

# 澳大利亚射电望远镜的特色

程景全

朱含枢

(中国科学院南京天文仪器厂) (中国科学院紫金山天文台)

## 提 要

澳大利亚射电望远镜是南半球规模最大的一项射电天文观察设施。它包括两个主要部份:一是由6个22米天线组成的致密阵,二是一个可延伸到1380公里的长基线干涉仪。它是世界上最先进的射电仪器之一。本文全面介绍了澳大利亚望远镜的总体布局、天线结构、电性能设计及馈源喇叭等各方面的具体特点,并给出了一些详细数据和图表。

## 一、引 言

澳大利亚射电天文在整个射电天文学发展的过程中曾起过重要的作用。在太阳射电、宇宙射电、天线阵理论、射电成像理论和时变现象的高分辨率观察研究方面都有过卓越的贡献。其中具有代表性的工作如Mills十字天线阵<sup>[1], [2]</sup>, Christiansen干涉栅天线阵<sup>[3], [4]</sup>, Fleurs综合孔径天线阵<sup>[5]</sup>, Culgoora环状天线阵<sup>[6]</sup>和早期获得太阳射电爆发信息的著名的运动频谱仪<sup>[7]</sup>等,这些工作的共同特点是以不大的耗资,在当时的条件下做出了第一流的创造性的工作。

近期,澳大利亚对具有一定历史的Parks 64米射电望远镜进行了结构更新,其工作波长达1厘米以下,同时与另一个可移动的18米天线组成双天线综合孔径干涉仪TEST<sup>[8]</sup>,为设计新的澳大利亚望远镜作了准备。另外,处在Tidbinbilla的NASA 64米天线DSS43与相距195米的34米天线DSS42形成了干涉仪,在Fleurs,在原有的天线阵的东西和南北基线上各增设了4面和2面13.7米天线,使其基线长度增加到7500个波长和2800个波长<sup>[10]</sup>。

在新的发展时期,当美国和加拿大等国以雄厚的实力发展规模巨大的甚长基线天线阵VLBA和CLBA时,澳大利亚根据本国的具体情况,设计了有自己特色的甚长基线和综合孔径相结合的新工程,这就是有名的澳大利亚射电望远镜(AT)。澳大利亚望远镜从总体方案到具体细节均有重要的特色。它具有可变化的干涉基线,并且可以与地球上其他大陆的天线或空间天线进行联测,具有极高的分辨本领和成图能力;同时澳大利亚望远镜可以在很广的频带上,在几个频段同时进行天文观察<sup>[11]</sup>。所有这些都使得AT工程具有与其投资金额相比高得多的作用和地位。

澳大利亚地处南半球,有得天独厚的地理条件。这对于银心的观察;对于最近的伴星系——大、小麦哲仑云的观察;对于两个最近的射电星系——半人马座A和天炉座A的观察;以及对于球状星团——半人马座 $\omega$ 、杜鹃座47的观察均极为有利。借助于威力强大、自成体

系的澳大利亚望远镜，澳大利亚天文学家将会对射电天文学中的一系列重大课题，如恒星的形成和演化，星系的形成，银心的结构细节等作出新的重要贡献。目前我国射电天文工作正在发展，研究澳大利亚望远镜的经验和特色，对我国的射电天文事业有着重要的参考价值。

## 二、澳大利亚望远镜的方案特点

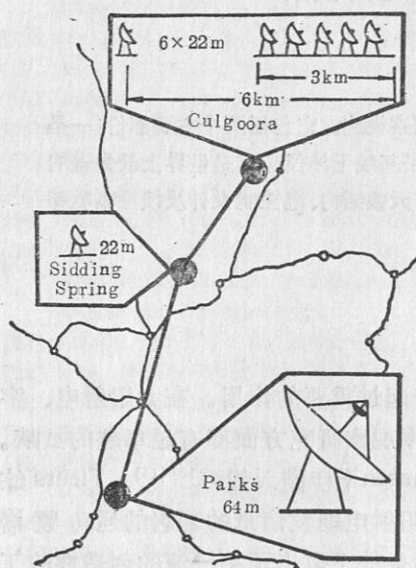


图1. 澳大利亚望远镜的基本布局。

澳大利亚望远镜的早期方案是1975年提出的。

1975年底，在联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的主持下，各学科专家组成了指导委员会，提出了名为澳大利亚综合孔径望远镜(AST)的设想方案，这就是澳大利亚望远镜的前身<sup>[12]</sup>。以后，指导委员会收集和研究了一系列中等口径的天线结构设计，并进行了经费估算。指导委员会的基本思想是：新的望远镜要充分体现澳大利亚的特点，以显示它与其他望远镜的不同之处。1981年，CSIRO对望远镜方案作了实质性的修改，名称也正式定为澳大利亚望远镜。1982年政府通过了这一方案，并且成为1988年澳大利亚独立200周年的重点工程之一。

澳大利亚望远镜的基本布局见图1。它包括两个基本部份，第一部份是一个致密阵(compact array)，第二部份是一个长基线阵(long baseline array)。它的致密阵部份是一个最大基线为6公里的线阵，线阵共有6个结构相同的口径为22米的天线，其中5个天线集中在一段长度为3公里的基线上。

在进行观察时，5个天线可以有35个精确的天线位置，各个位置的精度均在毫米级。同时，第6个天线也有两个固定的观察位置。利用3公里的干涉基线，借助于数据处理技术，可以在4天的时间内获得一张天区的图像。致密阵的分辨本领与光学望远镜相当，所以特别适用于光学、射电的全波段研究。当需要对某一天区进行重点研究时，澳大利亚望远镜将应用其第二部份，即长基线阵部份。长基线阵又包括两个部份，一是本体部份，二是其延伸部份。长基线阵的本体部份包括位于Culgoora的致密阵、位于Siding Spring的新建的22米天线和位于Parks的64米天线。本体部份的最大基线为319公里。其延伸部份包括位于Tidbinbilla的64米和34米以及位于Hobart的26米天线。本体部份加上延伸部份其最大基线达1380公里。实际上澳大利亚望远镜还可以进一步延伸，实现与其他大陆的全球干涉以及和射电卫星QUASAT的空间干涉。这样，澳大利亚天文学家就掌握了一具威力强大的射电缩放尺，随意地使用这具缩放尺，就可以获得射电源的最精细结构。

表1和表2表明了澳大利亚望远镜的致密阵和长基线阵的具体特性。从表中可以看出，澳大利亚望远镜具有广阔的使用波段，波段范围包括从0.3到50GHz，以后还将发展到116GHz。这些波段范围几乎包括了所有的重要谱线。此外，澳大利亚望远镜还可以进行双频道同时观察，并且它的总体布置决定了它的成图质量具有高的动态范围以及高的极化性能。

表 1 致密阵的基本参量

位置:	Culgoora, NSW
天线:	6×22米, 地平式装置, f/0.32
最大基线长度:	6 公里
基线数目:	15
波段范围:	90cm, 50cm
	20/13cm(L/S) 1.25—1.78; 2.2—2.5GHz
	6/3cm(C/X)4.4—6.1; 8.0—9.2GHz
	12/7mm(K/Q)20—25.5; 42—50GHz
	3.5/2.6mm(W/F)84—98.5; 105—116GHz
每一天线的中频通道数:	4
每一基线提供的信息种类数:	8
每种信息的频道数——	1bit, 2 <sup>16</sup> MHz 时: 16
	2 bit, (128/n)MHz 时: 16n(n=2 <sup>0</sup> →2 <sup>7</sup> )
	2 bit, 1或0.5MHz时: 1024
10GHz时的特性——	
	主波束直径: 6arcsec
	综合波束直径: 0.8arcsec
	系统温度: 50K
	均方根噪声(4×12小时, 2×256MHz): 15μJy

表 2 长基线阵的基本参量

位置和等价口径:	
长基线阵 (Culgoora, 54米)	
(Side Spring, 22米)	
(Parks, 64米)	
延伸部份 (Tidbinbilla, 64/34米)	
(Hobart, 26米)	
最大基线长度:	319公里(加延伸部份为1380公里)
波段范围:	同致密阵
每一天线的中频通道数:	4
每一基线提供的最大信息种类数:	8
每一天线的最大中频数据采样率:	256Mb/S
相关器特性——	
	频宽(64/n)MHz, 采样, 2bit(n=2 <sup>0</sup> →2 <sup>7</sup> )
	6条基线(每一基线信息种类数≤8)
	频率通道数=16384/频宽/信息种类
	12条基线(每一基线信息种类数≤4)
	频率通道数=8192/频宽/信息种类
	24条基线(每一基线信息种类数≤2)
	频率通道数=4096/频宽/信息种类
10GHz时的特性(包括延伸部份)——	
	综合波束直径: 0''.004arcsec
	系统温度: 50K
	均方根噪声(12小时, 2×16MHz): ~40μJy

### 三、天线的结构和面板

从规模上看,澳大利亚望远镜比美国的VLBA要小得多,但是澳大利亚望远镜确是很有特色的射电仪器。它的设计与安排充分考虑了射电天文观察对望远镜所提出的特殊要求,并且它的天线结构和天线电磁性能的设计也充分考虑了这些要求。射电天线与其他天线完全不同,一般要求有较宽的波段范围。特别是澳大利亚望远镜,工作波段很宽。射电望远镜还同时要求有很高的指向和跟踪精度。为了实现对天区目标的不同波段的观察,澳大利亚望远镜要求各天线能迅速地改变工作波段,在一定波段能够实现同时观察。此外,澳大利亚望远镜还要求各个天线有最大的天线增益,较低的旁瓣,低的噪声温度。所有这些都使得射电望远镜天线设计的要求远远高于其他种类的天线,如卫星通讯天线、雷达天线等。当然卫星通讯天线和雷达天线也有各自的要求。这些天线一般要求能够在任何气候条件下稳定地工作,同时雷达天线的扫描速度要比射电天线高得多。对于射电望远镜来说,在不适宜的气候条件下,望远镜可以关闭,固定在一定的方位和高度角上。澳大利亚望远镜天线的最早设计沿袭了荷兰韦斯特伯克(Westerbork)天线的形式<sup>[11]</sup>,唯一的改进是采用了地平式支架装置。在这种天线结构中,大块的天线面板直接焊接在天线的背架上。全部传动系统包括叉臂、支架都是钢板焊接结构。天线的地平装置包括一垂直的心轴和一地平径向轴承。

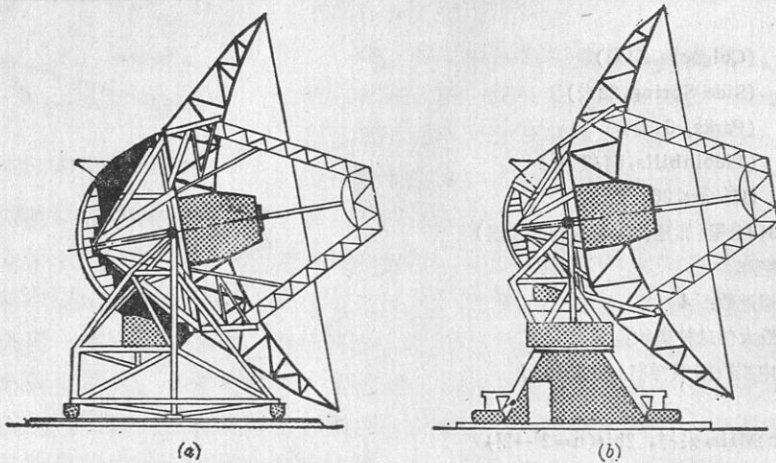


图2. (a)AT移动式的天线结构; (b)AT固定式的天线结构。

早期的天线结构设计在很多方面均不能满足澳大利亚望远镜进行天文观测的需要。第一,天线面板的焊接很难保证面板的高精度;当天线面板精度要求高时,单块面板的面积越大,面板的成本和加工难度也急剧增大;第二,钢板焊接的箱形结构在太阳辐射的影响下,会产生极为有害的热变形,从而影响望远镜的指向和跟踪性能;第三,心轴和径向轴承式的地平装置的支撑直径小,在风力和温度的影响下,望远镜的指向性能不够稳定;第四,在原设计中,固定式的馈源装置不适应多频道的天文观察要求。根据这些问题,AT的天线结构作了重大改变,从而发展为澳大利亚望远镜现在采用的移动式和固定式的两种天线结构形式。澳大利亚望远镜天线的 redesign 如图2所示。这种新的结构设计,有如下几方面的特点:(1)天线面板具有较小的尺寸,并采用了特殊的复制加工方法,提高了加工精度,降低了面板成本;

(2) 天线面板与天线背架用可调的螺钉联结, 在天线面板上不产生附加应力, 可以提高天线面板的精度和稳定性; (3) 增大了天线背架的轴向尺寸, 使背架结构有较大的尺寸稳定性。在背架结构设计上, 采取了与副面支撑结构分离的措施, 从而改善了背架的变形状况; (4) 固定式天线应用了轮轨式的结构, 不但成本较低, 同时还减少了温度梯度的影响。其实际地平轴承是地面的轮轨, 因此有很大的轴承直径; (5) 移动式天线较难应用轮轨式结构, 由于大型精密轴承的直径增长使生产成本急剧增加, 所以采用了直径为 4 米的大型地平支承轴承。这一考虑既满足了指向精度的要求, 又不致于采用特别昂贵的大直径轴承; (6) 应用高精度的轴角编码器, 从而避免了各轴系中应用精密、昂贵的齿轮或蜗轮系; (7) 旋转式的馈源装置大大方便了天线系统使用频率的改变。在 AT 天线的两种结构中, 固定式结构的指向误差小, 其误差值为移动式的 70%。

在天线结构的设计中, 特别应该提及的是 AT 的天线面板。AT 天线的口径为 22 米。全部面板分为两个部份, 其中心部份直径为 12 米, 面板尺寸较小, 具有较高的精度。这一部份面板共三圈, 计 64 块。面板的均方根误差为  $0.15\text{mm}^{[13]}$ 。天线的外部尺寸较大, 精度较低。为了减小风力对望远镜的影响, 外圈的面板上冲有直径为  $2.84\text{mm}$  的小孔, 小孔的面积占面板面积的 41%。外圈面板共 96 块, 表面的均方根误差为  $0.24\text{mm}$ 。AT 望远镜适应射电望远镜天线面板小批量生产的特点, 采用了专用的可调式的组合面板模具。组合模具长 2.3 米, 宽 2.1 米, 共有 581 个可调精密螺杆装置, 以适应面板表面不同的曲率变化要求。在天线面板的胶铆过程中, 为了使面板在径向和切向均能够与模具表面贴合, 面板沿径向分割为带宽等于  $400\text{mm}$  和  $500\text{mm}$  的带区, 每一带区使用单独的铝板, 同时面板支承框架采用了拉伸预成形工艺, 增加了面板的稳定性。应用这种新的工艺和方法, 面板的成本大大降低, 同时满足了望远镜在不同波段使用的要求。

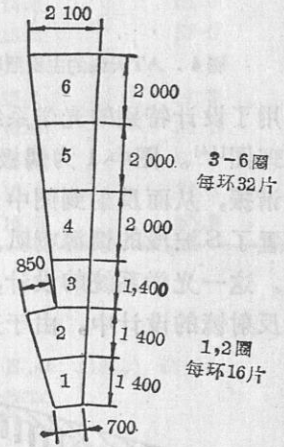


图 3. AT 天线的面板安排。

#### 四、天线的电特性和馈源

AT 望远镜具有极为广阔的工作波段, 这一波段范围可从  $327\text{MHz}$  一直到  $115\text{GHz}$ 。在 1988 年, 望远镜将首先用于 L、S、C、X 四个波段, 低于  $1\text{GHz}$  的三个波段, 即  $327\text{MHz}$ 、 $630\text{MHz}$  和  $843\text{MHz}$  的实现具有一定困难, 具体安排还没有最后确定。

AT 望远镜天线采用修正型的双反射面的光学系统。这种光学系统结构紧凑, 天线噪声温度低。通过对面型的形状控制, 可以获得不同的主面照明分布。在综合孔径望远镜和长基线干涉仪的设计中, 如何获得最大的天线增益是主要的考虑因素, 而天线的旁瓣电平则不要求最低。AT 天线的主面照明分布如图 4 所示<sup>[15]</sup>。在这种分布中, 口径场的绝大部分区域内为均匀分布, 从而使望远镜具有尽量大的口径效率。在口径的外边缘, 辐射场逐渐衰减, 这样天线旁瓣电平较低, 抑制了天线的噪声。在口径中心的遮挡区内, 口径场也采取了特别的设计, 这样可以减小天线的驻波比。

在澳大利亚望远镜的设计中, S 和 X 波段的双频观察是电性能设计中的一个基本要求。对于 S 和 X 波段的频率范围, 高效率的双频馈源喇叭是很难实现的。为此, AT 望远镜各天线

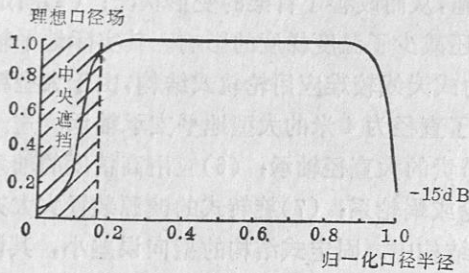


图 4. AT天线的主面照明分布。

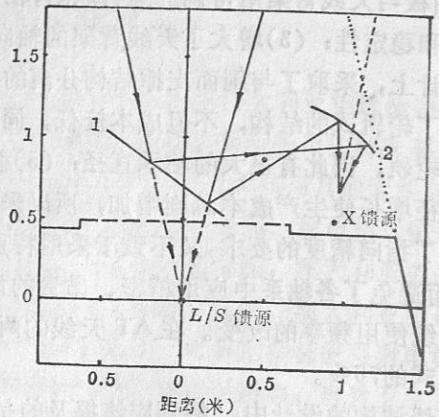


图 5. S和X波段的双频工作示意图。

采用了设计特别的光学系统，以达到在两个波段上同时观察的要求。图 5 是这种工作系统的原理图<sup>[14]</sup>。图中 1 为偶极子阵列式的波束分离器，对于较高频率的 X 波段，波束分离器会产生谐振，从而反射到图中 2 的反射镜上。波长较长的 S 波段则透过滤器到达焦点，焦点上放置了 S 波段的馈源喇叭。X 波段的辐射经反射镜会聚于偏置焦点上，到达 X 波段的馈源喇叭。这一光学系统的设计，大大减小了馈源设计的工作量，降低了部件成本。在波束分离器 and 反射镜的设计中，由于采用了球面波展开方法，取得了系统的最大增益和最小旁瓣。

在澳大利亚望远镜中，各天线采用了旋转馈源装置。旋转馈源装置便于工作波段的变换，但是它的尺寸限制了喇叭馈源的数量。在 AT 望远镜中，主要喇叭均采用频带特宽的异形波纹喇叭。四个喇叭覆盖了望远镜的八个主要波段，即 L 和 S，C 和 X，K 和 Q，W 和 F 波段。在四个喇叭中，工作频宽均达 2:1，大大超过了一般设计的普通波纹喇叭。在 L 和 S 波段，由于喇叭的尺寸大，因此专门设计了尺寸压缩的异形喇叭。同时在加工中采用了特殊工艺，使得 L/S 波段的喇叭仅仅具有 C/X 波段喇叭相同的自身重量。这样大大减轻了天线结构设计的难度。图 6 所示为 L/S 波段的波纹喇叭的截面形状。

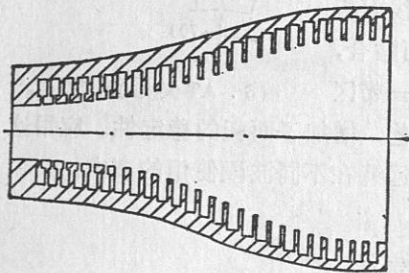


图 6. L/S波段的喇叭截面。

澳大利亚望远镜的天线设计综合了当代其他射电望远镜的结构设计和电性能设计的优点，代表了当代天线设计的先进水平。表 3 列出 AT 望远镜天线的预期性能。在表中，S 波段电性能较低。这是因为 L/S 喇叭的位置是相对于 L 波段设计的，对于 S 波段，馈源中心有一定的偏移。在 AT 结构中，副反射面可以进行调节，因此 S 波段的实际效率可以比表列数值提高 10%。

澳大利亚望远镜是一项有世界影响的大型望远镜工程项目，全部工程造价达 4300 万澳元 (1985 年价格)。目前望远镜主要天线已经进入安装阶段，到 1988 年就可以进行第一次试验观测，这必将对南天的射电天文学的发展发挥极为重大的作用。

澳大利亚望远镜是一项有世界影响的大型望远镜工程项目，全部工程造价达 4300 万澳元 (1985 年价格)。目前望远镜主要天线已经进入安装阶段，到 1988 年就可以进行第一次试验观测，这必将对南天的射电天文学的发展发挥极为重大的作用。

表3 AT天线的预期性能指标

频率(GHz)	天线效率	天线温度		系统温度(K)	旁瓣电平(dB)	增益 (dB)
		天顶(K)	80°(K)			
0.327	0.40	51	85	40	-15.0	33.6
0.403	0.49	31	85	40	-15.3	36.4
0.650	0.55	13	58	40	-16.3	40.9
1.25	0.66	7	19	25	-15.6	47.4
1.5	0.69	7	19	25	-15.4	49.1
1.8	0.62	7	19	25	-15.5	50.3
2.1	0.52	7	19	25	-14.9	50.9
2.3	0.51	7	19	30	-14.3	51.6
2.5	0.53	7	19	30	-13.2	52.5
4.4	0.65	7	18	35	-15.4	58.3
5.9	0.72	7	19	35	-16.0	61.2
7.4	0.65	7	20	40	-16.7	62.8
8.8	0.64	7	29	50	-16.1	64.3
10.6	0.65	7	30	50	-15.0	65.9

## 参 考 文 献

- [1] Mills, B. Y., Little, A. G., Sheridan, K. V. and Slee, O. B., *Proc. I. R. E.*, 46 (1958), 67-84.
- [2] Mills, B. Y., Slee, O. B. and Hill, E. R., *Aust. J. Phys.*, 11 (1958), 360-387.
- [3] Christiansen, W. N. and Warburton, J. A., *Aust. J. Phys.* 8 (1955), 474.
- [4] Christiansen, W. N., Mathewson, P. S. and Pawsey, J. L., *Nature*, 180 (1957), 944.
- [5] Christiansen, W. N. and Hogbom, J. A., *Proc. I. R. E.*, (1963).
- [6] Wild, J. P., *Proc. R. Soc. (London)*, A 84 (1961), 262.
- [7] Wild, J. P., Murray, J. D. and Rowe, W. C., *Aust. J. Phys.*, 7 (1954), 439.
- [8] Frater, R. H., *Proc. Astro. Soc. Aust.*, 5 (1984), 440.
- [9] Batty, M. J., Jauncey, D. L., Jauncey, M. J., Rayer, P. T. and Gulkis, S., *A. J.*, 87 (1982), 938.
- [10] Jones, I. G., Watkinson, A., Egau, P. G., Percival, T. M., Skellern, D. J. and Graves, G. R., *Proc. Astro.Soc. Aust.*, 5 (1984), 574.
- [11] Cooper, D. N. and Guoth, N., IREECON'85, IREE 20th Convention, Melbourne, (1985), 709.
- [12] Whiteoak, J. B., *Proc. Astro. Soc. Aust.*, 6 (1986), 290-297.
- [13] Parsons, B. F. and Yabsley, D. E., IREECON'85, IREE 20th Convention, Melbourne, (1985), 716.
- [14] Kennedy, R. A. and Cooper, D. N., IREECON'85, IREE 20th Convention, Melbourne, (1985), 720.
- [15] James, G. L., IREECON'85, IREE 20th Convention, Melbourne, (1985), 713.

(责任编辑 林一梅)

## Characteristics of the Australia Telescope Project

Cheng Jingquan

(Nanjing Astronomical Instrument Factory, Academia Sinica)

Chu Hanshu

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

The Australia Telescope is the largest radio astronomical facility in the southern hemisphere. The telescope comprises two main parts, a Compact Array(CA) and a Long Baseline Array (LBA). The CA contains six 22 m antennas. Five of these will be mobile along a 3 km rail track, the sixth will be mobile along a small rail track (75m) located 3km west of the main track. The LBA is formed by combining the CA with both a 22 m antenna near Siding Spring and a 64 m Parks radio telescope. It has a maximum baseline of 1380 km(with add-ons). The AT project absorbs many features of the world main radio telescopes, therefore it is an advanced radio telescope, not only on the aspects of the telescope design, but also on the aspects of the antenna structural design and antenna electromagnetic performance. In this paper, the general characteristics and special features of the telescope are introduced in detail. These include the telescope arrangement, the antenna structure, the optical design and the feed horn arrangement,