

500 m 球反射面射电望远镜 FAST^{*}

南仁东^{**}

(中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要 500 m 口径球反射面射电望远镜 FAST 将是国际上最大、最灵敏的射电天文望远镜。利用贵州喀斯特洼坑作为台址, 在洼坑内铺设 500 m 球冠状反射面, 通过主动控制形成抛物面以汇聚电磁波, 采用轻型钢索拖动并联机器人实现望远镜的指向跟踪, 其三项创新开创了建造巨型望远镜的新模式。FAST 涵盖的天文学内容丰富, 从宇宙初始混浊、星系演化、恒星乃至太阳、行星与邻近空间事件等的观测研究, 都有非常强的竞争力, 其中脉冲星探测、中性氢和奇异暗弱天体成像等课题蕴藏着巨大的发现机遇。作为一个多学科研究平台, 拟回答的问题不仅是天文的, 也是面对人类与自然的; 它将在日地环境研究、深空探测和国家安全等方面发挥重要作用; 其建设将推动众多高科技领域的发展。旨在介绍 FAST 的科学意义和应用价值, 评述关键技术的预研究现状, 同时对未来项目发展提出建议。

关键词 射电天文 射电望远镜 主动反射面

1993 年国际无线电联大会上, 包括中国在内的 10 国天文学家提出建造巨型望远镜计划, 渴望在电波环境彻底毁坏前, 回溯原初宇宙, 解答宇宙学提出的众多难题。在这一科学原动力驱使下, 各国研究团队开始了一代巨型射电望远镜的工程概念研究¹⁾。自 1994 年, 通过不断探索, 中国天文学家提出在贵州喀斯特洼地中建造 500 m 口径球面射电望远镜 FAST (Five-hundred-meter aperture spherical telescope) 的建议和工程方案。以国家天文台为核心, 中国天文界及工程界精诚协作, 对 FAST 关键技术, 其中包括贵州台址、主动反射面、光机电一体化馈源支撑系统、高精度的测量与控制、接收机等进行了可行性研究和模型实验。迄今, 该

2005-05-05 收稿, 2005-07-22 收修改稿

^{*} 中国科学院和科技部基金资助项目

^{**} E-mail: nrd@bao.ac.cn

1) 南仁东等, 1994, 《大射电望远镜(LT)国际合作计划建议书》; 1996, 《国际大射电望远镜(LT)争建建议书》, 中国科学院国家天文台

工程方案的可行性已得到确认, 处在国家大科学装置遴选立项过程中.

1 主要科学目标¹⁾

FAST 拟回答的科学问题不仅是天文的, 也是面对人类与自然的. 除在本节中阐述的重要课题方向, 它的科学产出也许我们今天还难以预测.

1.1 中性氢

氢是宇宙间最简单、最丰富的元素, 它与大爆炸几乎同龄. “宇宙的百科全书是用微弱的 21 cm 氢谱线写成的, 要阅读它需要非常灵敏的望远镜.” 其观测研究将回答星系及星系团演化与成因、暗物质空间分布及宇宙低频扰动等天文学热点问题.

星系的演化效应只有在红移为 0.3 或更大时才开始变得明显, 大质量星系可能在 $z > 2$ 时才开始形成, 目前发现的最年轻类星体在 $z = 6 \sim 7$, 将中性氢的观测距离延伸至 $z = 0.3$ 甚至更远的宇宙空间, 才能真正构造星系演化的图像. FAST 1 h 的积分观测可将宇宙探测距离延伸到红移 0.7; 对那些处于活动星系周围壳层中的高密度暖氢云, FAST 可回溯至红移 3 的宇宙距离.

我们观测到的最遥远宇宙, 即宇宙微波背景辐射是 $z = 1100$ 的背景光子最后散射面, 在 $z = 6 \sim 7$ 观测到最早期发光的天体, 而对这期间漫长暗纪的宇宙演化一无所知. 暗纪是如何结束的? 第一批恒星或星系是如何和何时形成的? 美国宇航局 WMAP 天文卫星于 2003 年的微波观测新近发现, 又将暗纪的终点(EoR)预言宇宙距离由 $z = 8 \sim 10$ 延伸至 20 左右, 使这个问题的回答变得更具挑战性. FAST 有独一无二的安静电波环境、高品质的接收机、几乎不受衍射限制的巨大口径以及振子天线的低旁瓣水平. 根据理论分析和仿真对 EoR 源给出了一些空间性质预测, 我们指望 FAST 有探测到第一代天体的幸运.

1.2 VLBI 网主

受口径衍射限制的天文望远镜分辨率 $\theta = \lambda/D$, 即以波长记口径的倒数. 对射电天文望远镜, 其工作波长为光学的几百万倍, 若想获得与光学相当的分辨率, 就得把这口 ‘大锅’ 做成几百公里甚至地球那么大, 这是难以想象. 射电天文学对望远镜分辨率的追求, 最终发展成今天的甚长基线干涉测量 VLBI. 加入 VLBI 的两面天线可以隔洲跨洋, 其角分辨率 $\theta = \lambda/B$, 基线 B 可以有地球直径那么长, 如果将天线送至太空将更长, 现代全球 VLBI 网的分辨率已突破毫角秒, 比其他所有的天文波段的分辨率至少高 3 个数量级.

国际 VLBI 网有欧洲网 EVN、美国网 VLBA 和亚太网 APT 等. 主要单元天

1) 南仁东等, 2004, 《500 m 口径球面射电望远镜 FAST 项目建议书》, 中国科学院国家天文台

线口径在 20~40 m, 最大的单元 100 m. 如果 500 m 口径 FAST 加入, 由于它巨大的接收面积和地处所有联测网边缘的地域优势, 可将基线检测灵敏度提高 10 倍, 可成图的目标数增加 1000 倍, 成为国际 VLBI 网俱乐部的‘网主’. 由 FAST、地面 100 m 天线和空间 10 m 左右天线构成的 VLBI 系统, 其灵敏度也将比现有的设备提高 0.5~1 个数量级. 有可能以优于 0.1 个日地距离分辨本领, 获得少数热谱源精细图像, 研究恒星类天体的形成与演化. 甚至直接为近邻双星系统和太阳系外行星成像.

1.3 脉冲星观测

脉冲星和脉冲双星的研究由于证认了中子星及间接证明引力辐射的存在, 分别获 1974 和 1993 年诺贝尔物理学奖. 目前已发现脉冲星 1700 余颗, 毫秒脉冲星 100 余颗, 河外脉冲星 10 多颗. 脉冲星是极端物理条件下的实验室, 是“星际介质的探针”.

理论估计银河系中应有脉冲星 6 万颗, 已发现的大约为 3%, 脉冲星的深度巡视会提供众多的发现机遇. 最初发现的 100 颗全部是正常脉冲星, 且全部是单星. 当发现脉冲星数目增至 500 颗时, 脉冲星的研究产生了一个飞跃, 发现了毫秒级脉冲星、双中子星系统、中子星和白矮星系统、中子星和大质量伴星系统、脉冲星中的行星系统、X 射线 γ 射线脉冲星等多类新品种. 当高灵敏度的多波束巡天脉冲星的数目增至 1700 时, 更新的发现随之而来. 例如, 周期长达 8.5 s 脉冲星的发现对中子星结构和物态方程提出了挑战; 首次捕捉到双脉冲星双星系统——PSRJ0737-3039A/B, 其 2.4 h 的轨道周期和极其高速的轨道运动, 将使这两个中子星并合的时间大大缩短, 观测中子星并合事件是国际引力波探测的重要目标之一, 这一发现也许为人类提供千载难逢的机遇.

目前新品种的脉冲星的数目还不多, 而且它们往往是在现有设备的探测极限附近发现的. FAST 具有高的灵敏度和大的天区覆盖, 有利于发现更多暗弱脉冲星、毫秒脉冲星、脉冲双星、双脉冲星系统、脉冲星行星系统、河外强脉冲星、非球状星团毫秒脉冲星等罕见品种. 根据计算机仿真结果如图 1, FAST 使用多波束馈源、1 h 积分时间, 将能用一年巡视时间发现 7000 多颗新的脉冲星. 如果幸运, FAST 也许会观测到目前尚未发现而可能存在的新品种, 如奇异星和黑洞双星等. FAST 的非积分高灵敏度(raw sensitivity)特别适用于脉冲星偏振、单个脉冲等的研究, 对星际介质做更精确的探测, 揭示脉冲星辐射的成因.

1.4 分子谱线观测

星际分子谱线也是 20 世纪 60 年代天文四大发现之一. 1952 年在 Miller 实验室中进行地球生命起源的实验, 用氢、氨气、甲烷和水模拟原始大气和海洋, 通过

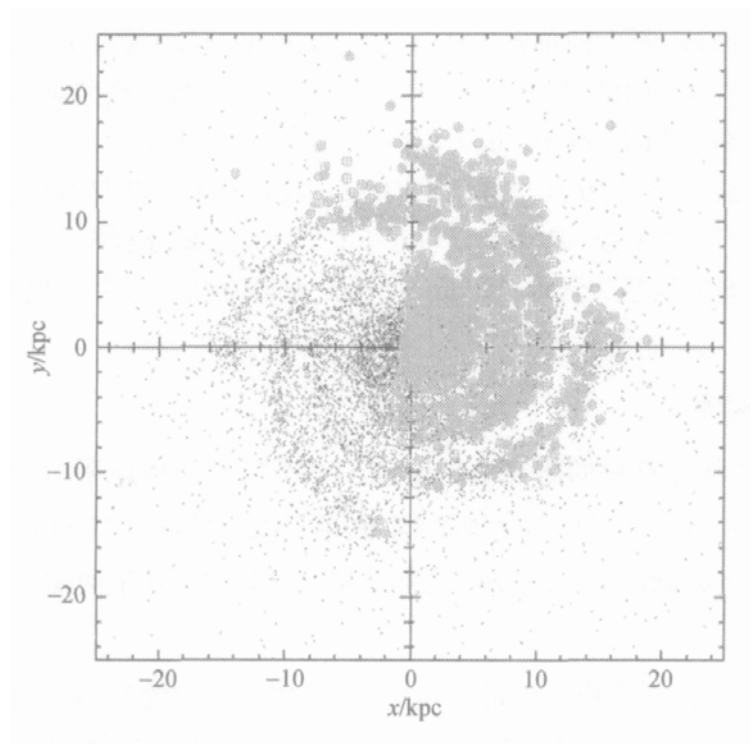


图 1 可发现 $|b| < 5^\circ$ 7000 颗脉冲星的仿真结果

电击注入能量, 生成了多种与生命过程有关的有机分子. 射电天文学认为, 前生命期复杂分子的发生可能不需要从零开始, 20 世纪 60 年代初, 由于毫米波天文学的发展, 在星际介质中观测到不同转动能级跃迁产生的分子谱线, 这些分子中包括书写蛋白质公式的基本化学字母 C, H, N 和 O 等. 分子天文学的奠基人 Townes 获 1964 年诺贝尔物理学奖. 至 2004 年, 已证认星际分子 123 种, 其中有 8 种脉泽分子, 包括 50 多条非热脉泽谱线. 在银河系已发现几千个脉泽源, 在河外星系中发现了 106 个 OH 超脉泽源和 20 多个 H_2O 超脉泽源.

星际分子广泛存在于多种天文环境. 约有 20% 的分子谱线处于厘米、分米波段. FAST 工作带宽内包含羟基(OH)、甲醇(CH_3OH)和甲醛(HCHO)等 17 种分子谱线. 利用其高灵敏度, 可对超强红外星系、高红移星系、活动星系和类星体进行 OH, HCHO , CH_3OH 分子超脉泽的广泛搜寻. FAST 的性能将可以观测到更多 OH 超脉泽源, 进一步研究超脉泽和星系类型的关系、超脉泽与核活动的关系、超脉泽和星系核相对论性外流的关系. NGC4258 星系核心超脉泽观测结果被誉为黑洞探测的‘第一门球’, 大的 OH 超脉泽样品, 有可能获得更多黑洞存在的证据. Parkes 64m 望远镜在红移为 0.129 处探测到了最亮的 OH 超脉泽, 如果使用 FAST, 它可在 $z \sim 1$ 处被探测到, 这使 OH 超脉泽的宇宙学研究成为可能. 目前 OH 超脉泽的光度函数测定得不准确, 也不了解它们的物理机制. 在多波束模式下, 用 FAST 做 OH 超脉泽的巡天工作, 将增进我们对其光度函数的理解, 为我

们提供有关它们起源的必要信息. CH_3OH 脉泽是河内最亮的射电点源, 强出邻近 OH 脉泽近一个数量级, 它的研究正成为示踪恒星及行星形成和研究吸积盘的重要工具, 但国际寻找河外 CH_3OH 超脉泽的努力至今未见结果. 考虑到 FAST 与 Arecibo 望远镜相比有大得多的天区覆盖, 我们将有机会利用其极高灵敏度在世界上第一个发现河外 CH_3OH 超脉泽. 除此之外还可能发现高红移巨脉泽(gigamaser)星系, 研究宇宙早期演化.

1.5 高分辨率微波巡视 HRMS 和寻找地外文明 SETI

人类仰望上苍时, 我们的天性会发问: 我们是谁? 我们从哪里来? 我们是否孤独? 也就是茫茫宇宙有没有人类的兄弟, 地球之外有没有其他的文明社会. SETI 的学科风险是不言而喻的, 但它一旦成功, 将使人类所有的科学成就黯然失色. 所以科学界的探索、发达国家政府与民间对 SETI 的投入也从未停止.

在人类难以想象的‘极限生命环境’都发现了活着的生命, 地球生命比我们以往想象的要坚强得多, 在考虑地外生命时不用只关注宜人的环境; 在行星上寻找生命时应该先寻找水, Galileo 飞船发回的图像展示了木卫二的冰壳下有比地球多得多的水, 欧洲快车在火星南极拍下水冰照片; 太阳是银河系中上千亿颗恒星之一, 迄今, 被探测到的行星总数超过 150 颗. 地球极限生命环境、地外水和太阳系外行星系统的三项科学进展, 使 SETI 科学升温.

与地外文明通讯的惟一可行的方法是寻找来自地外的“人工”信号. 主流 SETI 科学家认为人类应该将搜索集中在 1~3 GHz 的无线电频率范围, 尤其是 21 cm 的中性氢线(HI)与 18 cm 羟基线(OH)之间. H 与 OH 结合成水(H_2O), 因而这一狭窄频带又称为“水洞”. 水对地球生命是最基本的, 地外的“水族”可能也会自然地通过水洞寻找同类.

在诸多观测课题中, 凤凰计划是最著名 SETI 巡视, 它始于 1994 年, 正使用世界上最大的天线对来自邻近的大约 1000 颗类太阳星周围的无线电信号进行系统的搜索和证认. 使用雷达方程进行计算, 表 1 列出 4 架望远镜的巡视能力. 一个典型电视台的全向等效辐射功率 EIRP 大致为 1 MW 的量级, 地球上最强雷达的脉冲功率约为 10^8 MW. 粗略估算, 如果地外文明的天线是无方向性的, 假设其发射机功率为 1000 MW, Arecibo 搜索距离为 18 ly, 可探测 12 颗恒星, FAST 的搜索距离达 27 ly, 可观测的恒星达 40 颗, 巨大的 FAST 也许会给我们巨大的机遇. 即使我们没有那份运气, 也可以像美国宇航局微波巡视计划 HRMS 那样, 同时扫描上亿个频率, 诊断微弱的空间窄带讯号, 其国家安全方面的价值不言自明.

1.6 其他应用领域

将把我国深空测控及通讯能力由地球同步轨道延伸至太阳系外缘行星. 它

表 1 FAST 与其他 3 架望远镜巡视能力的比较

地外发射机功率	Parks		Bonn		Arecibo		FAST	
EIRP/MW	检测距离 /ly	恒星数	检测距离 /ly	恒星数	检测距离 /ly	恒星数	检测距离 /ly	恒星数
10			1		1.8		2.7	
100	1.4		3		5.8	1	8.7	2
1000	4.5	1	9	1	18	12	27	40
10000	14	5	28	45	58	390	87	1300
100000	45	173	90	1430	185	12000	280	40000
1000000	140	5480	280	45200	583	328000	870	1100000

能使目前我们的深空通讯数据下行速率提高 100~1000 倍, 强有力地支持我国未来载人航天、探月和深空探测计划. FAST 能应对深空飞行器在快速工程变轨和着陆时的测控需求, 例如美国宇航局火星探测器“勇气”和“机遇”号的变轨着陆过程都使用低频的全向低增益天线, 以获得稳定的通讯链路和好的信号绕射特性, 作为一个低频地面接收设备, FAST 是独一无二的. 我国西南的经纬度使它处在全球深空网 DSN 一个有利的位置, 在 X 和 Ku 波段虽然效率不高, 但它的有效口径仍然可达 90 多米, 加之它的易变结构, 有较大的升级改造空间, 它将在全球 24 h 日不落合作中发挥重要作用.

观测电离层对卫星和射电源信号的闪烁, 研究电离层不均匀的时空结构, 为我国军民用通讯和卫星定位服务. 观测行星际闪烁 IPS 和 Faraday 旋转现象, 跟踪探测日冕物质抛射事件, 了解太阳风的行星际传播, 服务太空天气预报.

毫秒脉冲星自转频率具有很高的长期稳定度, 被誉为自然界中最稳定的时钟. 目前, 世界上在继续进行脉冲星搜寻的同时, 已有约 10 个脉冲星计时阵 PTA 先后投入工作, 开始用 PTA 建立独立于原子时的脉冲星时间标准. FAST 能将所使用的不足 20 颗毫秒脉冲星数目增加至 100 颗, 实现新时间标准的突破. FAST 脉冲星到达时间的精确测量, 有可能应用于未来深空飞行器的自主导航.

2 望远镜的基本结构和主要技术指标

自 1994 年起, 根据我国现有的科学技术储备和台址资源, 开始了建造巨型射电望远镜中国工程方案的研究^[1], 迄今, 已形成完整的 FAST 工程方案设计. 如图 2(b)所示, 在贵州喀斯特洼地^[2]内铺设口径为 500 m 的主动反射面球冠^[3], 通过主动控制在观测方向形成 300 m 口径瞬时抛物面; 采用光机电一体化索支撑轻型馈源平台^[4], 加之馈源舱内的 2 次调整装置^[5], 在馈源与反射面之间无刚性连接的情况下, 实现高精度的指向跟踪; 在焦舱内配置多波段多波束馈源和覆盖频率 0.13~5 GHz 的接收机系统; 针对 FAST 科学目标建设不同用途的终端设备. 望远镜的主要技术参数见表 2. 下面是主要 3 项关键技术分析介绍.

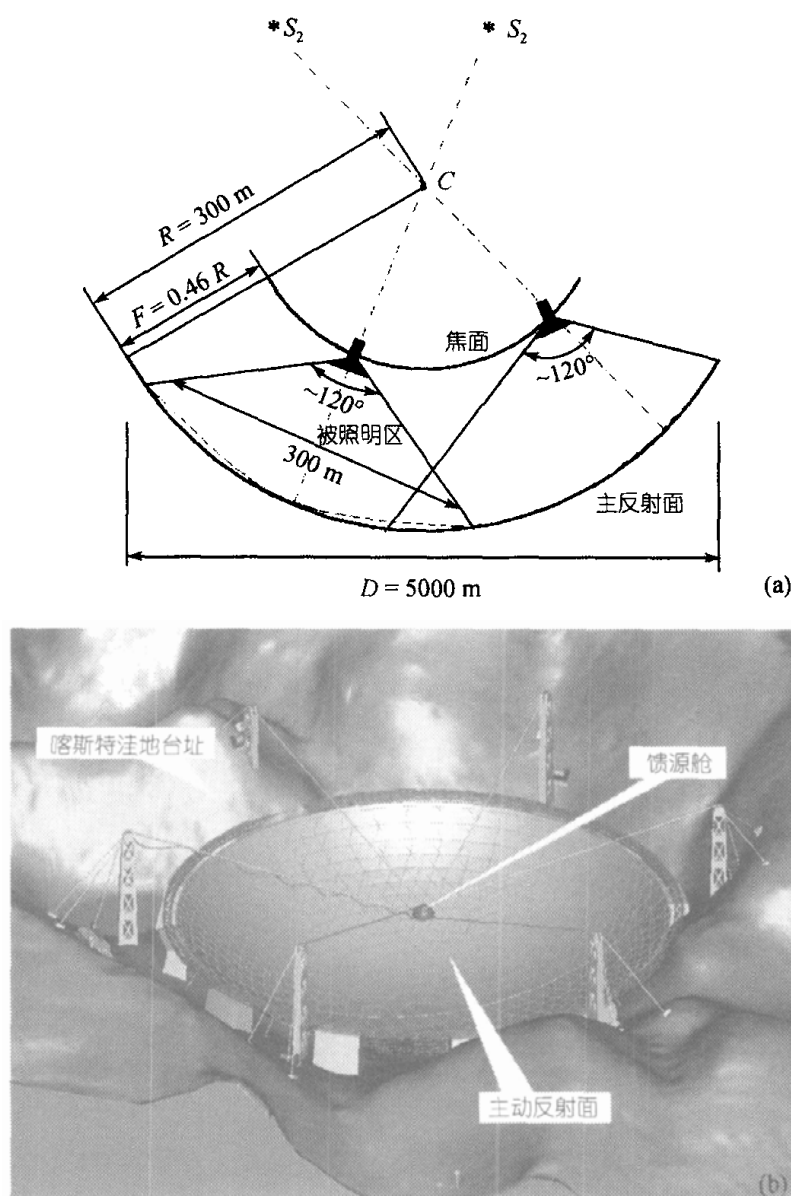


图 2

(a) FAST 微波光学, (b) FAST 的 3 维图像, 其中洼地采用真实数据

2.1 主动反射面的几何光学

当焦距调整到某个长度时, 抛物面的中心部分会非常接近球面. 如图 2(a)所示, 对 300 m 的照明口径, 如果焦距 F 取为 $0.467R$ ($\sim 140 \text{ m}$), 抛物面与球面沿着径向的最大偏移只有 0.67 m, 根据天体的最大跟踪速度要求, 这一偏差的最大变化率为 0.7 mm/s, 通常的机械控制能满足变形控制的需要. 为实现变形拟合, 中性球面要分割成小单元. 为保证反射面的各向同性, 每一个小单元应有相同的曲率. 由于抛物面上各点的曲率与其轴高有关, 拟合误差与位置相关并随单元尺度

增大而变大. 精度与成本之间需要工程上的优化考虑, 例如 15 m 尺度约 2000 片单元构造的主动反射面, 拟合误差在 4 mm 水平, 按 Ruze 公式估计天线的效率, 基本满足 5 GHz 频段的精度要求.

反射面的拟合误差与单元曲率、单元分割方案以及单元顶点与抛物面的相对位置有关. 作为一个实例, 若反射面采用三角形分割, 单元三角形边长为 11 m, 则 300 m 照明区内有 1350 片单元. 图 3 指出了在两种控制策略和两种单元分块情况下, 拟合误差随单元曲率的变化. 合理优化单元位置和单元曲率, 可在不增加成本的情况下降低拟合误差. 单元中子单元的数目过少则拟合误差大, 过多增加成本, 合适的数目为 64 或更少.

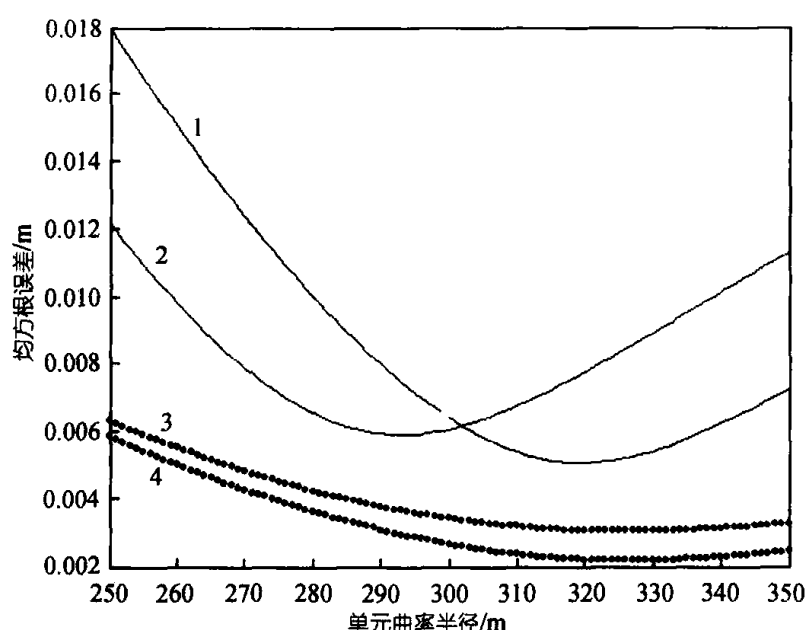


图 3 拟合误差随单元曲率的分布

1 为 64 块平面子单元拼合单元顶点在抛物面上, 2 为 9 块平面子单元拼合单元顶点在抛物面上, 3 为 9 块平面子单元拼合优化单元位置, 4 为 64 块平面子单元拼合优化单元位置

由于采用了主动反射面技术, 在地面改正球差, 将电磁波汇聚在主焦点, 可以直接使用传统的馈源和接收机设计, 以实现瞬时宽带和全偏振. 不需要复杂昂贵的 2 次、3 次反射面改正, 避免了万吨重的空间指向跟踪平台. 主动反射面的 120° 大张角, 加之口径边缘的偏轴照明, 使其天空覆盖接近主流望远镜.

2.2 光机电一体化的馈源支撑

天文观测时, 馈源在反射面之上约 140 m 高、直径 250 m 的球冠上运动, 最大跟踪运动速度 11.6 mm/s, 最大换源运动速度 400 mm/s. 为未来高至 8 GHz 工作频率 1/10 波束宽度指向精度的需要, 馈源作为一个 6 自由度 3 维刚体, 其上任

何一点的空间绝对定位精度需控制在 4 mm 之内。

望远镜口径已远超出地面全可动望远镜的工程极限, 反射面与馈源舱之间不可能有任何刚性连接。刚性空间平台由于重量及其遮挡, 技术上无可行性。FAST 采用光机电一体化的馈源索支撑技术, 用悬索在接收机控制下通过伺服装置改变其长度, 实现馈源舱的扫描运动。在没有质量调谐阻尼的情况下, 馈源舱的空间位置可控制在 50 cm 之内。

由于风载和驱动力等扰动, 加之控制的延迟, 柔性索系支撑的馈源舱内要加入并联机器人作为二次稳定机构, 承载望远镜馈源前端, 以实现 4"指向精度。包括并联机器人和接收机在内的馈源舱总重量约为 30 t, 台直径 6 m 的机器人下平台载荷能力约 3 t。下平台和上平台的空间位姿分别由天文轨迹规划和远距离测量给出, 通过 Stewart 平台逆解和自抗扰等策略来实现两级稳定机构之间的解耦控制¹⁾, 两级稳定机构之间的动力学解耦至关重要^[6]。

2.3 测量技术

FAST 的主反射面和馈源之间无刚性连接, 原则上需要相对同一整体参考系²⁾的高精度绝对空间位姿测量。根据主动反射面和馈源控制精度的要求, 基准测量网其基准点的精度在 1 mm。所涉及的接触和非接触现代测量技术众多, 分别应用于台址勘查、土木工程、反射面和馈源支撑、接收机和终端系统, 以及未来望远镜运行时的实时检测和健康监测。

FAST 巨大的空间尺度、时变特性及高精度控制要求, 需要公里距离、毫米甚至亚毫米精度和高采样率的非接触测量技术。目前尚无满足这些要求的单一测量系统, 这给我们提出了理论和技术上都有挑战性的难题, 其中最主要测量课题有两个:

(1) 馈源跟踪测量: 对馈源舱, 实际是测量 Stewart 上平台的动态 3 维空间坐标, 测量距离达 500 m、精度 1 mm、采样频率大于 10 Hz。拟采用技术方案 1: 馈源舱上固定 4 个可随位置测量设备转动的靶标, 在图 2(b)反射面中心部分留有空间, 放置 4 台 API(Auto Precise Inc)激光跟踪全站仪, 完成馈源位姿测量。理论上只需 3 套测量设备, 第 4 套可增加冗余并提高测量精度。方案 2: 采用两套 6 自由度 API 激光跟踪系统, 其中 1 套为冗余测量。自备精密伺服机构的靶标提供馈源舱的姿态坐标, 地面全站仪与合作目标之间采用光纤或红外通讯。

(2) 反射面位形扫描: 反射面上节点数超过 2000, 照明区内接近 1000, 测量目标数目巨大, 必须分区同步进行。最关注的测量量是节点沿反射面法线方向的位移, 其精度应该在 1~2 mm。由于节点伺服机构有自己的半闭环检测, 每一个节

1) 黄一、许可康、韩京清, 1999 《Stewart 平台精定位控制方案设计》, 中国科学院系统科学研究所

2) 郑勇等, 2001, 《大射电望远镜 FAST 测量技术预研究报告》, 解放军信息工程大学

点的采样率要求远低于馈源舱, 单点采样周期可在 10 s 甚至分钟的水平. 拟采用技术方案 1: 采用高精度数码扫描测量的方法, 用多台数码照相设备结合精密旋转平台完成反射面的分区测量, 反射面可以如图 4 进行区划¹⁾, 每个对应一台扫描相机. 如果节点沿切向位移过大, 可使用两台数码扫描测量并通过三角测量求解 3 维坐标. 拟采用技术方案 2: 采用美国 GBT100 m 望远镜发展的激光测距仪类似系统, 1 km 的测距精度为 0.1 mm, 采样频率 5 Hz. 3 台激光测距仪同时对准一个靶标, 给出其 3 维位置坐标. 使用 9 台构成测量系统相当于 3 台全站仪, 观测时对照明区内约 1000 个控制点扫描, 单点采样周期估计为 1 min. 在此周期内, 控制点的最大位移约为 35 mm, 结合动力学分析预测, 可满足反射面变形闭环控制的要求.

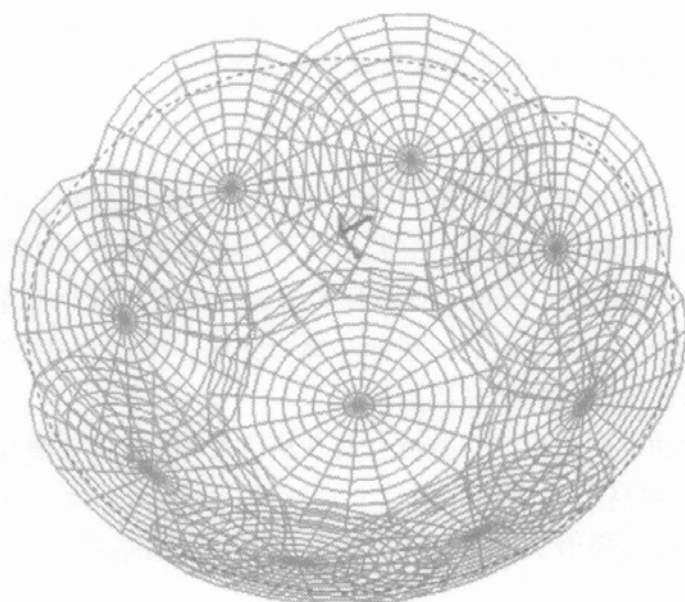


图 4 主动反射面数码扫描分区示意图

表 2 FAST 的主要技术参数

台址: 贵州南部 东经 107°21' 北纬 25°48' 海拔约 1000 m
球反射面: 半径 R 300 m, 口径 D 500 m, 球冠张角 θ 120°
有效照明口径: $D_{\text{eff}} = 300$ m
焦比: 0.467
天空覆盖: 天顶角 50°(损失接收面积, 最终目标为 70°)可跟踪时间 5~7 h
工作频率: 0.13~5 GHz(可升级到 8 GHz)
灵敏度(L 波段): A/T 1500, T_{sys} 25 K
多波束(L 波段): 13~19, 焦面阵波束 >100
换源时间: <10 min
跟踪精度: 4"

1) 刘锦潮, 2005, API (AutoPreciseInc)的 PPT 文件

3 关键技术可行性分析

自1994年,以中国科学院国家天文台为核心,联合相关领域20余所大学和研究所,汇集了百余名科研人员加入了此项合作研究。1999年,“大射电望远镜FAST预研究”作为中国科学院知识创新工程首批重大项目正式立项,得到中国科学院及科技部经费支持,于2001年通过中国科学院院级验收,望远镜的各项关键技术的可行性通过分析和实验得到证明,进一步的优化在进行中。

3.1 贵州台址评估

巨型球反射面望远镜的建造,需要利用天然洼坑,这种地貌只发育在喀斯特地区。由1994年开始,FAST项目组使用RS, GIS, GPS, 现场考察与计算机图像分析等方法,对贵州南部喀斯特地区的自然地理、地貌发育控制因素、洼地的形态特征、水文地质、工程地质、气象及电波环境等诸方面,进行了多学科的台址评估工作。通过普查,约400个候选洼地进入数据库,其中包括每个洼地的坐标和描绘其包络形态的主要几何参数,图5(a)给出不同直径与深度的洼地数密度分布。

洼地的几何形态是FAST造价,特别是土木工程投资重要因素之一。为了得到天线在洼地中的最佳位置,使工程岩土开挖量和回填量达到最小值,应用GIS技术和遥感图像处理相结合的方法,对选定的80个Karst洼地进行了1:10000地形图精度的形态分析。以ILWIS软件为工作平台,分别进行数据采集和编辑、矢量-栅格数据转换及等值线插值,生成数字地形模型(DTM),以DTM影像为基础进行相对高程分类,迭加DTM网格和高程分类图像,实现Karst洼地的3维显示。最后,根据各洼地的不同有效直径和动态变化的天线参数设定直径与洼地进行拟合,得出天线在洼地中的最佳位置和最大有效口径,并得出土木工程量估计,如图6所示,候选洼地大窝凼的总土木工程量约为 $200 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

贵州候选台址地理纬度(约 26°)较低,有利于银道面天体的观测。地处亚热带,每年只有数日霜雪期,不需要考虑由于冰冻附加的结构强度要求。区内地下水位一般50~200 m,洼地中均有通向地下水系的通道,雨季无浸没之虑。全区稳定性良好,无大地震记录和活动断裂;洼地岩组发育已达稳定状态,承重强度满足工程需要。人口密度低、经济发展滞后,加之喀斯特山峰的地方屏障,台址的电波环境安静,并且已经以中国科学院的名义与地方政府签订了频率保护协议。

3.2 主动反射面

FAST创新工程概念的核心是主动反射面,为实现图2(a)微波光学中300 m照明区主动变形时总体电性能指标,若干关键技术的可行性需要通过理论分析和模型实验证明,其中包括500 m球冠的分割与变形策略、反射面单元、单元运动

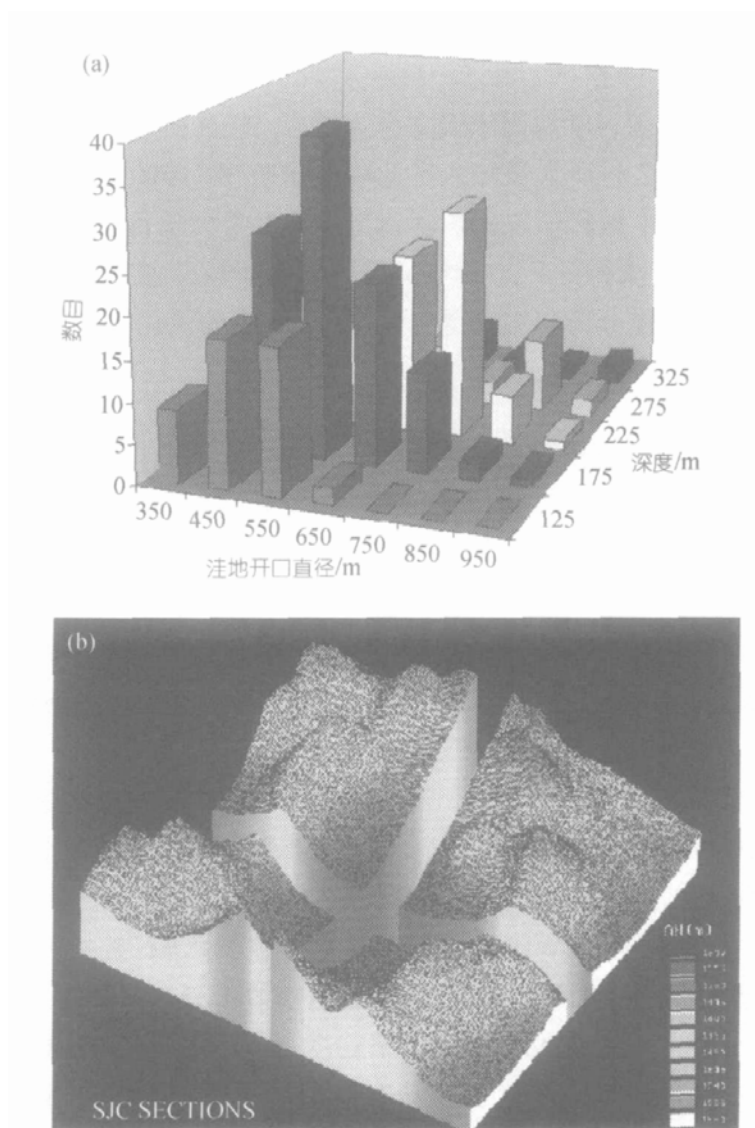


图 5

(a) 根据洼地数据库, 平塘县洼地形态分布统计, (b) 候选洼地之一尚家冲洼地的 DTM 图像

的驱动与控制、单元之间的自适应连接等. 主动反射面的实现方案有两种 - 机械分块式结构^[3]和整体索网结构^[7], 前者主导的控制力是压力, 后者是张力.

3.2.1 分块式刚性单元主动反射面

基于成本和拟合精度的考虑, 球冠由尺度约 15 m, 2000 块左右六边形球面单元拼合而成. 由于相同几何单元分割无解, 需在使单元接近正六边形的同时, 尽量减少单元种类以利于建设中的批量生产. 单元背架采用钢栓-球节点网架结构¹⁾, 之上铺设铝板或者钢丝网反射面, 在保证精度的前提下, 保证反射面打孔

1) 陈忆, 2000, 《FAST 实验模型背架与面板的研制》, 中国科学院南京天文仪器研究中心

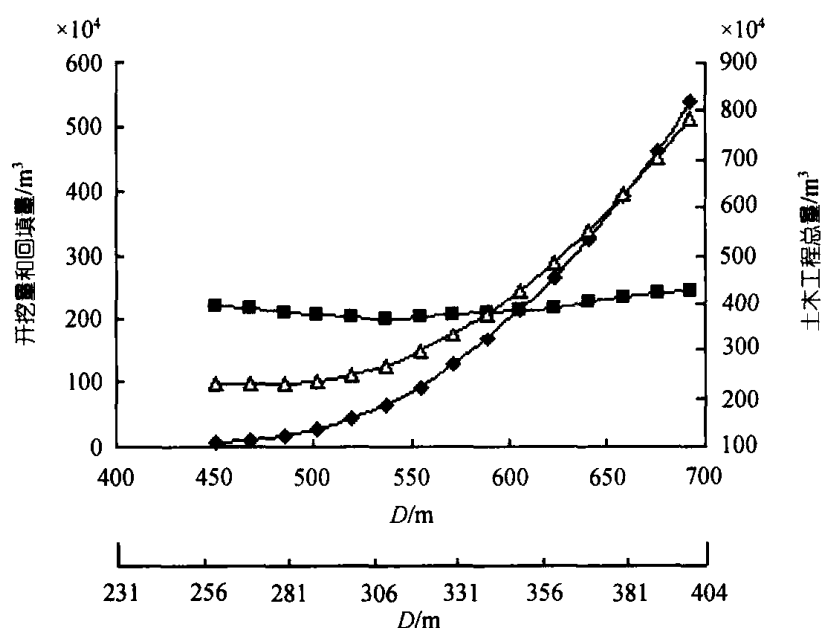


图 6 大窝凼洼地球冠拟合挖填方量与球半径关系曲线

为开挖量, 为回填量, 为土木工程总量

有足够的占空比, 降低风荷同时满足洼地植被透光量要求. 每块单元由 3 个促动器支撑, 每个促动器连接相邻 3 个单元, 观测过程中通过促动器沿图 2(a)的径向运动, 最大行程 67 cm. 促动器与反射面单元之间应有补偿接头¹⁾, 对由球面变换成抛物面时引起的长度和角度的变化给以自动补偿, 这种补偿无需依赖于控制系统.

根据图 7 所示的球冠分割, 在中等高度选择 4 块有代表性的六边形单元, 作了 1:3 的缩尺模型实验^[8], 实验结果显示, 主动反射面沿球心方向的变形控制精度能满足未来望远镜观测的需要, 证实了技术的可行性. 由于单元下滑使反射面上的间隙分布不均匀, 由此引起的效率损耗可以忽略. 模型研制显示了反射面单元过多品种给批量生产带来的困难, 新的反射面球冠分割方案将原品种数目由 178 减少至 28 种. 在实验基础上优化设计的预应力张拉结构骨架, 将反射面单元的重量减轻三分之二.

3.2.2 整体索网主动反射面

针对上述方案结构复杂、大量运动部件带来的可靠性问题、洼地土木工程潜在的高造价, 近年来对整体索网变形的反射面设计进行了分析和实验, 其原理非常简单, 假想在 500 m 直拉索中点施力, 使其位移 1 m, 索长度增加 0.004 m, 小

1) 屈元根、王家宁, 2000, 《三杆模块姿态控制机构及本地控制实验系统》, 中国科学院南京天文仪器研究中心

于总长的十万分之一, 其变形基本是不可见的. 如图 2(a)所示, FAST 变形抛物面与中性球面之差为 67 cm, 虚线表示的抛物线长度与下面弧段的长度只相差 36 cm. 这些提示我们, FAST 反射面的刚性分块基底可以由整体张拉索网代替. 由于照明区与球形中性面之间微小的差别, 可以通过索网上控制点的切向位移加之钢索在弹性区内的轴向形变, 不附加任何伺服机构来改变索长, 完成抛物面拟合^[7]. 新的工程概念将机构由压力主导转化成张力主导, 充分利用了材料和结构的性能.

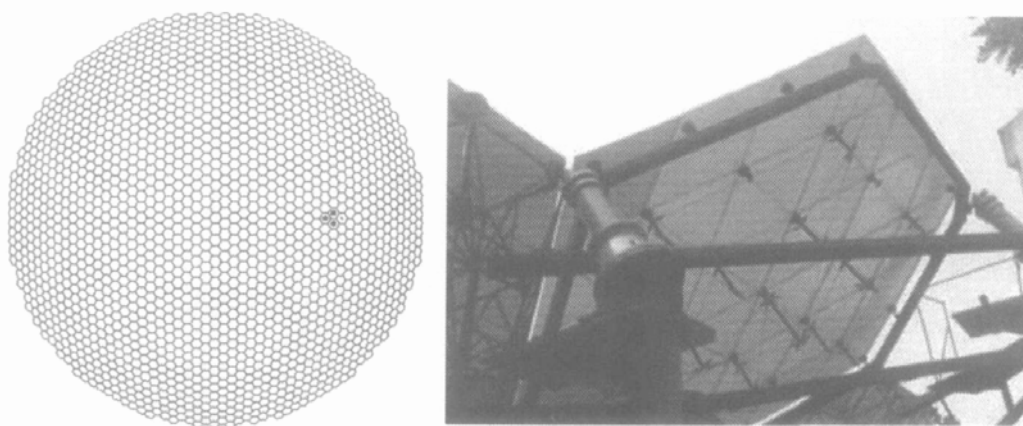


图 7 500 m 球冠分割成 1788 个六边形单元, 选择 4 单元主动反射面 1:3 缩尺模型实验

由若干索网构型中选择了三角形短程线分割, 反射面总体设计如图 8(a)所示. 使用弹性模量 $147\sim 170\text{ kN/mm}^2$ 钢索, 主索网有约 7000 根索段, 下拉索约 2400 根, 将整个反射面分割成约 4800 个三角形单元. 观测时通过固定在洼地中的卷索机构控制下拉索长度, 使索网变形. 根据图 8(b)所示的仿真分析, 主索和下拉索的最大拉力估计分别为 37 t 和 4.5 t. 反射面单元通过有自适应功能的索节点与索网连接, 对由球面变换成抛物面时引起的长度和角度的变化得到自动补偿¹⁾. FAST 已有的预研究工作基本可以回答这一方案中的测量与控制问题(见 2.3 小节).

实际上, 索网变形所涉及的工程力学问题繁杂. 例如, 利用索轴向变形的同时也应该允许节点的切向位移, 照明区内外的变形需要整体考虑, 选择合理的索网刚度, 分析反射面在复杂流场中的响应等. 通过对变形策略的优化, 减轻对测量和控制部分的压力, 提高精度、降低成本和减少驱动功耗.

3.3 馈源支撑

对悬索系统非线性及风激振动进行了分析, 完成了柔性时变结构的动力学仿真. 有限元非线性动力学分析给出一次支撑索系的前 10 阶固有频率 $0.04\sim 0.18$

1) 沈世钊、范峰、钱宏亮, 2004, 《整体索网主动反射面结构研究报告》, 哈尔滨工业大学

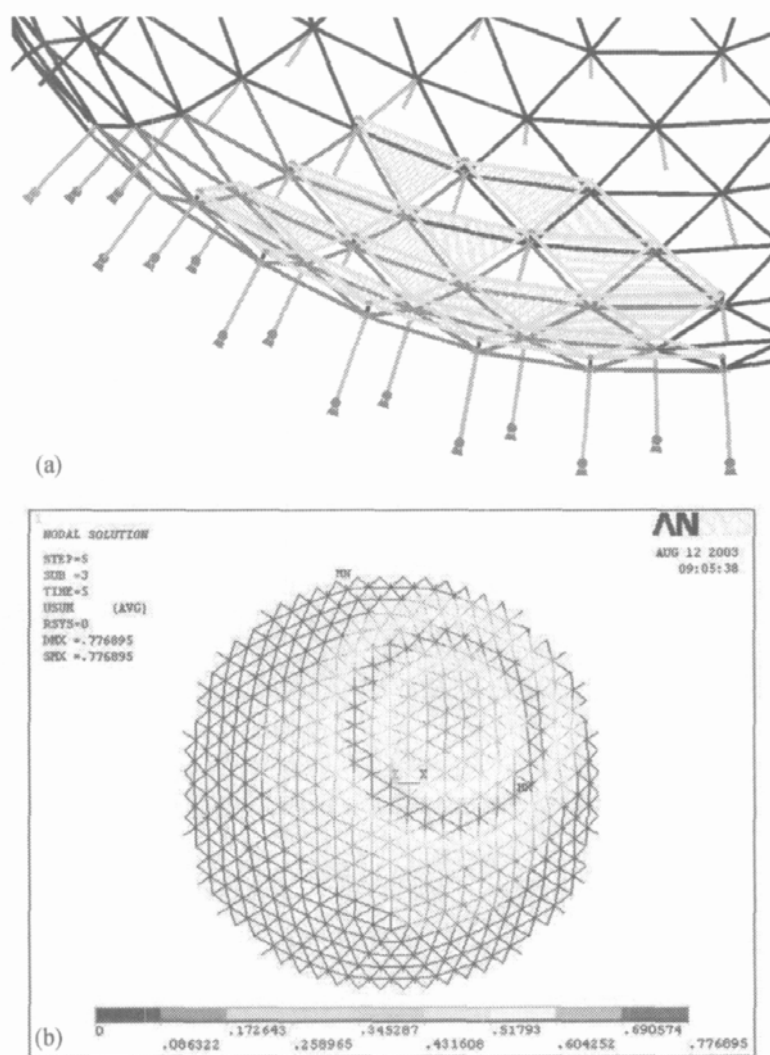


图 8

(a) 整体索网主动反射面, 阴影部分表示已经铺设反射面单元, (b) 主索应力分布 ANSYS 软件仿真结果

Hz, 在候选台址最高的历史记录风速 17 m/s 时, 馈源舱最大位移约为 50 cm. 加入下拉索后, 固有频率随系统刚度提高而提高, 最大位移可降至 24 cm^[9]. 另一个独立的力学分析给出前 18 阶固有频率 0.15~0.55 Hz, 系统固有频率未能完全避开风谱的主峰, 由于风谱模型差异, 风致振动响应在 0.15 Hz 附近较大. 极限风速时的最大位移与前者相当¹⁾.

馈源舱的光机电一体化支撑是一个具有明显风险的关键技术课题, 作了两个独立设计的 50 m 模型实验, 以验证 2.2 节中技术方案和指标的可行性. 模型都包括了一次支撑索系及其索驱动机构、两次稳定机构 Stewart 平台、支撑塔、测

1) 刘玉标、申仲翰、李世海, 2001, 《悬索支撑系统的静动力响应分析及舞动估计》, 中国科学院系统科学研究所

量与控制系统等重要元素. 图 9(a)显示了一个模型的运行情况, 实验完成了索驱动的开环与闭环控制, 实现了馈源舱在焦面上的运动, 并能将馈源舱的位置控制在预测的误差内, 实现了馈源舱的粗定位. 在现场风速 2 m/s、舱体速度 2 cm/s 时, 开环控制的误差在 3.5 cm 以内, 闭环误差在 1.5~2.0 cm, 对应 500 m 原型, 闭环误差在 18~24 cm.

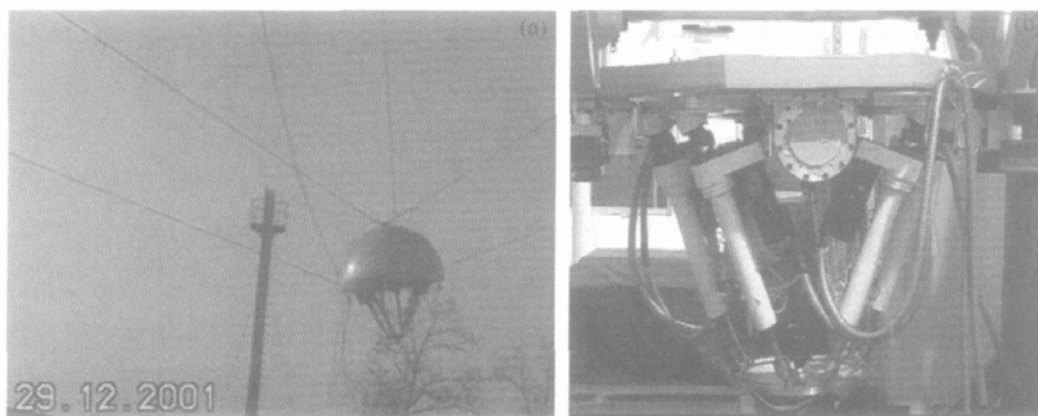


图 9

(a) 50 m 馈源支撑模型、馈源舱悬挂 Stewart 平台, (b) Stewart 室内吊装实验

图 9(b)为成功研制的 Stewart 平台, 根据 Π 定理建立了柔性支撑 Stewart 平台振动控制的相似律关系. 利用振动台通过减速机构模拟各种风谱的振动激励上平台, 激光测量设备实时提供上平台位姿数据, 参与反馈控制, 同时测量下平台位姿. 图 10 显示 Stewart 平台抑制振动的实验结果, 图中由上至下为 x , y , z 方向

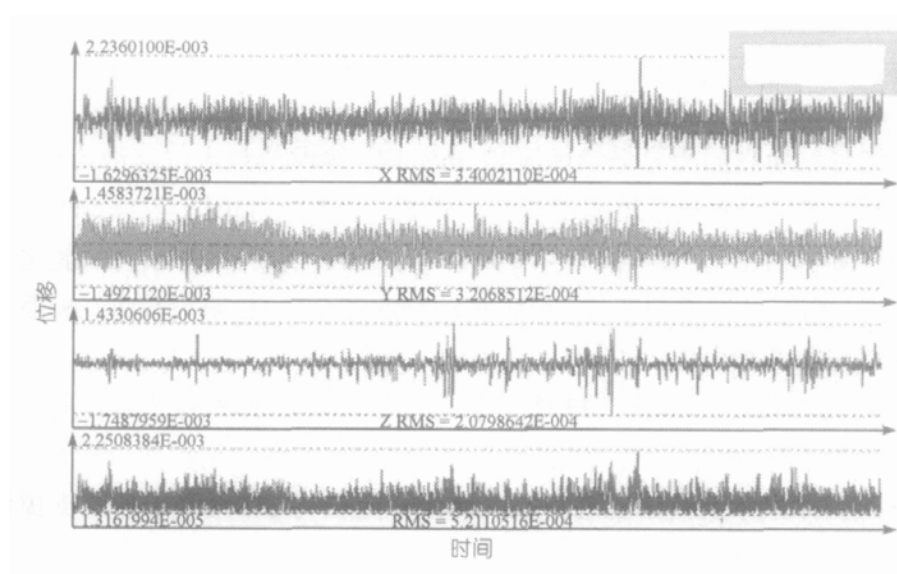


图 10 下平台控制精度

位移, 以及 3 维空间位移均方差. 试验表明在上平台扰动频率低于 1.1 Hz 时, 下平台的控制精度在亚毫米. 工作空间和响应速度满足馈源精确定位的要求.

包括两级馈源定位机构的模型是严格根据相似律原则建造的^[10]. 为同时满足相似律对索的弹性与惯性的要求, 提出用承力索提供轴向拉力、配重索提供横向振动惯性的创新方法. 开发了试验模型的控制系統, 同时使用激光跟踪仪、指向电机编码器、索张力传感器等多种测量数据, 实时计算 18 台电机控制量, 实现了两级模型的协调控制. 按相似律原则根据实验结果对原型作了预测, 分析表明, FAST 望远镜在风速 2 m/s 时, 馈源的定位精度为 4~7 mm.

3.4 馈源和接收机

进行 FAST 的 9 频段接收机设计, 覆盖 0.13~5 GHz 频率范围(有升级至 X 及 Ku 波段的发展空间), 其中包括 L 和 C 两个波段的多波束馈源. 确定了低噪声前端及其真空制冷、中频信号传输、接收机各部分的检测与监测和射电干扰的处理等技术路线, 完成了全部焦舱设备配置及建设方案. 针对 FAST 建成 5 年后的新型焦面阵馈源正在数值分析和小型样机实验中, 它的装备将实现望远镜 0.5° 的同时大视场, 在 500~1700 MHz 波段实现上百个独立宽带波束.

4 未来研究展望

经过 10 年预研究过程, FAST 各关键技术, 其中包括台址、主动反射面和馈源支撑的可行性都通过理论分析和实验得到证明, 项目具备初步设计的条件. 在未来的项目研究中, 首先需兼顾性能、可靠性和成本对已有各关键技术不同的方案设计作优化和抉择, 特别是光机电一体化馈源支撑的索系构型优化, 以及两种不同设计的选择. 第二, 不是所有的模型实验都考虑了洼地台址的形态、工程地址和水文地址等条件, 这些需要在进一步的台址勘测基础上, 加以完善. 最后, 由于经费限制, 有些实验模型的机构尚不完整, 例如反射面单元、馈源舱、馈源舱与外部的通道、下拉索地锚等, 需要细化, 为最终设计提供依据.

很多技术进步是指数包络的, 例如反映计算能力发展的摩尔定律, 芯片功能每 18 个月翻倍. 射电望远镜的灵敏度从 1940 年开始, 按指数增长至今, 提高了十万倍, 每 3 年翻一倍, FAST 符合望远镜进步曲线的预测. FAST 作为一个多学科研究平台, 将极大地提升我国在天文学和其他基础学科的研究能力; 同时将在日地环境研究、国防建设和国家安全等方面发挥不可替代的作用; 其项目建设本身, 也将推动众多高科技领域的发展, 促进西部经济发展和社会进步.

致谢 该研究集成了国内近 30 多个研究团组百余位研究人员的艰苦努力, 除对他们的工作表示感谢之外, 作者也因为不能在这里完整综述他们开拓性的贡献而表示歉意.

参 考 文 献

- 1 Nan R D, Peng B. A chinese concept for the 1 km² radio telescope. *Acta Astronautica*, 2000, 46(10~12): 667~675
- 2 Nan R D, Nie Y P, Peng B, et al. Site surveying for the LT in Guizhou province of China. In: Strom R G, Peng B, Nan R D, eds. *Proceedings of the LTWG-3&W-SRT*. 1995, Beijing: IAP, 1996. 59~66
- 3 Qiu Y H. A novel design for a giant Arecibo-type spherical radio telescope with an active main reflector. *MNRAS*, 1998, 301: 827~830
- 4 Duan B Y, Xu G H, Wang J L. Integrated optimum design of mechanical and electronic technologies for antenna structural system. In: Strom R G, Peng B, Nan R D, eds. *Proceedings of the LTWG-3&W-SRT*. 1995, Beijing: IAP, 1996. 144~151
- 5 Zhang H, Ye P, Qi L, et al. Stability analysis of a suspended parallel manipulator. In: Huang T, eds. *Proceedings of The 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*. Beijing: China Machine Press, 2004, 4: 1772~1776
- 6 Ren G X, Lu Q H, Hu N, et al. On vibration control with Stewart parallel mechanism. *Mechatronic*, 2004, 14: 1~13
- 7 Nan R D, Ren G X, Zhu W B, et al. Adaptive Cable-mesh Reflector for the FAST. *Acta Astronomica Sinica*, 2003, 44 Suppl: 13~18
- 8 Li G Q, Shen L, Luo Y F, et al. Analysis for reflector aluminum mesh panels of Five-hundred meter Aperture Spherical Telescope. *Ap&SS*, 2001, 278(1): 225~230
- 9 Duan B Y. A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis. *Mechatronics*, 1999, 9(1): 53~64
- 10 Ren G X, Lu Q H, Zhou Z. On the cable car feed support configuration for FAST. *Ap&SS*, 2001, 278(1): 243~247