

一个跨世纪工程：新一代射电望远镜计划

吴 盛 殷

(中国科学院北京天文台 北京 100080)

摘 要

在国际无线电科联 (URSI) 于 1993 年 9 月在日本京都召开的第 24 届大会上, 射电天文专门委员会 (COMM.J) 作出了成立大射电望远镜工作组 (LTWG) 的决议, 以推动和促进跨世纪的新一代射电望远镜 (NGRT) 工程的研究和准备, 这是一项广泛国际合作的巨大科学计划, NGRT 的主要性能将比现有的, 以及计划建造的最先进的射电望远镜还优一到两个数量级。本文拟介绍该计划的历史渊源和技术梗概, 希望能有助于我国天文界积极参与该项目的国际合作。

关键词 技术: 射电天文学 — 望远镜

1 射电天文的探索、成就和挑战

自 Jansky 于 1932 年探测到银河射电, 62 年来射电天文由于立足于地面观测设施, 它们较之任何空间计划需要的建造和运转费用低得多, 且更易于设备更新和性能改进, 又能利用通讯及军事领域中发展和研究的最新技术, 而且在相当宽的频率范围内可以采用相似的技术, 却又能探测到不同的现象, 所以其技术方法和手段已经有了长足的进步和发展。射电望远镜的主要性能约有十个量级的改进, 并取得如下的主要成就和发现^[1]:

- (1) 探测了许多星系的结构和大小;
- (2) 发现了类星体;
- (3) 发现了脉冲星;
- (4) 发现了 2.7K 微波背景辐射;
- (5) 证实了广义相对论所预言的引力辐射和双中子星系统的轨道衰变;
- (6) 探测到引力透镜;

(7) 探测和发现了 OH、H₂CO、CO 等数十种星际分子，发现了巨大的分子云及星际分子脉泽源；

(8) 发现并广泛探测了太阳和木星的射电爆发以及金星的温室效应 (greenhouse effect)。因此，从 1901 年开始颁发诺贝尔物理奖以来，近 26 年获物理奖的项目有 7 项涉及天文学，而其中竟有 5 项直接或主要通过射电天文手段取得，也就不足为奇了 [2]。

目前，新的保形技术可以使百米级抛物镜面工作到毫米波段，接收机噪声温度在厘米波段已达到 15K，在某些情况下，主要噪声源已不在前置放大器，而是来自背景、干扰或前端接插件的热噪声。预期本世纪末 HEMT 低噪声放大器及 SIS (低温超导结)，将在毫米波段取代现在广泛使用的 Schottky 二极管混频器。即将建成的美国 NRAO 100m 望远镜 (GBT) 会成为世纪之交时世界上最有威力的单镜面射电望远镜，多馈阵技术使单镜面射电望远镜 (特别是毫米波望远镜) 的成像速度和观测效率大大提高了。射电望远镜的空间分辨率及成像速度的提高，当然主要靠综合孔径系统及 VLBI 网的发展，1980 年投入工作的美国 VLA 及 80 年代完成改造的英国 MERLIN 是综合孔径系统的杰出代表，一直活跃在射电天文学研究的前沿。而 1994 年全面投入观测，由 10 面分布在美国境内的 25m 天线组成的甚长基线阵 (VLBA)，又是一个高效的 VLBI 系统。射电望远镜灵敏度的提高，主要取决于天线的总接收面积，1996 年即将完工的印度大型米波射电望远镜 (GMRT)，将使其在米波段的灵敏度较 VLA 提高一个数量级。射电望远镜向高低频率的扩展是其发展的另一个方向，已经有近 30 面孔径 10m 以上的毫米波或亚毫米波望远镜在工作，最著名的当推日本 Nobeyama 的 45m、德、法、西班牙的 IRAM 在 Pico Veleta 的 30m 及德美合作的亚毫米波望远镜 SMT(10m)；几个初具规模的毫米波综合阵，如 IRAM 5 × 15m、NRO 6 × 10m 和 OVRO 4 × 10m 仍在不断得到改进和扩展。正在紧锣密鼓动员国际合作以准备在 1996 到 1997 年发射的空间 VLBI 计划，如日本 VSOP 及俄罗斯的 RADIOASTRON，还有毫米波 VLBI 的发展和完善，将使 VLBI 的分辨率达到 10 μ as 量级。

总起来看，60 余年来射电望远镜的整体性能有了巨大的改进 [1,3]，其观测灵敏度提高了 10¹² 倍，平均每十年有约 75 倍的提高，而分辨率则由 Jansky 时的约 30 度改善到 VLBI 的约 100 μ as (大概 10⁹ 倍)，平均每十年改进约 30 倍。射电望远镜主要性能随年代的发展，完全符合广义的设备性能因新技术的发展和引进而随年代发展的关系曲线—Livingstone 曲线 (图 1)，这是一个表示设备性能 (如射电望远镜灵敏度、计算机速度、存储器容量等) 随时间呈指数律增长的曲线，表示于该性能的对数—时间的坐标系中。虽然任一类型的设备或技术随时间的推移终将达到一定程度的饱和 (如图中的细虚线)，但新技术或新工艺的发现和引进 (以图中的 T_n , $n=1,2,3,4,\dots$ 来代表)，又必然引起相应性能的跃进或超越 (如图中的粗破折线)。实际上射电望远镜灵敏度随年代的发展，可以用下面的经验公式来描述 [4]：

$$\Delta S = 10^6 \exp[-0.46(t - t_0)] \text{Jy}$$

其中 $t_0 = 1932$, t 为年代。根据灵敏度的这一发展趋势曲线，有理由期望 21 世纪之初，出现灵敏度高于目前最先进设施 1~2 量级，成像速度和分辨率也有显著提高的射电望

望远镜，这是射电天文发展的历史趋势，是对这一代和下一代射电天文学家提出的挑战。

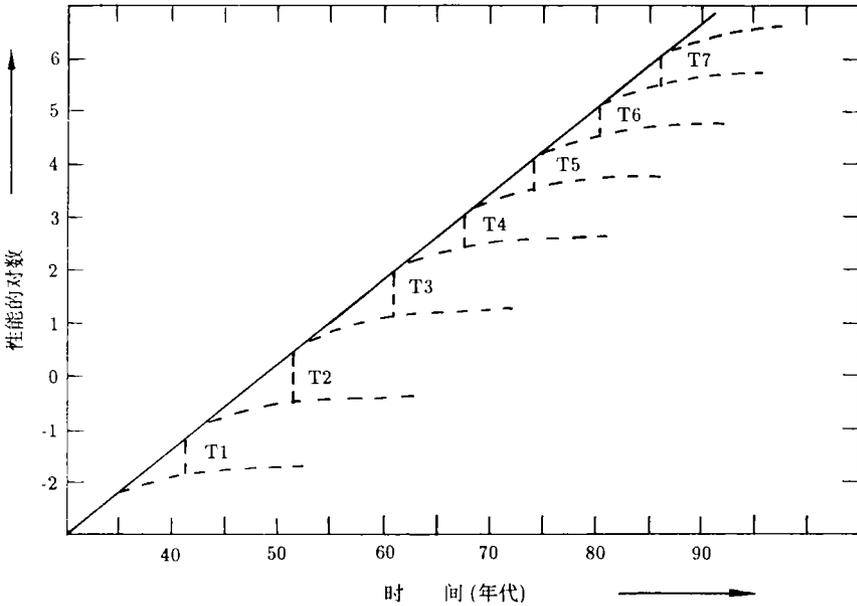


图 1 表示一般的设备性能因新技术的发展和引进而随年代发展的关系曲线 Livingstone 曲线 (T_n 代表有关的第 n 次新技术或新工艺的引进)

2 走向 21 世纪的射电天文学 [5]

面向世纪之交，新的射电望远镜计划可能沿着下述三个方向之一进行：

(1) 建造更大的毫米 / 亚毫米波阵。除了美国已经提出并准备实施的 MMA($40 \times 8\text{m}$ 毫米波阵) 和 SMA($6 \times 6\text{m}$ 亚毫米波阵) 外，日本、加拿大以及荷兰的部分射电天文学家正在酝酿的大(亚)毫米波阵(LMA)，都以(亚)毫米波深空巡天及特殊源的高分辨率成像为主要目标。

(2) 建造极高灵敏度的米波 分米波 长厘米波望远镜，正在酝酿的 NGRT 或 LT 计划就是这种类型的望远镜，它们将以不同宇宙距离 ($z = 0 - 10$) 的中性氢分布，原星系及原星系团、暗物质、射电宁静天体等的高灵敏度探测为主要目标。

(3) 实施进一步的空间射电望远镜计划，比如建造比 VSOP 及 RADIOASTRON 更先进的空间 VLBI 站(网)，以获得更高的分辨率及动态范围；建造低频空间阵(LFSA)、大型可展空间红外 / 亚毫米波望远镜(LDR)、亚毫米波空间阵(SSMF)等，其目的不外尽量减少地球大气层及电离层对高质量观测的影响，向地面可观测频率的高低端尽可能扩展有效观测范围。

无论选择哪一个发展方向，都可能给射电天文学带来新的突破。目前通过对 CO 线的观测来推断氢分子含量的研究，已经达到相当远的河外射电星系 ($z = 0.16$)，毫米波

与亚毫米波大天线阵的发展，将为河内外分子谱线、恒星形成及演化、分子脉泽和超脉泽源的观测研究开拓更宽的领域。将观测向亚毫米波的延伸，不仅可观测更多的分子谱线，而且可观测到星际及星系际尘埃的辐射，甚至可能以此作为直接测量星系质量的常规方法。而利用大毫米 / 亚毫米波阵的深空巡天，结合已有的厘米波巡天结果，可能为射电天体物理带来绝不亚于六七十年代曾经获得的那样辉煌的发现和新的突破^[6]。

中性氢 (HI) 是宇宙中最丰富的物质，早在五六十年代，人们就利用其在 1420MHz 的发射线进行了银河系及邻近星系的中性氢分布及运动学探测，得到了银河系及一些星系的结构形态和动力学特性。在较低频率以更高灵敏度及分辨率进行探测，将可能得到宇宙早期的演化图景，不同距离 ($z = 0 - 10$) 的中性氢分布与运动学的研究，可能探测到原星系及原星系团，并有助于给出有关星系及星系团的形成次序及演化的答案，对暗物质的观测有可能提供有关宇宙中短缺质量 (missing mass) 的信息。立足于高灵敏度射电望远镜的观测，河外射电源计数可以接近宇宙边缘，宇宙模型及其参数可以得到更好的检验和更精确的测定。迄今还被认为是射电宁静的星系、恒星、以及更多得多的脉冲星也将可能探测到。这一切都将给天体物理的研究带来突破性的成就。

空间 VLBI 及其他空间计划的实施，将把角分辨率提高到 $10\mu\text{as}$ 量级，并不同程度地突破了地球大气层的屏障^[7]。从而使我们有可能获得活动星系核 (AGN) 宽发射线区 (BLR) 以内的精细结构，为 AGN 引力中心处的磁场、喷流进动模型以及喷流单边性成因的研究提供更多的观测证据。空间探测也使我们得以探测到射电星系和类星体外围的低亮度延伸结构。极高精度的天体测量通过观测河外超脉泽源将传统的视差测距法延伸至河外，从而有可能精确推断哈勃常数值，并最终解决宇宙年龄的争端。大样本致密射电源角径的测定和统计，已经并将进一步确定减速因子 q_0 的约束条件，从而了解宇宙膨胀的性质。这一切也将给天体物理学和基本天文学的发展以强有力的冲击和推动。

3 新一代大射电望远镜的提出

90 年代以来，愈来愈多的射电天文学家意识到，需要某种真正国际合作的新一代大射电望远镜，以深入天体物理探测，迎接天体物理在新世纪发展的挑战。例如印度人提出了“国际射电天文望远镜” (ITRA) 或“国际迈格 (兆) 望远镜” (IMT) 的概念^[8]；英国继作为国家级观测设施的多单元无线电连接干涉网于 80 年代完成改造之后，提出了所谓“氢阵” (Hydrogen Array) 的概念^[9]；美国则在 GBT、MMA 和 SMA 等实施或准备实施之后，在进行着将来究竟是发展空间 VLBI 还是建造巨型地面射电望远镜为主的讨论；荷兰天文界经过几年讨论和学术论证，则把“新一代射电望远镜” (NGRT) 或一度由他们建议命名的“Oort 射电望远镜”列为待现有天文观测设施计划基本完成 (即 1997 年之后) 最优先的考虑项目^[10]，并且于 1993 年 5 月 Dwingeloo 射电天文台 (NFRA) Strom 博士访问中国科学院北京天文台时，正式建议该台参与上述计划的合作；此外，澳大利亚、加拿大等国射电天文学家也在考虑和讨论下一代射电望远镜的各种设想^[4]。

正是在各国射电天文学家所表达的共同意愿的基础上，国际无线电科联在日本京都市召开的第 24 届大会中，射电天文专门委员会 (Comm. J) 专门组织了题为“第三个千

年(即 2001 年以后)的射电望远镜”的学术报告及讨论会(Session J2), 探讨下一世纪射电望远镜的发展前景, 并作出成立 LTWG 的决议, 目前该工作组由包括澳、加、中、法、德、印、荷、俄、英及美十国代表组成, 将进行为期三年的工作, 以深入探讨拟议中的新一代射电望远镜的科学目标, 研究其能取得最大科学成果的技术性能和设计思想, 确定并尽可能解决以合理的价格建造此超高灵敏度射电望远镜所面临的技术挑战, 并协调实现既定目标中的国际合作^[11]。该工作组每年进行两次工作会议, 并设专门电子信箱, 会议和信箱都向全世界天文学家开放。

至此, 以广泛国际合作为基础, 为 NGRT 进行详细科学论证及技术方案的可行性论证的研究正式开始。预期这样一个大射电望远镜将立足于最先进的电子、数字、计算机及图像处理技术基础之上^[12], 具备的主要指标超过现已有和计划中的射电望远镜一到两个数量级(如灵敏度和成像速度), 而又以国际射电天文界可接受的造价, 于 21 世纪头十年中建成。

当然, NGRT 或 LT 计划, 只是跨世纪射电望远镜发展的方向之一, 在面临 21 世纪射电天文学课题深化和发展的挑战中, 它绝不可能完全取代大毫米/亚毫米波天线阵及空间射电望远镜的发展。正因为如此, 在国际无线电科联第 24 届大会中, 射电天文专门委员会(Comm. J)还同时作出成立 LMSA(大毫米/亚毫米波天线阵)工作组的决议, 以推动在其科学目标、可行技术的研究和对射电视宁度评估中的国际合作。

4 新一代射电望远镜(NGRT)的初步设想^[13]

以高红移中性氢、远宇宙天体、原星系和原星系团的观测研究为主要目标的 NGRT, 其主要特色是有极高的灵敏度及巨大的电磁辐射接收面积: 约 $1(\text{km})^2$ 。下面分别简单地介绍它的主要技术目标、组成概念和可能的观测模式。

4.1 NGRT 的技术目标

(1) 工作频率从 0.2--2GHz 连续覆盖, 进而扩展到 5GHz;

(2) 全偏振测量功能;

(3) 总接收面积达 $1(\text{km})^2$, 流量灵敏度约为 $1\mu\text{Jy}$;

(4) 多层次可供选择的角分辨率: 从用于星际介质(ISM)观测的 $1'$, 主要用于河外分子谱线源及星系际分子云的 $1''$, 用于河外连续谱源成像观测的 $0''.1$, 到用于 VLBI 观测时的 $10\mu\text{as}$ 量级;

(5) 最大可能的天空覆盖及跟踪范围;

(6) 对 10kHz 量级的带宽, $1\mu\text{Jy}$ 的流量灵敏度, 在角分、角秒及亚角秒的角分辨率, 分别对应 mK、K、及 100K 量级的亮度灵敏度。

(7) 不同带宽和谱分辨率的连续谱和谱线接收功能。

4.2 NGRT 的组成概念

由其技术目标所决定的 NGRT 将用分布在三五十公里到二三百公里的 30 余个群集单元(grouped units)组成总的射电望远镜(图 2); 每个群集单元(如图 3 示意)的直径大约为 300m, 群集单元则根据波长覆盖、衍射损失、馈源的主焦配置及造价等综合因

素权衡，最终可能由表 1 所列传统的射电望远镜反射面的某一种组合来构成。

为了降低造价，每个组元的精度只要保证能工作在 2GHz，可以最大限度地简化背架和传动结构。抛物面组元的馈源将采用对数周期振子(阵)或方棱喇叭(阵)，为了减少前置低噪声放大器及低温部件的数量，对小孔径抛物面可采用多组元共用传动结构。多方向束调相模式仅在用超大规模集成电路实现极大容量的相关器的条件下可以采用。

各群集单元和组元与相关器间的连接用光导纤维或无线电传输方式。

4.3 NGRT 可提供的观测模式

多方向束调相的可能性和分布疏密不同的群集单元组合，为射电天文学家提供了多种观测模式：

(1) 巡天模式

相关器给出各群集单元的自相关，每个群集单元相当于直径约 200m 的单元工作，并可对向不同的目标；在多方向束调相的情况下，相关器同时提供各群集单元多方向束的自相关，从而使巡天同时在大体相当于单元天线的视野中进行。

(2) 基本阵模式

较密集排列在中心约 30 × 50km 地区的 30 来个群集单元称之为基本阵，单束或多束群集单元输出的互相关，可用来作为 30 × 50km 二维综合阵的单束或多束观测。它将具有很好的成像动态范围、角分辨率和灵敏度。

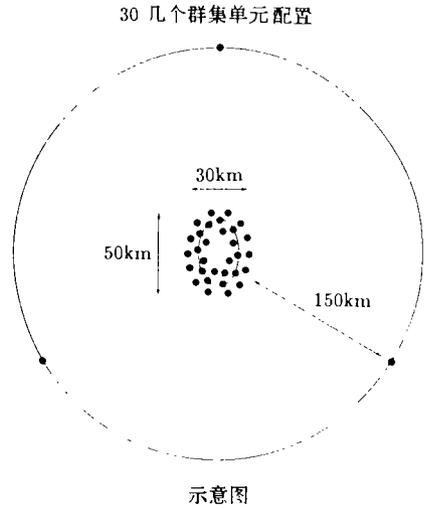


图 2 NGRT 的总体配置概图

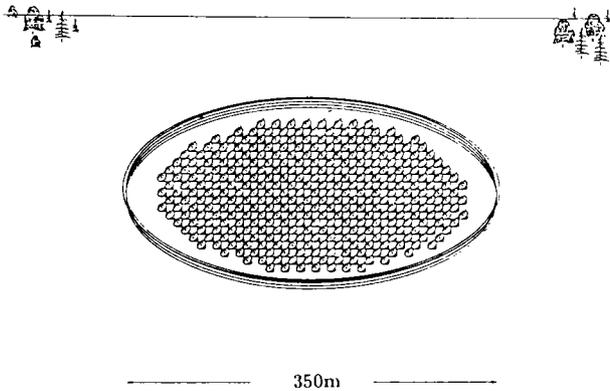


图 3 一个群集单元的示意图

(3) 扩展阵模式

基本阵加上距离中心区一百余公里的几个群集单元组成的综合阵就是扩展阵，它比

基本阵有 4-5 倍高的角分辨率和更好的灵敏度。

(4) VLBI 组元模式

由基本阵组成同相阵输出, 并配以时间比对和时标装置作 VLBI 组元, 将等效于直径约为 1km 的射电望远镜, 这时利用整体条纹拟合 (global fringe fitting) 技术, 可以把现有的 VLBI 网的观测灵敏度提高三四倍到一个量级, 它和 10m 级的空间 VLBI 站相关, 可以得到 100m 的相关接收面积, 从而大大增加空间 VLBI 可观测源的数目。一旦有条件发射更高的轨道天线, 例如建立孔径 2-3m 的月球射电望远镜, 则有希望将现在拟议中的空间 VLBI 分辨率提高近一个量级。

表 1 一个群集单元 (如图 3 示) 的可能组成^[14]

群集单元类型	组元的类型	组元个数	组元的孔径	概估价格 (MD)
球面	球面	1	~ 400m	~ 8 ⁽¹⁾
抛物柱面	抛物柱面	1	~ 400m	
(多束) 调相阵	抛物面	16	50m	~ 6.3
(多束) 调相阵	抛物面	64	25m	
(多束) 调相阵	球面	64	50m	
(多束) 调相阵	抛物面	256	12.5m	~ 1.6
(多束) 调相阵	抛物面	930	7m	~ 2.79 ⁽²⁾
调相阵	“瓦片”天线	35000	1m	

表注 (1): 这里所有的价格都以 MD, 即百万美元为单位。

表注 (2): 7m 抛物面阵的建议由北京天文台提出, 其造价 (包括可由计算机控制的传动部件) 为亚州卫星通信有限股份公司估算。

5 机遇和期望

如何在已有的四项骨干射电天文设施基础上进一步发展我国射电天文学, NGRT 给我们提供了一个机遇, 我们完全应该积极参加这项国际合作。除了全面参与对科学目标、设计思想和技术发展的研究合作外, 我们对 NGRT 可能作出的最主要贡献, 恐怕不大可能是数以千万美元计的拨款, 而是:

- 建议和提供望远镜站址及相应基建劳务;
- 承包天线的设计和批量生产;
- 提供各技术环节中试基地;
- 提供管理及后勤保障;
- 技术性的人力 (manpower) 合作。

这一切将促进我国射电天文观测研究与国际前沿接轨, 为年轻射电天文学家的培养和成长创造有利的条件, 并将促进天线设计制造和有关电子、材料产业的技术进步和发展。希望我国天文界和有关部门、产业, 积极关心和支持这一项跨世纪的国际大射电望远镜计划的准备和实施。

致谢 作者作为 LTWG 的成员之一，参加了 1994 年 3 月召开的 LTWG 第一次工作会议，有机会和 LTWG 的其他成员、NRAL、MPIfR 及 NFRA 的所长和其他同事交谈讨论，受益匪浅。为此特感谢北京天文台台长李启斌及 NRAL 主任 R.Davies 教授所提供的支持。

参 考 文 献

- [1] Kellermann K I. In: URSI ed. XXIVth General Assembly of the URSI — Abstracts. Kyoto, 1993, Kyoto: LOC, Science Council of Japan, 1993: 455
- [2] 罗先汉. 65 米全波段射电望远镜项目调研报告, 北京: 北京大学, 1994
- [3] Braun R. In: URSI ed. XXIVth General Assembly of the URSI — Abstracts. Kyoto, 1993. Kyoto: LOC, Science Council of Japan, 1993: 456
- [4] Pariiskii Y N. In: Karbashev N S ed. Astrophysics on the threshold of the 21st century (Smith D F transl.) Philadelphia: Gordon and Breach Science Publishers, 1993. 331
- [5] 南仁东. 北京天文学会年会报告文集, 1993. 北京
- [6] Moran J M, Elvis M S, Fazio G G *et al.* A Submillimeter-wavelength telescope array: scientific, technical and strategic Issues. Cambridge MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1984.
- [7] 吴盛殷. 电子科学技术, 1988, 7: 2
- [8] Swarup G. Current Science, 1991, 60: 160
- [9] Wilkinson P N. In: Cornwell T J, Perley R A eds. Radio interferometry: theory, techniques and applications. Proc. URSI/IAU colloq. No.131. Socorro (USA). 1990. San Fransisco: Astronomical Society of the Pacific, 1991: 428
- [10] Noordam J E, Braun R, de Bruijn A G. EURO16. Dwingeloo: NFRA, 1991
- [11] URSI. Proc. of URSI General Assemblies (Vol. XXIII) XXIV General Assembly, Kyoto, 1993. Gent: URSI Press, 1994: 119
- [12] Cornwell T. In: URSI ed. XXIVth General Assembly of the URSI Abstracts. Kyoto, 1993, Kyoto: LOC, Science Council of Japan, 1993: 458
- [13] Braun R. In: van den Heuvel ed. Proc. on priorities for future instrumental developments in the Netherlands, Amsterdam/Dwingeloo, 1993. [s.l.]:[s.n.]
- [14] Comm.J—LTWG. Draft minutes for first meeting of URSI LTWG, Jodrell Bank, UK, 1994, Dringeloo: NFRA, 1994: 10

(责任编辑 刘金铭)

A Project on the Threshold of the 21 Century:

Next Generation of Radio Telescope

Wu Shengyin

(Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

Abstract

During the 24th General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI) held in Kyoto, Japan, a resolution to form the Large Telescope Working Group

(LTWG) was made by the Comm.J (radio astronomy) according to a general opinion of radio astronomers in the world expressed in last several years. The working group will work for three years in purpose of promoting and reinforcing the studies and preparations of a cross-century project - New Generation of Radio Telescope (NGRT) . The project will be put into a wide scale of international cooperation. The major performances of the NGRT will be one to two magnitudes better than any current and planned radio telescopes. The historical origins of the concept of the NGRT and the essential technical features of the system are reviewed and outlined in this paper. It would be helpful for Chinese radio astronomers to join in the cooperation and studies of the project actively.

Key words techniques: radio astronomy telescopes