022号)资助

摘要 作为建设在岩溶洼地中的大口径射电望远镜, 我国的500 m口径球面射电望远镜(FAST)已经完成调试, 发现了超过一百颗脉冲星, 取得了一系列科学成果。然而, 一台单一的望远镜观测效能仍然有一定局限, 通过在其周边建造一些其他望远镜将提升其观测效能, 有助于取得更多科学成果。结合贵州岩溶地区洼地的形态分析, 探讨了在该地区建设大型射电望远镜的一些设计方案。分析了洼地的形态、口径和深度等基本性质, 讨论了建造射电望远镜的可能方案, 包括中星仪巡天阵列、类全可动射电望远镜、口面倾斜射电望远镜和低频固定球面射电望远镜。简要分析了工程中面临的一些困难, 计算了天区覆盖、灵敏度等基本参数, 提出了适合这些望远镜的科学目标, 包括脉冲星和快速射电暴搜寻以及射电变源研究。这些望远镜与FAST的协同观测, 将拓展FAST的观测能力, 有助于在时域天文学等领域取得更多科学成果。

关键词 台址, 望远镜, 观测方法

PACS: 07.57.-c, 95.45.+i, 95.55.Jz, 95.85.Bh, 97.60.Gb

1 引言

我国的500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST)^[1]和美国的阿雷西博望远镜(Arecibo)^[2]的成功建设和运行已经证明了, 在岩溶洼地中建造大型射电望远镜是突破地面大型射电望远镜百米口径极限的一条可行途径。

岩溶洼地极大地减少了台址建设时土石方开挖的工程量, 而且由于岩溶地区存在众多地下暗河, 在

岩溶洼地中建造大型射电望远镜也降低了水害的风险。岩溶地区由于地势崎岖, 一些洼地远离城镇, 加上山地阻隔, 拥有相对宁静的电磁环境。这些特点使得岩溶洼地成为了建造大型射电望远镜的理想台址。

我国贵州省岩溶地貌占全省面积约71%, 拥有众多大小不等、形态各异的岩溶洼地。有的洼地规模超过FAST所在的大窝凼洼地, 有的洼地北高南低, 有的洼地中间平坦。这些洼地适合建设不同类型的射电望远镜。本文根据对岩溶洼地调查的结果,

引用格式: 朱博勤, 钱磊, 岳友岭. 贵州岩溶地区射电望远镜方案探讨. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 089501
Zhu B Q, Qian L, Yue Y L. The conceptual designs of radio telescopes in Guizhou karst region (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 089501, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0385](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0385)

提出了一些建设大型射电望远镜和望远镜阵列的方案, 分析了基本参数和相关科学目标.

2 适合建设大型射电望远镜的岩溶洼地

贵州有较多的中高山地和丘陵. 在寒武纪-石炭纪沉积的大量碳酸盐岩, 总厚度达到万米以上, 出露的碳酸盐岩更是世界闻名, 长期的构造运动以间歇性均衡抬升为主, 从而使得岩溶地貌有较稳定的发育环境, 且近地表的岩溶发育十分强烈. 在地质构造、地层构造、水、植物等内外应力的共同参与下, 岩石地表的侵蚀、溶蚀地貌, 洼地底部的堆积、地下溶蚀、堆积地貌等相应地得到发育.

在FAST台址周边地区, 地表岩溶强发育, 峰丛洼地连绵不断. FAST台址——大窝凼属于“大贵州滩”中心部位的大型U型峰丛洼地. 该洼地层为中厚层三叠系隆头组(T_2)白云质灰岩, 在断层及其破碎带的基础上, 经过4-5期的间歇性平衡抬升发育形成. 大窝凼洼地由北侧的小窝凼和南侧的大窝凼组成, 南北峰间相距1200 m, 东西峰间相距1000 m, 深350 m. 大窝凼地形较圆, 呈U型剖面, 形态上与球面非常接近, 是大口径球面射电望远镜十分优质的台址.

在大窝凼周边, 还分布着大大小小很多个洼地. 对FAST台址大窝凼洼地所在的1:10000地形图标准图幅进行岩溶洼地(负地形)研究分析, 全图幅面积为 29 km^2 , 共有117个大小不等的各类岩溶洼地, 洼地密度为 $4.03 \text{ 个}/\text{km}^2$; 口径在200 m以上的岩溶洼地有106个, 洼地密度为 $3.65 \text{ 个}/\text{km}^2$; 口径在400 m以上的较圆的岩溶洼地有37个, 洼地密度为 $1.28 \text{ 个}/\text{km}^2$. 这些洼地中适合建设大型射电望远镜的洼地有以下几类.

2.1 大口径球冠形洼地

在岩层水平的厚层灰岩地区, 构造间歇性平衡抬升, 断裂构造不强烈, 地表径流在岩层结构薄弱部位长期侵蚀并通过垂直通道排入地下水系, 从而易形成大型岩溶洼地. 在FAST台址附近就有多处大口径球冠形洼地, 如董架打多洼地.

董架打多洼地位于大窝凼洼地以南2.6 km(如图1), 洼地底部海拔657 m, 洼地分水岭主峰海拔1089 m, 四周分水岭、垭口及山峰位于1180 m直径的圆周上; 底部地形呈锅底状, 相对平缓地的面积为 40000 m^2 . 洼地地形与半径500 m、口径800 m的球冠吻合较好.

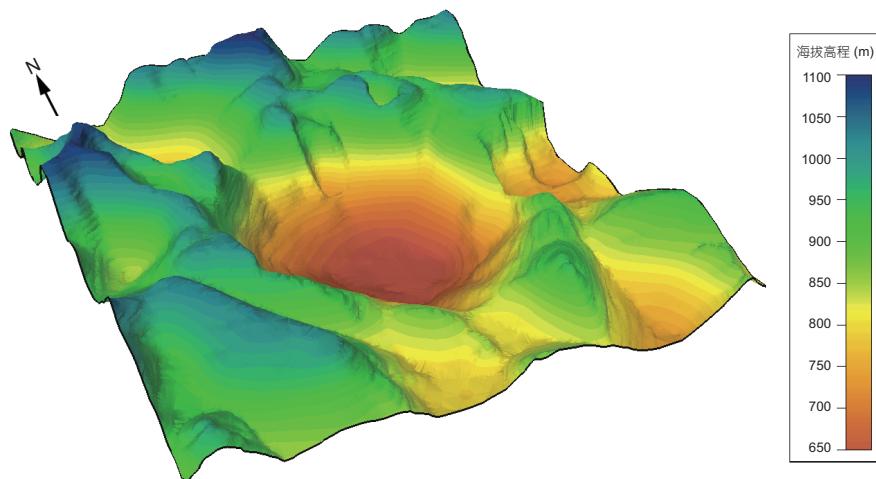


图1 (网络版彩图)董架打多洼地地形三维图(范围: 东西1400 m、南北1300 m; 25 m等高距). 使用先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model, ASTER GDEM)V2数据制作. 空间分辨率约为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 高度误差小于20 m

Figure 1 (Color online) The three-dimensional topographic map of Da Do depression in Dong Jia (the scale from east to west: 1400 m, from north to south: 1300 m. Contour interval: 25 m). The map is prepared with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) V2 data. The spatial resolution is about $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, the height error is smaller than 20 m.

2.2 向南开口型洼地

当岩溶洼地发育于褶皱构造边缘或构造地形明显变化地带, 洼地发育在形态上会出现明显的不对称, 有时会出现开口, 或者在峰丛地貌向峰林地貌的发育阶段, 也会出现明显的“破洼地”, 从而出现开口.“破洼地”的开口方向大都受到构造和地形趋势面的影响. 位于董架乡的白马洼地就是典型的“破洼地”.

董架白马洼地位于大窝凼洼地以南6.2 km(如图2), 是一个开口向南的“破洼地”. 洼地北部呈“围椅”状, 洼地底部海拔875 m, 洼地北侧分水岭海拔1075 m, 西侧分水岭海拔1050 m, 东侧分水岭海

拔1100 m. 洼地东西地形剖面呈基本对称的下凹弧型, 东侧稍陡; 洼地南北地形剖面北陡南缓, 呈不对称下凹弧型, 北侧地形坡度是南侧的2倍, 洼地的南向开口地形良好.

2.3 碟形洼地

除了球冠型洼地, 在FAST台址附近还有一些中心平坦的碟形洼地, 如鼠场大麻窝洼地.

鼠场大麻窝洼地位于大窝凼洼地以东5.25 km(如图3), 同属于大口径洼地. 洼地底部海拔870 m, 洼地分水岭主峰海拔高1250 m, 洼地口径1300 m; 但洼地底部平缓, 四周山坡较陡, 形态上为中间平缓的

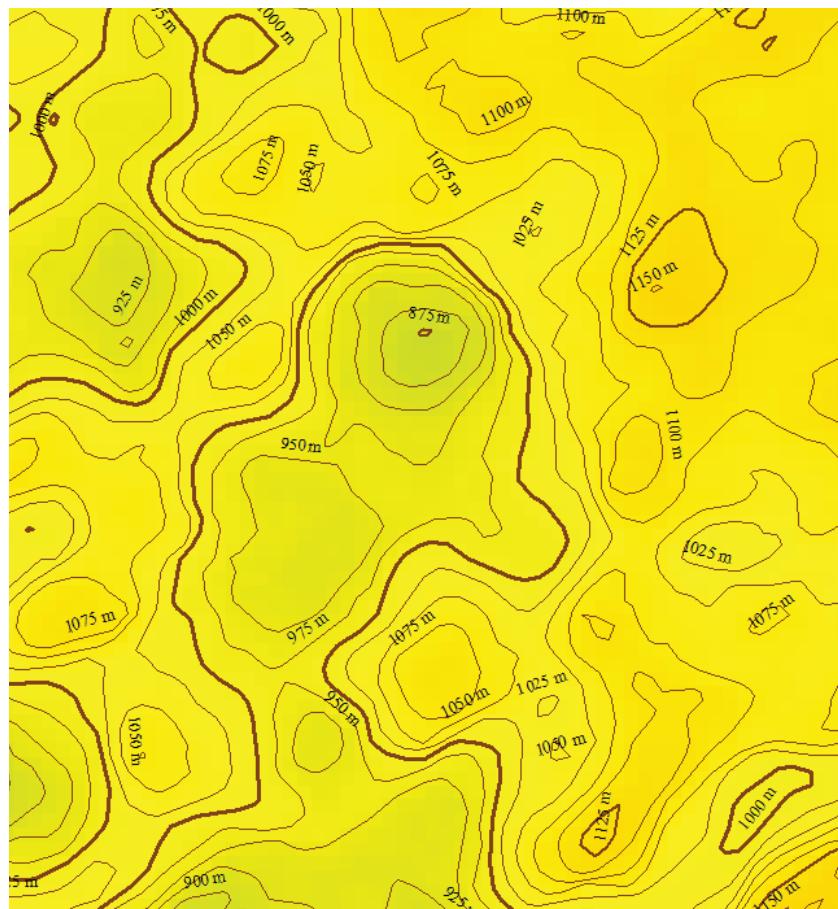


图2 (网络版彩图)董架白马洼地等高线图(范围: 东西1850 m、南北2000 m; 25 m等高距). 使用ASTER GDEM V2数据制作. 空间分辨率约为30 m×30 m, 高度误差小于20 m

Figure 2 (Color online) The three-dimensional topographic map of Bai Ma depression in Dong Jia (The scale from east to west: 1850 m, from north to south: 2000 m. Contour interval: 25 m). The map is prepared with the ASTER GDEM V2 data. The spatial resolution is about 30 m×30 m, the height error is smaller than 20 m.

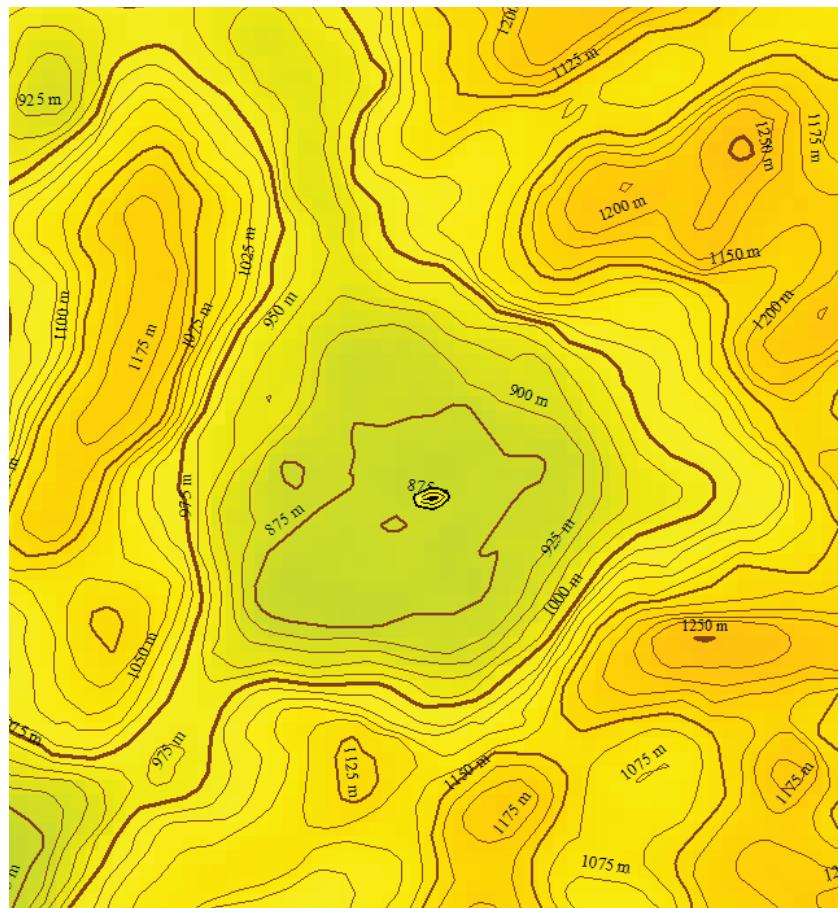


图3 (网络版彩图)鼠场大麻窝洼地等高线图(范围: 东西1850 m、南北2000 m; 25 m等高距). 使用ASTER GDEM V2数据制作. 空间分辨率约为30 m×30 m, 高度误差小于20 m., 高度误差小于20 m.

Figure 3 (Color online) The three-dimensional topographic map of Da Ma Dang depression in Shu Chang (The scale from east to west: 1850 m, from north to south: 2000 m. Contour interval: 25 m). The map is prepared with the ASTER GDEM V2 data. The spatial resolution is about 30 m×30 m, the height error is smaller than 20 m.

碗碟形, 底部平缓地的面积超过250000 m².

3 射电望远镜的新方案

根据FAST观测经验, 山地阻隔可以有效减少来自远处的射频干扰, 所以在洼地中建设射电望远镜是一种有利的方案, 而在FAST周边的洼地中建设射电望远镜尤其有利. 这里位于电磁波宁静区, 射频干扰很少. 建设射电望远镜和FAST组成阵列进行观测也可以有效提高分辨率以及消除射频干扰, 提升观测能力.

如果在FAST周边建设了足够多的射电望远镜, 就有望实现中国科学家早先提出的平方公里

阵(Square Kilometer Array, SKA)的中国版本^[3], 即在岩溶洼地中建设若干大型射电望远镜组成接收面积达到平方千米的射电望远镜阵列.

3.1 中星仪巡天阵列

快速射电暴^[4]是近年来发现的新现象. 根据现有的研究, 快速射电暴可能是一种比较常见的现象, 只是由于以往观测设备和观测模式的限制, 我们只探测到了少部分的快速射电暴. 利用多台射电望远镜对较大天区进行巡视, 是发现更多快速射电暴的一种可行方案.

5 m口径的望远镜在L波段的波束宽度大约

是 2.3° . 用5 m口径的望远镜组成中星仪阵列, 每台望远镜指向子午面上一个特定方向, 对应不同赤纬, 大约70台望远镜可以完整覆盖 $\pm 40^\circ$ 天顶角, 达到奈奎斯特采样, 实现每天对FAST可见天区, 即赤纬 -15° — $+65^\circ$ 天区进行一次扫描. 中星仪扫描巡天发现的快速射电暴或其他源可以用FAST进行后续观测.

考虑快速射电暴脉冲典型时标为 $\tau \sim 5$ ms^[5]. 使用 $\Delta\nu = 500$ MHz带宽, 假设系统温度 $T_{\text{sys}} = 20$ K, 望远镜效率 $\eta = 60\%$, 5 m口径望远镜观测快速射电暴的探测极限为

$$S_{\min} = \frac{kT_{\text{sys}}}{\eta A} \frac{1}{\sqrt{\Delta\nu\tau}} \sim 1.5 \text{ Jy}. \quad (1)$$

通量(Fluence)高于3.8 Jy ms(对于5 ms时标, 对应流量为0.78 Jy)的快速射电暴^[6]的全天空事件率为 $R = 3.3_{-2.2}^{+3.7} \times 10^3 / \text{d}$. 快速射电暴随流量的分布函数为 $N(> S) \propto S^{-2.6}$ ^[7], 流量高于1.5 Jy的全天空事件率大约为400/d. 在类似鼠场大麻窝洼地这种碟形洼地中, 可以建造小口径望远镜组成的中星仪巡天阵列, 实现对较大天区的扫描观测. 70台5 m望远镜可以覆盖全天空的0.7%, 每年有望以信噪比3探测到大约70个快速射电暴.

3.2 类全可动射电望远镜

和全可动望远镜一样, 类全可动望远镜含有一个可以变换指向的抛物面形状的反射面. 不同的是, 反射面架设在洼地中的可动框架上. 框架带动反射面整体运动, 改变方位和俯仰, 实现指向.

将反射面架设在地面上的可动框架上(见图4), 可以实现多点支撑, 实现支撑结构轻量化, 减少结构变形, 突破全可动望远镜百米口径的工程极限, 无需对反射面进行复杂的主动变形.

对于口径为 D , 深度为 h 的反射面框架, 半径 R 可以表示为¹⁾

$$R = \frac{D^2/4 + h^2}{2h}. \quad (2)$$

1) $R^2 = (R - h)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2$

对于口径 d 的反射面, 最大天顶角 θ_z 为

$$\theta_z = \arcsin \frac{D}{2R} - \arcsin \frac{d}{2R}. \quad (3)$$

对于口径 $D = 1000$ m、深度 $h = 300$ m的洼地, 反射面框架的曲率半径为 $R = 566$ m. 使用 $d = 400$ m口径的反射面, 最大天顶角 θ_z 为 42° .

3.3 口面倾斜射电望远镜

由于地理纬度和天顶角范围的限制, FAST目前只能观测赤纬在 -15° — $+65^\circ$ 之间的天区^[1]. 在天顶角不能大幅增加的情况下, 要使用FAST这种类型的望远镜观测更靠南的源, 一种可能的办法是改变望远镜的天顶, 也就是修建口面向南倾斜的望远镜. 历史上出现过为了观测特定源而将口面倾斜的望远镜, 例如荷兰30 m口径的Kootwijk kuil望远镜, 为了观测Cyg A, 口面向南倾斜了 10° ^[8]. 不过这是一台固定反射面望远镜, 只能扫描一条很窄的带状天区.

在天顶角 40° 的情况下, 望远镜口面只需要向南倾斜 20° 就可以覆盖赤纬 -35° — $+45^\circ$ 之间的天区, 这样就可以覆盖银心. 这有助于发现更多有特殊性质

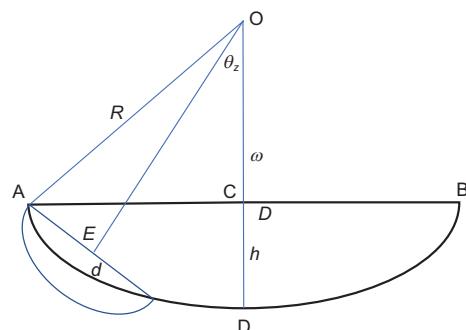


图4 (网络版彩图)类全可动射电望远镜侧视图. 反射面铺设在一个可以在支撑框架(粗线表示的球冠)中运动的可动框架(细线表示的球冠)上. R 为支撑框架的球冠半径, D 为支撑框架的口径, d 为反射面的口径

Figure 4 (Color online) The side view of the quasi steerable radio telescope. The reflector is laid on a moving frame (the spherical crown indicated by thin curves), which can move on a supporting frame (the spherical crown indicated by thick curves). R is the curvature radius of the supporting frame, D is the aperture of the supporting frame, d is the aperture of the reflector.

以及有良好计时特性的脉冲星, 更好地进行极端物态的研究以及低频引力波探测.

由于口面倾斜, 重力不沿对称轴方向, 这给馈源舱和反射面的控制带来了额外的复杂性. 在观测南边的源时, 馈源需要达到更大的倾角, 所以口面倾斜望远镜的馈源支撑系统的一次支撑索需要能承受更大的应力, 而二次调整机构应该有更大的转角范围. FAST 的建设积累了较多经验, 这种口面倾斜的望远镜的设计和建造是有保障的.

3.4 低频固定球面射电望远镜

对于固定球面望远镜, 在低频(30–350 MHz), 由于球面和抛物面之间的差别小于波长, 可以在焦面上布置一系列馈源, 进行连续的中星仪巡天, 做到每天对可见天区进行一次扫描. 成为该频段时域天文最灵敏、最高效的望远镜. 与FAST相比, 这种望远镜的反射面不需要实时变形, 馈源不需要在焦面上实时移动, 极大简化了望远镜系统.

选择合适的洼地建设直径1000 m的固定球面望远镜, 有效口径可达600 m. 在低频, 天空背景对噪声的贡献不可忽略, 所以常温与制冷接收机系统温度差别不大. 使用固定面和常温馈源, 简化了望远镜系统, 降低了整体成本.

与中星仪巡天阵列类似, 这种望远镜也可以实现每天对可见天区进行一次扫描. 巡天速度远远超过传统望远镜. 使用这种望远镜进行低频扫描巡天将发现一批脉冲星和射电变源. 与中星仪巡天阵列相比, 灵敏度更高, 可以发现更多暗弱的源, 这将为射电变源等时域天文学研究做出重要贡献.

4 讨论和总结

FAST自2016年建成以来进行了密集的调试, 并于2020年1月完成了国家验收. 在FAST调试期间, 通过实测确定了FAST的基本性能^[9], 并已经取得了一系列成果^[10–15]. 这证明了FAST 的观测潜力. 而另一方面, 在FAST周边建设更多射电望远镜, 将进一步提升FAST的效能, 有助于FAST取得更多科学成果.

本文在贵州岩溶地区的多个洼地地形分析和实地测量的基础上, 给出了若干适合建设大型射电望远镜的候选洼地. 结合洼地特点, 探讨了一些建设大型射电望远镜和射电望远镜阵列的新方案.

中星仪巡天阵列是较为容易实现的一种方案, 预计每年可以发现70个快速射电暴. 全可动射电望远镜可以实现较大的有效口径, 而不需要复杂的主动反射面. 这种望远镜支撑反射面的可动框架需要在1000 m范围内整体运动, 这需要非常大的驱动功率. 这种望远镜可以达到比FAST更大的接收面积. 口面倾斜的射电望远镜可以实现对包括银心在内的一些南天重要的射电源的覆盖, 在贵州所在纬度, 这可能是实现能观测银心的大口径射电望远镜不多的方案之一. 但为了实现对银心的观测, 口面倾斜望远镜的馈源支撑系统的一次支撑索需要能承受更大的应力, 而二次调整机构应该有更大的转角范围. 低频固定球面望远镜的反射面不需要实时变形, 馈源不需要在焦面上实时移动, 极大简化了望远镜系统. 这种望远镜可以每天将可见天区巡视一遍, 巡天效率远远超过传统望远镜.

上述这些新方案可以实现更高灵敏度、更大天区覆盖的观测, 期待能在脉冲星、快速射电暴和射电变源研究中产生更多的新发现.

参考文献

- 1 Nan R, Li D, Jin C, et al. The five-hundred aperture spherical radio telescope (FAST) project. *Int J Mod Phys D*, 2011, 20: 989–1024
- 2 Gordon W E. Arecibo ionospheric observatory. *Science*, 1964, 146: 26–30
- 3 Peng B, Nan R D. Kilometer-Square Area Radio Synthesis Telescope. In: McLean B J, Golombek D A, Hayes J J E, et al., eds. *New Horizons from Multi-Wavelength Sky Surveys*. International Astronomical Union/Union Astronomique Internationale. Dordrecht: Springer, 1997. 179: 93
- 4 Lorimer D R, Bailes M, McLaughlin M A, et al. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin. *Science*, 2007, 318: 777–780
- 5 Chawla P, Kaspi V M, Josephy A, et al. A search for FAST radio bursts with the GBNCC pulsar survey. *Astrophys J*, 2017, 844: 140

- 6 Crawford F, Rane A, Tran L, et al. A search for highly dispersed fast radio bursts in three Parkes multibeam surveys. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 460: 3370–3375
- 7 Macquart J P, Ekers R D. Fast radio burst event rate counts-I. Interpreting the observations. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 474: 1900–1908
- 8 Ström R. G. Short history of fixed-reflector radio telescope. In: Proceedings of the Frontiers in Radio Astronomy and FAST Early Sciences Symposium 2015. Astronomical Society of the Pacific, 2016. 73
- 9 Jiang P, Yue Y L, Gan H Q, et al. Commissioning progress of the FAST. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959502
- 10 Lu J G, Peng B, Liu K, et al. Study of three rotating radio transients with FAST. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959503
- 11 Yu Y Z, Peng B, Liu K, et al. FAST ultra-wideband observation of abnormal emission-shift events of PSR B0919+06. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959504
- 12 Lu J G, Peng B, Xu R X, et al. The radiation structure of PSR B2016+28 observed with FAST. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959505
- 13 Zhang K, Wu J W, Li D, et al. Status and perspectives of the CRAFTS extra-galactic HI survey. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959506
- 14 Wang H F, Zhu W W, Guo P, et al. Pulsar candidate selection using ensemble networks for FAST drift-scan survey. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959507
- 15 Qian L, Pan Z C, Li D, et al. The first pulsar discovered by FAST. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959508

The conceptual designs of radio telescopes in Guizhou karst region

ZHU BoQin, QIAN Lei* & YUE YouLing

CAS Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

The Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope (FAST)—a large-aperture radio telescope constructed in a karst depression—is completing its commissioning. Several studies have been performed using FAST, including the discovery of over 100 pulsars. Nevertheless, the ability of a single telescope is still limited. The construction of other radio telescopes and telescope arrays around FAST will promote its use for new types of observations and help to achieve additional scientific goals. Based on the analyses of the basic properties of the karst depressions in the Guizhou Province—e.g., their morphologies, aperture diameters, and depths—some conceptual designs have been proposed for large-scale radio telescopes and telescopic arrays. They include a drift-scan survey array, a quasi-steerable radio telescope, a tilted radio telescope, and a fixed-reflector, low-frequency spherical radio telescope. The sky coverage and sensitivity have been calculated for each design, and possible science goals have been discussed, including searches for pulsars and fast radio bursts, as well as studies of variable radio sources. By coordinating their observations with FAST, these telescopes will greatly expand the observational capabilities of FAST and yield substantially more science results, especially in the area of time-domain astronomy.

site, telescopes, observational methods

PACS: 07.57.-c, 95.45.+i, 95.55.Jz, 95.85.Bh, 97.60.Gb

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0385](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0385)