

# 射电天文望远镜国际发展态势分析

(魏韧 董璐 郭世杰 李宜展 李泽霞)

**摘要** 射电天文望远镜是天文观测的重要科技基础设施。射电天文望远镜拥有观测从银河系到宇宙微波背景辐射的全宇宙尺度探测深度、超高探测灵敏度、高空间分辨能力,还可示踪天体物理化学性质及动力学特征的星际分子与原子精细结构的射电谱线,是观测冷暗宇宙、研究生命的空间起源的独特手段,推动对包括暗物质、暗能量、黑洞、宇宙起源、生命起源和太阳系起源等重大基础问题的认识。为把握射电望远镜领域国际发展态势,本报告定性调研了主要国家/地区射电天文望远镜、研究项目和发展战略,定量分析了本领域的研究热点和前沿,并提出了发展建议。

**关键词** 射电望远镜; 研究计划; 发展态势; 重大项目; 文献计量

## 目 录

1. 引言.....	2
2. 主要国家射电天文望远镜与研究项目.....	2
2.1 国际上重要射电天文望远镜.....	2
2.1.1 在运行的大口径厘米波射电望远镜.....	2
2.1.2 在运行的大型毫米/亚毫米波射电望远镜.....	3
2.1.3 主要的空间射电望远镜.....	4
2.1.4 规划及在建的射电望远镜.....	4
2.2 主要国家射电天文领域相关战略规划.....	5
2.2.1 美国 NRAO《美国国家射电天文台 2030: 战略目标与举措》.....	5
2.2.2 欧盟 ASTRONET《欧洲射电天文: 2025 年及以后》.....	6
2.2.3 英国 STFC《英国射电天文学战略回顾: 小组报告》.....	7
2.3 主要国家的射电天文研究项目.....	8
2.3.1 美国 NSF 国家自然科学基金会资助的射电天文研究.....	8
2.3.2 欧盟科研框架计划资助的射电天文研究项目.....	11
2.3.3 英国工程与自然科学研究理事会资助的射电天文研究项目.....	12
2.3.4 中国国家自然科学基金资助的射电天文研究项目.....	13
3. 从论文看射电天文研究的现状和趋势.....	15
3.1 论文数据来源.....	15
3.2 论文数量的年代变化趋势.....	15
3.3 论文数量的国家/地区分布.....	15
3.4 论文数量的机构分布.....	16
3.5 发文作者分布.....	18
3.6 高频关键词分析.....	19
3.7 高被引论文分析.....	20
3.8 期刊分析.....	21
4. 射电天文发展趋势.....	22
4.1 未来 SKA 主导的射电天文发展前景.....	22
4.2 大口径单天线射电望远镜.....	24
4.3 射电天文在其他学科的应用.....	24

5. 结论与建议.....	25
5.1 结论.....	25
5.2 建议.....	25

## 1. 引言

天文学是以观测为基础的学科，射电天文望远镜是天文观测的重要科技基础设施。由于宇宙中存在着大量的星际尘埃，光波在经过尘埃的时候会被吸收而不能穿透，而射电信号（生活中又被称作无线电波）可穿透这些尘埃，射电望远镜能够深入到以往光学望远镜看不到的地方，使人类走进宇宙空间的无尽深处，推进着人类对宇宙的认识。自 1932 年卡尔·央斯基在美国贝尔实验室首次探测到银河系中心的射电信号，射电天文学家发现了许多不同的辐射源如射电星系、类星体、脉冲星和宇宙微波背景辐射。20 世纪 60 年代的四大天文发现都是在射电波段进行的。

射电天文望远镜拥有观测从银河系到宇宙微波背景辐射的全宇宙尺度探测深度、超高探测灵敏度、高空间分辨能力，还可示踪天体物理化学性质及动力学特征的星际分子与原子精细结构的射电谱线，是观测冷暗宇宙、研究生命的空间起源的独特手段，推动对包括暗物质、暗能量、黑洞、宇宙起源、生命起源和太阳系起源等重大基础问题的认识。

射电天文的技术方法也为通讯、航天等其它领域提供了高技术的应用。在当前互联网时代广泛应用的 WiFi 技术，就发源于上世纪 70 年代在射电天文领域的数据无线传输技术，并发展为无线局域网技术的核心技术。在我国的探月工程中，射电天文的 VLBI 技术为嫦娥系列卫星的跟踪测轨提供了保障，并将在未来的火星探测工程的提供测定轨支持。

经过 90 多年的发展，射电天文望远镜基于无线电相关的技术方法，从单天线发展到综合孔径乃至甚长基线，观测的场所也从地基到空间。射电天文技术的发展使得探测灵敏度及带宽、空间分辨本领、谱分辨率等基本探测能力指标显著提高，在偏振接收、实时性等能力指标方面也大幅度改善。射电天文观测为天体物理、基本天体测量等各个分支领域提供了革新的手段。

## 2. 主要国家射电天文望远镜与研究项目

### 2.1 国际上重要射电天文望远镜

射电天文望远镜是接收天体射电波段辐射的装置，天线收集天体的射电辐射，接收机将这些信号加工、转化成可供记录、显示的形式，终端设备把信号记录下来，并按特定的要求进行某些处理然后显示出来。射电天文望远镜按观测波长可以分为厘米波射电望远镜和毫米波射电望远镜等。

#### 2.1.1 在运行的大口径厘米波射电望远镜

射电天文望远镜的发展已将近有九十多年的历史。自 20 世纪三十年代，正是由于射电望远镜的问世，使射电技术迅速发展，并导致了 60 年代脉冲星、类星体、宇宙微波背景辐

射、星际有机分子的四大发现。下表列出了建成的和在建的大口径厘米波射电望远镜，其中 FAST 是我国的国家重大科技基础设施，也是目前在运行的世界最大单口径射电望远镜，被誉为“中国天眼”。

表1：在运行的大口径厘米波射电望远镜

序号	名称	口径(m)	国家/地区	波长 (cm)	最高分辨率
1	FAST	1×500	中国	6~300	8arc sec
2	Tian Ma	1×65	中国	0.7~21	50 arc sec
3	Arecibo	1×300	美国	6~90	60arc sec
4	ATCA	6×22	澳大利亚	0.3~20	0.1arc sec
5	Parkes	1×64	澳大利亚	1.3~90	50arc sec
6	GBT	1×100	美国	0.3~150	10arc sec
7	Effelsberg	1×100	德国	0.6~49	10acr sec
8	GMRT	30×45	印度	0.3~20	2arc sec
9	1HT	500×5	美国	3~30	3arc sec
10	MERLIN	6×25~76	英国	1.3~200	0.01arc sec
11	Nancy	6×35~300	法国	9~21	100arc sec
12	VLBA	10×25	美国	0.4~90	0.0001arc sec
13	VLA	27×25	美国	0.7~400	0.04arc sec
14	Westerbork	14×25	荷兰	6~150	4arc sec

### 2.1.2 在运行的大型毫米/亚毫米波射电望远镜

由于在接收器方面的飞速发展，相继有一批高精度的毫米波望远镜建成并使用，如 2013 年落成的 ALMA 射电望远镜，是目前全球最灵敏的毫米/亚毫米波望远镜阵。下表列出了在运行的大型毫米/亚毫米波射电望远镜。

表2：在运行的大型毫米波射电望远镜

序号	名称	口径(m)	国家/地区	波长 (mm)	最高分辨率
1	ALMA	54×12, 12×7	美国欧洲日本等	0.32~3.6	0.003arc sec
2	APEX	1×12	德国	0.2~1.5	1 arc sec
3	ASTE	1×10	日本	0.1~1	2 arc sec
4	ARO	1×12	美国	0.3~4.6	5 arc sec
5	SPT	1×10	美国	1.3~3	60 arc sec
6	GLT	1×12	中国台湾	0.3~3	20 arc sec
7	NOEMA	10×15	法国	0.8~3	0.6 arc sec
8	SMA	8×6	美国	0.717~1.67	0.1arc sec
9	CSO	1×10.4	美国	0.35~2	8arc sec
10	HHSMT	1×10	美国	0.3~10	1 arc sec
11	IRAM	1×30	法国	0.8~3	10 arc sec

12	JCMT	1×15	美国	0.3~2	5 arc sec
13	LMT	1×50	墨西哥	0.85~4	5 arc sec
14	Nobeyama	1×45	日本	2~15	4 arc sec
15	PMO-13.7m	1×13.7	中国	2.6~3.5	5 arc sec
16	TRAO-13.7m	1×13.7	韩国	2.6~3.5	5 arc sec

### 2.1.3 主要的空间射电望远镜

空间射电望远镜在太空的分辨率可以提高 10 倍以上，并且可以与地面射电望远镜构成天地一体观测网，下表列出了主要的射电波空间天文望远镜。

表3：主要的空间射电望远镜

序号	名称	发射时间	近地点(km)	远地点(km)	国家	波长
1	RAE-1	1968.7	5829	5964	美国	15~1500m
2	Explor43	1971.3	242	196574	美国	30~10000m
3	RAE-2	1973.6	1100	1100	美国	23~12000m
4	KRT-10	1979.6	359	385	苏联	12cm, 72cm
5	VSOP	1997.1	560	21400	日本	18cm, 6cm, 1.3cm
6	SWAS	1998.12	586.2	593.8	美国	0.54~0.61mm
7	Odin	2001.2	600	600	瑞典等	0.5~0.6mm; 2.5mm
8	Herschel	2009.5	1500000	1500000	欧盟	0.055~0.672mm
9	SOFIA	2010.12	12	12	美国	0.2~0.6mm
10	Spektr-R	2011.7	10000	390000	俄罗斯	1.3, 6, 18, 92cm

### 2.1.4 规划及在建的射电望远镜

平方公里阵列射电望远镜(Square Kilometre Array, SKA)是目前最大的射电望远镜在建项目，预计将于 2028 年完成一期建设，将引领未来几十年的射电天文学发展。下表列出了近期规划及在建的重要射电望远镜。

表4：规划及在建的射电望远镜

序号	名称	工作频率	国家
1	Large Latin American Millimeter Array	45~900GHz	阿根廷
2	LOFAR Super Station	10~80MHz	法国
3	奇台 110 米口径全可动射电望远镜	0.3~117GHz	中国
4	Square Kilometer Array	0.05~30GHz	南非、澳大利亚等
5	CCAT-p	185~440GHz	美国
6	中国南极天文台 5 米太赫兹望远镜	0.75THz~15THz	中国

## 4.2 大口径单天线射电望远镜

相较采用合成孔径成像技术的阵列射电望远镜，大口径单天线射电望远镜具有较高的灵敏度，能够探测到遥远天体更微弱的信号。我国新建成的FAST射电望远镜是全球最大单口径、最灵敏的射电望远镜，将在未来20至30年保持世界一流地位，并很有可能在SKA建成之前作出重要成果。FAST将有能力对中性氢观测延伸至宇宙边缘，重现宇宙早期图像。目前，FAST已发现发现114颗脉冲星，未来可在一年时间发现数千颗脉冲星，建立脉冲星计时阵，脉冲星到达时间测量精度由120纳秒提高至30纳秒，成为国际上最精确的脉冲星计时阵，参与未来脉冲星自主导航和引力波探测。FAST还将主导国际甚长基线干涉测量网，获得天体超精细结构，进行高分辨率微波巡视，检测微弱空间信号。

在发展SKA、ALMA等阵列射电望远镜的同时，大口径亚毫米波射电望远镜是另一个不可或缺的发展趋势。2019年《科学》杂志评选的年度十大科学突破，世界首张黑洞照片位居榜首，而幕后就是由8台亚毫米射电望远镜通过VLBI技术构成的事件视界望远镜（EHT），在南极、智利、墨西哥、美国夏威夷、美国亚利桑那州、西班牙对黑洞进行同时联网观测。ALMA阵列在EHT中相当于一台70多米口径的亚毫米波望远镜，发挥了非常重要的作用。目前，欧洲、日本都有40-50米级亚毫米波望远镜计划，我国也酝酿在青藏高原建一台60米级的亚毫米波望远镜。这些大口径单天线射电望远镜将与阵列射电望远镜在天文观测时形成互补，共同参与解决重要的科学问题。

## 4.3 射电天文在其他学科的应用

射电天文导致的科学发现改变了人们对宇宙及物理世界的认识，同时，伴随射电天文而发展出一系列新的探测技术与方法。这些新技术与方法不但使新的重大科学进展成为可能，而且在通讯、航天等领域得到了应用。

### （1）VLBI 在深空探测及测地中的应用

以上海佘山、乌鲁木齐南山 2 台 25 米望远镜及北京密云 50 米天线、云南凤凰山 40 米天线等一起组成了中国第一代 VLBI 网。随着国内互联网基础设施建设的发展，国内已经实现了多台站 e-VLBI 的观测。佘山-乌鲁木齐两台 25 米望远镜对 SELENE 的同波束 VLBI 实验观测取得了成功，结果显示 X-波段的较差相位延迟的精度比非同波束的结果有了量级的提高。这些进展使得 VLBI 有可能在深空探测、测地以及其他领域发挥更为重要的作用。

### （2）射电天文在空间天气预报中的应用

不同波段的射电天文在探测太阳活动对人类地球环境的影响中发挥着重要作用。国家天文台、云南天文台和紫金山天文台运行多台套、不同波段的太阳射电频谱仪，用于监测太阳活动及日冕物质抛射，为空间天气预报提供实测资料。太阳射电观测和研究已经成为空间天气预报不可缺少的重要组份，并随着航天时代的发展而满足越来越深层次的需求。

### （3）射电望天文在农业中的应用

位于荷兰的 LOFAR 低频阵列射电望远镜有数以万计的天线，这些天线通过大型信息通信设施相互连接。利用这一基础设施，科研人员通过农田内的无线传感器网络监测农作物的微气候，对农作物的微气候开展测量，包括空气压力、温度、相对湿度和照度等。决策支持系统可从气象站和服务器收集无线传感器的信息，帮助农民与作物中的植虫病作斗争。

## 5. 结论与建议

### 5.1 结论

射电天文望远镜作为重大科研基础设施，为天文学的发展提供了重要的观测手段，推动着对重大科学问题的新发现。经过90多年的发展，射电望远镜依然保持蓬勃发展，历久弥新。

从国家规划层面看，美欧等西方发达国家都高度重视对射电天文领域的战略规划。美国正在构建下一代VLA射电阵列（ngVLA），对已建设的ALMA进行性能升级，启动开展新的VLA巡天观测技术（VLASS），部署毫米波和亚毫米探测器等射电天文技术开发，加强对关键射电天文设施区域的射电频谱保护。欧盟和英国重视对SKA及其先导设施如LOFAR、e-MERLIN等的投入，将SKA作为算法开发、工具软件和大数据分析的重要应用平台，将下一代射电天文学家的培养与SKA的发展联系在一起，保持在SKA项目的领先地位，从而实现战略规划的科学愿景。

从项目部署层面看，各国都对射电天文领域保持较大的经费投入。美国NSF近10年资助额度达9.2亿美元，从1968年开始对美国国家射电天文台（NRAO）给出长期稳定的经费投入，如2009-2019年的合同期内给予3.42亿美元的10年运行与维护经费支持，确保美国在射电天文领域的领先地位。欧盟对整合欧洲射电天文望远镜设施形成观测网络的RadioNet项目给予长期稳定的支持，从FP5、FP6、FP7到最新的Horizon2020连续支持，累计投入超过5150万欧元。英国作为SKA的发起国和总部所在地，对SKA给予充足的经费支持，15个投入额度最大的项目中有9个是和SKA的建设及研究相关。我国对射电天文学的研究经费支持力度自2011年后显著增加，但与欧美国家相比仍有较大差距，对重大科研项目 and 重大设施运行没有形成长期稳定经费支持的机制。

从论文产出层面看，美国、澳大利亚、英国、德国保持较高的论文产出，其中美国发文量占全部论文的近30%。美国国家射电天文台、澳洲联邦科学与工业研究组织、荷兰射电天文研究所、中国科学院和印度塔塔基础研究院是发文量排名前5位机构。射电天文研究论文高频关键词分布在射电望远镜的天线设计、脉冲星等的射电信号、射电源巡天观测、星际介质恒星形成等相关研究。高被引论文主要集中在射电望远镜观测方面，如星系测量、射电暴与脉冲星探测等。

从发展趋势看，SKA将构成天文观测能力和科学研究广度的重大飞跃，会主导射电天文学科未来几十年的发展，将在宇宙黎明与再电离时代的中性氢探测、宇宙暗能量研究、星系演化、宇宙磁场起源、利用毫秒脉冲星计时阵探测引力波、宇宙生命起源等方面发挥独特作用。在大口径单天线射电望远镜方面，我国FAST作为目前全球最灵敏的射电望远镜将在未来20至30年保持世界一流地位，并很有可能在SKA建成之前作出重要成果。大口径亚毫米波射电望远镜是另一个不可或缺的重要发展方向，将与阵列射电望远镜在天文观测时形成互补，共同参与解决重要的科学问题。

### 5.2 建议

基于以上分析，对国内天文学界和科研管理者，我们有以下启示与建议：

（1）SKA将主导未来几十年射电天文发展，我国是SKA的创始国和正式成员国之一，除继续参与SKA的建设以外，还应积极布局SKA相应科学问题的研究。

（2）随着FAST的运行，我国射电天文领域具备产出重大原创科学发现的条件，应继续加大对射电天文领域的经费支持力度，并给予稳定支持。

(3) FAST已经在射电低频端占据领先,亟需在高频端(太赫兹频段/亚毫米波段)也有所作为,60米级大口径亚毫米波望远镜的发现空间巨大。

(4) 射电天文望远镜产生海量的科学数据,数据驱动成为科学发现的新范式,我国应注意科学大数据处理的软件工具和与高能计算相关的硬件设备开发。

(5) 射电天文频段的保护对射电天文的长期发展至关重要,我国应充分保护射电天文的关键射电频率,避免无线干扰。

**致谢:** 中国科学院紫金山天文台副台长毛瑞青研究员、国家天文台苟利军研究员对本报告提出了宝贵的意见与建议,在此谨致谢忱!

## 参 考 文 献

- 韩金林等. 2008. 天文学学科发展报告(2007-2008). 北京: 中国科学技术出版社, 121
- 杨戟等. 2013. 中国学科发展战略·天文学. 北京: 科学出版社, 209
- 梅丽, 苏彦, 周建锋. 2018. 极低频射电天文观测现状与未来. 天文研究与技术, 02: 127~139
- 杨戟. 2011. 中国射电天文的研究与发展. 中国科学院院刊, 05: 511~515
- 严俊. 2011. 天文与天体物理研究现状及未来发展的战略思考. 中国科学院院刊, 26(05): 487~495
- 郝钟雄. 2007. 天文望远镜现状及发展趋势. 现代科学仪器, 05: 30~34
- 吴盛殷, 南仁东. 1998. 射电望远镜的发展和前景. 天文学进展, 03: 169~176
- Swarup G. 2015. Major Advances in Radio Astronomy: Some Key Questions Today. Proceedings of the National Academy of Sciences India Section a-Physical Sciences. 85(4):465~481
- Gaensler B M. 2017. The future of Canada's radio astronomy. Nature Astronomy. 1(11):736~738
- Breton R P T. Hassall 2013. The future for radio astronomy. Astronomy & Geophysics. 54(6): 36~39
- Nan R D. 2011. THE FIVE-HUNDRED-METER APERTURE SPHERICAL RADIO TELESCOPE (FAST) PROJECT. International Journal of Modern Physics D. 20(6):989~1024
- Kellermann K I, Moran J M. 2001. The development of high-resolution imaging in radio astronomy. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 39: 457~509
- Blundell R, Tong C Y E. 1992. SUBMILLIMETER RECEIVERS FOR RADIO ASTRONOMY. Proceedings of the Ieee. 80(11): 1702~1720
- Swarup G. 1991. 25 YEARS OF RADIO ASTRONOMY AT TIFR. Current Science. 60(2): 79~94
- Napier P J. 1983. THE VERY LARGE ARRAY - DESIGN AND PERFORMANCE OF A MODERN SYNTHESIS RADIO TELESCOPE. Proceedings of the Ieee. 71(11): 1295~1320
- Payne J M. (1989). MILLIMETER AND SUBMILLIMETER WAVELENGTH RADIO ASTRONOMY. Proceedings of the Ieee. 77(7): 993~1017