



大型射电望远镜天线发展动态及机电耦合应用

严粤飞¹, 王从思^{1*}, 李帅¹, 王文娟¹, 段宝岩¹, 王娜², 许谦², 李琳³, 孔德庆⁴, 王海仁⁵

1. 西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 西安 710071;

2. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;

3. 新疆大学物理与技术学院, 乌鲁木齐 830046;

4. 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

5. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023

*联系人, E-mail: congsiwang@163.com

收稿日期: 2022-04-03; 接受日期: 2022-05-16; 网络出版日期: 2022-11-21

国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203600)资助项目

摘要 射电天文望远镜作为射电天文学中不可或缺的仪器, 其平稳运行至关重要. 本文首先以引力波的发现、中子星的合并以及首张黑洞照片的拍摄等重大天文发现为切入点, 介绍了射电望远镜在射电天文学中的重要性. 同时, 随着射电天文学步伐的前进, 射电望远镜也需要朝着更大的口径和更高的指向精度方向发展, 这也使得其中的机电耦合关系愈发紧密. 解决射电望远镜的机电耦合问题, 发展机电耦合技术也就成为大口径射电望远镜平稳高效运行的关键. 为此, 本文概述了近10年来已建成并投入使用的射电望远镜, 以及在建和将建的射电望远镜的进展, 指出了机电耦合技术在射电望远镜设计制造和观测运行中的重要作用. 然后, 系统性地总结了近年来机电耦合技术在射电望远镜中的发展和应用. 最后, 基于射电天文学的发展对大口径射电望远镜天线性能提出的苛刻要求, 提出未来机电耦合的研究热点.

关键词 射电望远镜, 大口径, 高指向精度, 机电耦合, 性能保障

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Ba, 89.20.Bb

1 引言

近年来, 在诸多重大的天文学发现项目中, 射电望远镜的身影比比皆是. 例如, 在2014年的原初引力波发现中^[1,2], 科学家使用了10 m口径的南极望远镜(South Pole Telescope, SPT, 位于南极洲). 2017年, 欧洲南方天文台使用了4台位于智利的超大望远镜观测到了两颗中子星的合并^[3]. 在2019年拍摄到的首张黑洞照片

背后, 共计8台望远镜(或望远镜阵列)被组合成事件视界望远镜(Event Horizon Telescope, EHT)用于全球观测^[4], 其中就包括阿塔卡玛阵列(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA, 共有54台12 m口径和12台7 m口径的射电望远镜, 位于智利)、阿塔卡马探路者实验望远镜(Atacama Pathfinder Experiment Telescope, APEX, 12 m口径, 位于智利)、詹姆斯-克拉克-麦克斯韦望远镜(James Clerk Maxwell Telescope,

引用格式: 严粤飞, 王从思, 李帅, 等. 大型射电望远镜天线发展动态及机电耦合应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 129501
Yan Y F, Wang C S, Li S, et al. Development of large-aperture radio telescopes and applications of coupled structural-electromagnetic theory (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 129501, doi: [10.1360/SSPMA-2022-0121](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0121)

JCMT, 15 m口径, 位于夏威夷)、亚毫米波阵列(Sub-millimeter Array, SMA, 共有8台6 m口径的射电望远镜, 位于夏威夷)、亚毫米波天线(Submillimeter Telescope, SMT, 10 m口径, 位于美国亚利桑那州)、大型毫米波天线(Large Millimeter Telescope, LMT, 50 m口径, 位于墨西哥)、皮克-维莱塔望远镜(Pico Veleta Telescope, PVT, 30 m口径, 位于西班牙)和前面提到的SPT. 在2020年, 欧洲甚长基线干涉网(European VLBI Network, EVN)使用了其他8台望远镜观测到了多个重复的快速射电暴源^[5], 包括埃菲尔伯格望远镜(Effelsberg Telescope, 100 m口径, 位于德国)、天马望远镜(Tianma Telescope, 65 m口径, 位于中国上海)、梅迪奇纳望远镜(Medicina Telescope, 32 m口径, 位于意大利)、托伦望远镜(Toruń Telescope, 32 m口径, 位于波兰)、伊尔贝恩望远镜(Irbene Telescope, 32 m口径, 位于拉脱维亚)、卓瑞尔河岸天文台型号2望远镜(Jodrell Bank Mark II, 25 m×38 m, 位于英国)、翁萨拉望远镜(Onsala Telescope, 25 m口径, 位于瑞典)和一台韦斯特博克阵列(Westerbork Array, 共有11台25 m口径的射电望远镜, 位于荷兰)中的望远镜.

在这些发现中, 射电望远镜都起到了至关重要的作用. 在进行天文学观测时, 天体不仅能在可见光下观察到, 并且还会向外辐射出无线电波^[6]. 射电望远镜作为接收这些无线电波的设备, 巨大的天线本体是其最明显的特征^[7]. 作为典型的机电耦合装备, 射电望远镜的天线本体由电气和机械结构两大部分组成, 每台射电望远镜的底座上都会安装一部天线, 并且至少有一个接收设备用于检测信号. 其中天线的结构部分不仅是天线电性能实现的载体和保障, 且往往制约着电性能的实现^[8]. 反射面天线是理想的射电望远镜类型, 其能够很好地将无线电波反射到一点处. 随着射电天文学的不断发展, 天线系统的高灵敏度和高分辨率要求在保证面形精度的同时增大天线的有效接收面积^[9], 这就意味着需要增大反射面天线的口径. 而随着天线口径的增大, 天线结构重量呈几何级数递增. 庞大的重量使天线结构的刚度保障越来越困难^[10]. 与此同时, 天线工作频率的提高对天线反射面精度的要求也高到了空前的程度, 如即将建设的中国新疆奇台110 m口径天线^[11], 其设计工作频率高达115 GHz, 而表面均方根误差RMS要求达到0.2 mm. 如此高的精度要求, 对大口径天线结构设计提出了前所未有的挑战.

射电望远镜电性能与机械结构的相互影响与制约使得大口径高性能单碟天线的研制周期偏长, 同时复杂观测环境导致望远镜运维难度颇大. 为此, 本文首先概述了近年来射电望远镜的发展动态, 包括各大建设完成以及正在建设中或筹建的天线, 然后总结了射电望远镜机电耦合关键技术, 从设计制造和观测运行的两个维度, 对关键技术进行逐个解析. 在此基础上, 探讨了射电望远镜未来的研究热点, 为射电望远镜的有效运维提供技术参考.

2 射电望远镜发展动态

世界上正在服役的大型射电望远镜, 除了在引言中提到的, 还包括绿岸望远镜(Green Bank Telescope, GBT, 100 m×110 m口径, 位于美国西弗吉尼亚州)、撒丁岛望远镜(Sardinia Radio Telescope, SRT, 64 m口径, 位于意大利)、野边山望远镜(Nobeyama Telescope, 45 m口径, 位于日本)、洛弗尔望远镜(the Lovell Telescope, 76 m口径, 位于英国)、帕克斯射电望远镜(Parkes Radio Telescope, 64 m口径, 位于澳大利亚)、耶韦斯射电望远镜(Yebes Telescope, 40 m口径, 位于西班牙)以及位于中国新疆乌鲁木齐的26 m南山望远镜、云南昆明40 m望远镜、北京密云50 m望远镜、天籁望远镜阵列等. 这些望远镜在文献[6,7,9,12]中做了详细的归纳, 这里不再展开. 此外, 阿雷西博射电望远镜(Arecibo Telescope, 305 m口径, 位于美属波多黎各岛)作为世界上第二大的单镜面固定式射电望远镜, 在服役了近60年后, 由于悬挂的电气接收部分坠毁, 随之损毁的还有反射面主体, 已在2020年底正式退役.

本节将着重介绍近年来已建成并投入运营的以及正在建设和今后将要建设的各个射电望远镜的发展动态.

2.1 近年来已建成并投入运营的射电望远镜

(1) 中国喀什深空站射电望远镜

位于中国新疆的喀什深空测控站是中国深空测控网中三个深空测控站中的一个, 另外两个分别是位于黑龙江的佳木斯深空测控站和位于阿根廷的南美深空测控站^[13]. 喀什深空站于2013年建成并投入使用, 最开始只有一套具备S/X/Ka三个频段测控能力的35 m反射面天线. 到2020年底, 喀什深空站新建成了3座35 m

口径的天线(图1), 与原有的35 m天线组成了中国首个深空天线组阵系统, 其数据接收能力与66 m口径天线等效. 在深空天线组阵系统正式启用后, 直接投入到了天问一号、嫦娥四号和嫦娥五号测控任务中. 值得一提的是, “鹊桥”作为嫦娥四号月球探测器的中继通信卫星, 它携带的4.2 m口径的展开天线是国内外深空探测任务中所采用的最大口径的天线^[14]. 同时, “鹊桥”是中国首颗、也是世界首颗运行在地外轨道上的中继卫星.

(2) 中国佳木斯深空站射电望远镜

佳木斯深空站, 位于中国黑龙江省, 于2013年建成并投入运营, 建设有66 m口径的反射面天线, 是当时中国最大的深空探测天线^[15], 工作在S/X双频段. 佳木斯深空站自投入使用以来, 与喀什深空站一起, 长期为中国航天事业保驾护航, 为嫦娥三号、嫦娥四号、嫦娥五号卫星以及天问一号探测器提供了测控支持.

(3) 中属阿根廷深空站射电望远镜

在天问一号火星探测器发射任务中, 阿根廷深空站率先捕获到探测器目标. 探测器随后相继被佳木斯深空站和喀什深空站成功捕获. 2014年, 中国政府获批在阿根廷建设中国的首个海外深空测控站. 2017年, 阿根廷深空站建成并投入运行了一套具备S/X/Ka三种波段测控能力的深空测控系统^[13]. 至此, 我国已基本具备了多频段测控能力, 初步建成了包括测控、数传和干涉测量等多功能于一体的深空探测网, 对深空探测器的遥控比达到90%以上, 总体水平位于世界第一梯队^[16].

(4) 上海天马65 m射电望远镜

位于上海松江佘山的天马65 m望远镜, 于2008年立项^[17], 2009年开始设计建设, 并在2012年完成了一阶段的建设任务, 具备了S/X, L, C波段的甚长基线干涉测量技术(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)观测能力^[18], 到2016年, 添加了Ku, X/Ka, K和Q波段的接收机. 此外, 天马望远镜是国内第一台配有主动面系统的射电望远镜, 在开启主动面系统后, 可以使面形精度优于0.3 mm. 天马望远镜在运行阶段高质量地完成了“嫦娥”系列任务和火星探测任务等, 并于2017年完成了总体验收, 目前正积极服务于国内的射电天文观测.

(5) 陕西吴平40 m射电望远镜

中国科学院国家授时中心吴平观测站位于陕西省

洛南县, 建设有一台40 m口径的反射面天线, 主要用于跟踪和接受全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)卫星的下行信号, 实现GNSS卫星信号的高精度观测和分析^[19], 同时会用于开展脉冲星和谱线等射电天文观测^[20], 未来也计划开展VLBI的工作^[21]. 该射电望远镜于2014年建成并完成验收, 目前正在开展脉冲星时间尺度的研究, 已经对多颗高精度毫秒脉冲星进行了长期的计时观测.

(6) 天津武清70 m射电望远镜

在“祝融号”火星探测器着陆火星后, 由于地火之间4亿公里的遥远距离, 导致探测器发送回来的信号极其微弱. 为了保证火星探测器的平稳运行, 中国科学院国家天文台在天津武清新建了一台70 m口径的天线作为高性能接收系统, 主要工作在S/X/Ku频段. 2020年4月完成了反射体的整体吊装. 2021年2月完成了验收, 与北京密云50 m天线、云南昆明40 m天线一起负责接收天问一号的回传数据. 天津武清70 m天线的建成, 使其成为了目前亚洲最大的单口径全方位可转动的天线.

(7) 500 m口径球面射电望远镜

在阿雷西博望远镜退役后, 500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)成为了世界上唯一一台“观天巨眼”. 贵州省平塘县内的FAST是目前世界上口径最大、灵敏度最高的射电望远镜(图2), 从1994年开始选址和预研^[22], 到2002年11月立项, 再到2011年开工兴建, 于2016年9月完工, 经过近4年的调试与试运行, 在2020年1月通过了国家验收, 前后历经26年. 在调试与试运行阶段, 利用FAST就发现了超过100颗新脉冲星^[23]. FAST主要工作在70 MHz–3 GHz, 与阿雷西博相比, FAST在L波段的扫描速度是它的三倍, 天空覆盖范围是它的两倍^[24]. FAST的成功建成与运行, 正在射电天文学领域发挥着无与伦比的作用.

(8) 格陵兰望远镜

格陵兰望远镜(Greenland Telescope, GLT)位于格陵兰岛西北部, 是一台工作在毫米/亚毫米波段的12 m口径的天线, 该天线是ALMA的原型天线, 本来位于智利, 后由美国国家科学基金会赠予史密森尼天体物理天文台(the Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, ASIAA)^[25]. 经过升级改造, 于2017年建设完成并投入运行. 该天线目前主要参与了M87星

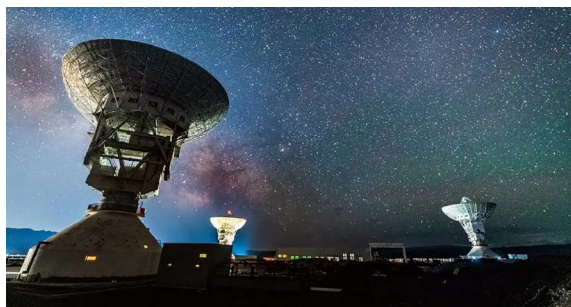


图 1 (网络版彩图)喀什深空站(<https://www.163.com/dy/article/FI7MU2RQ0512B07B.html>)

Figure 1 (Color online) Kashgar Deep Space Station (<https://www.163.com/dy/article/FI7MU2RQ0512B07B.html>).



图 2 (网络版彩图)中国天眼(https://www.cas.cn/zt/kjzt/fast/zxjz/201609/t20160925_4575830.shtml)

Figure 2 (Color online) FAST (https://www.cas.cn/zt/kjzt/fast/zxjz/201609/t20160925_4575830.shtml).

系的VLBI观测^[26,27].

(9) 加拿大氢强度测绘实验射电望远镜

加拿大氢强度测绘实验射电望远镜(Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment Telescope, CHIME)由4个20 m×100 m的半圆柱形抛物面反射器组成, 2017年9月建成, 2018年9月开始运行观测. CHIME工作在400–800 MHz频段上, 每个圆柱体配备256个双偏振馈源, 将连续成像整个北方的天空, 以测量宇宙中的中性氢的分布并研究暗能量的性质^[28]; 通过将收集到的宇宙信号转化成氢密度的三维图, 从而用于测量宇宙的膨胀历史^[29]; 同时CHIME也会被用于探索新的快速射电暴和脉冲星^[30].

(10) 澳大利亚平方公里阵探路者

澳大利亚平方公里阵探路者(Australian Square Kilometer Array Pathfinder, ASKAP)作为首个平方公

里阵(Square Kilometre Array, SKA)的先驱项目, 位于西澳大利亚的默奇森射电天文台, 共有36台直径为12 m的反射面天线^[31]. ASKAP于2009年开始建设, 到2012年完成了所有天线的部署与组装^[32]. ASKAP的原型是布尔迪工程测试阵列(Boolardy Engineering Test Array), 它是第一台使用相控阵馈电技术的孔径合成射电望远镜^[33]. 利用ASKAP进行的早期科学项目跨越了天体物理学的所有领域, 这些项目的成功进行表明ASKAP的科学前景非常有吸引力^[34].

(11) 默奇森广角阵列

默奇森广角阵列(Murchison Widefield Array, MWA)同样位于默奇森射电天文台, 也是SKA的先驱项目之一. MWA的第一阶段于2013年完成调试, 共建设了128个孔径阵列^[35], 然后进入全面运行. 第二阶段于2017年完成, 并于2018年正式启动, 第二阶段的建设将天线数量翻了一倍^[36]. MWA的主要科学目标聚焦在四个关键科学主题: 搜索早期宇宙再电离时代的21 cm辐射的红移; 银河和河外巡天; 时域天体物理学; 以及研究太阳、日光层、电离层中的科学问题和空间天气^[37].

(12) 卡鲁望远镜阵列

卡鲁望远镜阵列(Karoo Array Telescope, MeerKAT)是SKA中的中型先驱望远镜仪器组^[38], 位于南非, 由64台直径为13.5 m的偏置反射面天线构成. MeerKAT的概念最早在2009年提出^[39], 最开始建造了7台原型样机(KAT-7)^[40], 一直到2018年7月, 才最终完成了64台天线的建设组网. 经过10年的设计和建设, 在MeerKAT正式投入运行之后, 使用其观测到的银河系中心区域的相关工作就取得了不错的成果^[41].

(13) 氢再电离时代阵列

氢再电离时代阵列(Hydrogen Epoch of Reionization Array, HERA)位于南非卡鲁射电天文保护区, 在2016年部署了19台14 m口径的抛物面天线, HERA的主要目标是探测来自再电离时代的宇宙信号^[42]. 后期HERA将部署共计350台天线组成阵列, 同时, HERA也是SKA四个先驱项目中的最后一个^[43].

(14) 低频率阵列

低频率阵列(Low-Frequency Array, LOFAR)是一种大型分布式射电望远镜^[44], LOFAR于2012年12月开始正式投入运行观测, 使用全向偶极子天线作为阵元, 工作在10–240 MHz频段. 由于是固定式的天线, 因此

LOFAR使用孔径合成软件进行成像^[45]. LOFAR较低的工作频段, 使其能够极大地促进低无线频段脉冲星的观测效率^[46].

2.2 正在建设和规划筹建的射电望远镜

(1) 新疆奇台110 m射电望远镜

超大口径全向可转动射电望远镜QTT (Qitai Telescope)定址在中国新疆维吾尔自治区奇台县, 其主反射面的直径高达110 m, 工作频率最低150 MHz, 最高到115 GHz^[47]. QTT较高的工作频段与FAST有很强的互补性^[48]. FAST的整体反射面结构是固定在地面上的, 在观测时需要通过主动面结构控制反射面的形成, 而QTT不仅方位俯仰可转动, 并且还配备了主动面系统, 使其成为世界上最大的单口径全可动天线. QTT的前期预研工作也有近10年, 于2017年年底批复建设, 预计工期5年, 将在2023年前后开工建设. QTT的建成, 将在引力波探测、黑洞发现、星系起源等基础科学研究领域发挥重要作用^[12].

(2) 云南景东120 m射电望远镜

2020年8月, 云南省政府与中国科学院正式签署了“共建景东120 m脉冲星射电望远镜(Jingdong Radio Telescope, JRT)合作协议”; 9月, 项目的启动仪式在台址云南省普洱市景东镇举行, 标志着这台即将成为世界上口径最大的全方位可转动低频射电望远镜正式开始建设, 预计建设周期为三年^[49]. JRT的工作频率集中在0.3–10 GHz, 主要观测目标是脉冲星, 将开展引力波探测、强引力场相对论检验等前沿科学研究. 与QTT整体反射面均采用实体面板不同, JRT因为是低频工作, 同时为了降低整体重量, 只在中心40 m口径的位置采用实体面板, 其余部分将采用网状面板.

(3) 西藏日喀则与吉林长白山40 m射电望远镜

在即将开始的探月四期任务中, 为满足精确的VLBI测轨需求, 中国科学院计划在西藏日喀则与吉林长白山各建一台40 m口径的射电望远镜测控站. 自2018年起, 上海天文台7次奔赴西藏考察台址选址情况, 最终将日喀则市桑珠孜区聂日雄乡与萨迦县扯休乡交界处作为新建探月工程40 m射电望远镜的建设地点. 2019年, 上海天文台与日喀则市人民政府签订合作协议, 意味着在西藏中南部即将矗立起一台新的反射面天线, 助力中国航天走向更远. 此外, 上海天文台在2021年也确定了长白山40 m射电望远镜的建设地址,

推进了探月四期“六站一中心”的建设.

(4) 南京紫金山天文台60 m亚毫米波望远镜

为促进我国的亚毫米波天文观测能力, 中国天文界计划建造一台60 m口径的亚毫米波射电望远镜, 目前该项目还处于预研和立项阶段. 在2018年, 由南京紫金山天文台牵头, 举办了大型亚毫米波望远镜天线关键技术研讨会, 围绕60 m口径亚毫米波望远镜天线的设计、建设和运行做了技术交流与研讨.

(5) 日本大型亚毫米波望远镜

在2008年国际天文界提出下一代大口径单反射面望远镜的理念后, 日本国家天文台于2014年提出了大型亚毫米波望远镜(Large Submillimeter Telescope, LST)的设计概念, 并于2016年发表了第一篇相关论文^[50], 这台望远镜预计将工作在70–950 GHz. LST在2020年被日本科学委员会列为2020总体规划天文学和天体物理学领域的大型学术项目之一.

(6) 阿塔卡玛大口径亚毫米波望远镜

预计建造在智利的阿塔卡玛大口径亚毫米波望远镜(Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope, AtLAST)也是一台50 m口径的反射面望远镜, 同样工作在亚毫米波段. 相关的设计概念在2015年提出^[51], 并在2020年对AtLAST项目做了更加详细的介绍^[52]. 可以看到, 由欧盟领导的AtLAST项目和上述的LST项目口径相同, 都是工作在亚毫米波段, 因此, 日本科学委员会和欧盟考虑将两个项目合并, 预计在2024年合并完成^[53].

(7) 塞罗查南托阿塔卡马望远镜

塞罗查南托阿塔卡马望远镜(Cerro Chajnantor Atacama Telescope, CCAT)最初被称为康奈尔加州理工学院阿塔卡玛望远镜(Cornell Caltech Atacama Telescope), 相关设计理念由康奈尔大学、加州理工学院和喷气动力实验室共同提出. 三家机构联合研究在智利北部一座海拔5000 m的山峰上建造一台25 m口径的亚毫米波望远镜^[54], 该天线的背架和主反射面都将采用碳纤维增强塑料建造^[55], 以达到10 μm 的表面均方根误差要求^[56]. 但该天线由于资金的问题, 虽然早在2006年就提出设计理念, 至今仍未开始建设.

(8) 泰国40 m射电望远镜

泰国40 m射电望远镜(40-m Thai National Radio Telescope, TNRT)由泰国国家天文研究所于2017年提出, 于2020年组装完毕, 在调试完毕后就会投入到脉

冲星等天文学观测中, 同时也会加入全球VLBI网络. 该天线是西班牙耶韦斯射电望远镜的升级款, 工作在 300 MHz–115 GHz^[57].

(9) 月球环形山射电望远镜

月球背面拥有极佳的天文观测环境, 因为月球可以作为物理屏障, 阻挡来自地球或太阳的信号干扰. 美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在2018年提出了月球环形山射电望远镜(Lunar Crater Radio Telescope, LCRT)的建设提议^[58], 利用月球上已有的陨石坑, 采用爬行机器人来布置金属丝网, 从而形成直径为1 km的抛物面反射体^[59]. 该望远镜将工作在3–60 MHz的超低频段, 主要的科学目标是探索宇宙中第一批恒星形成时星际介质的演化过程.

(10) 宾果项目射电望远镜

宾果项目(Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutral Gas Observations, BINGO)旨在建造一台用来探测重子声学振荡的射电望远镜^[60], 它将由2部40 m口径的固定式望远镜组成, 配备一组具有50个接收器的馈源阵列. 宾果项目的概念早在2012年就已提出, 随着项目的逐步推进, 望远镜的主体结构部分、光学部分以及接收器样机在2019年已建造完成, 整体的建设预计将在2022年前后完成^[61].

(11) 氢强度和实时分析实验射电望远镜

氢强度和实时分析实验(Hydrogen Intensity and Real-time Analysis Experiment, HIRAX)是一个位于南非卡鲁的射电望远镜阵列, 与CHIME有着相同的工作频段和科学目标, CHIME主要用来探测北方天空, 而HIRAX则用来探测南方天空^[62], 二者形成互补. HIRAX将由1024台6 m口径的反射面天线组成阵列^[63], 在2017年首先建造的8台天线组成的样机阵列, 用于前期的实验验证, 后续将建造拥有128台天线的探路者阵列, 预计在2022年扩展到最终的1024台天线阵列^[64].

(12) 平方公里阵

SKA是一个全球化政府间的大型合作项目^[65], 相关的概念最早在20世纪90年代初期提出^[66]. SKA计划建设在南非(主要建设中频阵列和碟形阵列)和澳大利亚(主要建设低频阵列), 建成后将拥有超过1 km²总收集面积, 巨大的信号采集面积使其拥有极高的灵敏度. 同时, 通过采用不同的天线类型组成的阵列(SK A低频阵列: 由偶极子天线组成阵列, 覆盖50–350 MHz; SKA

中频阵列以及SKA碟形阵列: 由12 m或15 m口径天线组成阵列, 覆盖350 MHz–20 GHz), SKA可以工作在50 MHz–20 GHz的超宽频带上.

2.3 小结

从上述的发展动态可以看出, 在射电天文领域, 反射面天线因为能够以较低的成本实现高带宽、高增益和高分辨率^[67], 从而成为了不可或缺的角色. 同时, 也正是由于越来越高的增益和分辨率要求, 使得天线口径越来越大, 电性能与结构之间的相互影响和制约导致的机电耦合问题也日益突出, 那么如何解决射电望远镜中的机电耦合问题就至关重要. 下一节从设计制造和观测运行两大角度出发, 总结出射电望远镜中的机电耦合关键技术的研究进展(图3).

3 射电望远镜机电耦合研究进展

3.1 机电耦合建模及设计

(1) 机电耦合理论模型

对于大型射电望远镜来说, 文献^[68]指出由于其反射面口径大, 结构复杂, 且长时间工作在室外环境下, 受到诸如自重、日照、风雪等环境载荷所带来的影响也较为严重, 这些因素所造成的系统误差以及天线在安装制造过程中所产生的随机误差均会影响到望远镜最终的性能(如指向、增益等). 为了准确快速地分析这些误差所造成的影响, 就需要一个高效并精确的计算工具^[69], 即反射面天线的机电耦合模型.

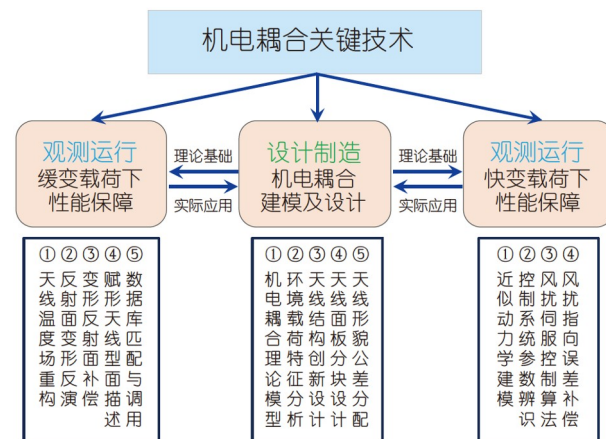


图 3 (网络版彩图)射电望远镜机电耦合技术

Figure 3 (Color online) The coupled structural-electromagnetic theory.

对于前馈式反射面天线或工程中常用的双反射面天线(其副反射面和馈源可以由等效馈源法等效为副面虚焦点上的馈源)来说, 文献[70]指出影响电性能的主要结构因素可以概括为三个方面: 主反射面误差、馈源指向误差和馈源位置误差. 因此, 可以从这三个方面分别分析其对理想方向图的影响, 最终得到机电耦合模型.

对于主反射面来说, 其上的随机误差可以描述为主反射面上不同的分布函数, 然后叠加到系统误差对反射面变形的影响上. 系统误差是确定性误差, 可以通过有限元分析得到. 主反射面区域可以视为馈源的远区, 当主反射面变形较小时(与天线整体尺寸相比), 主面误差对口径面电磁场幅度的影响可以忽略不计, 认为主面误差只会引起口径面电磁场的相位误差^[71,72]. 对于馈源指向误差来说, 也即当馈源指向与反射面中心轴存在角度误差时, 馈源到口径面的照射路径会发生变化, 将会给口径面电磁场带来幅度误差, 会引起副瓣电平抬升. 对于馈源位置误差来说, 馈源位置的偏移会导致馈源相位中心发生变化, 从而引起口径面电磁场的相位变化^[70].

结合上述三个方面的误差影响以及反射面天线的理想方向图公式, 就可以得到最终的反射面天线机电耦合模型^[73]:

$$E(\theta, \phi) = \iint_A \frac{f_0(\xi - \Delta\xi(\delta(\beta)), \phi' - \Delta\phi'(\delta(\beta)))}{r_0} \cdot \expj[k\rho' \sin\theta \cos(\phi - \phi')] \cdot \expj[\varphi_f(\delta(\beta)) + \varphi_s(\delta(\beta)) + \varphi_r(\gamma)] \rho' d\rho' d\phi', \quad (1)$$

式中, $f_0(\xi - \Delta\xi(\delta(\beta)), \phi' - \Delta\phi'(\delta(\beta)))$ 为馈源指向误差对口径面电磁场相位的影响, $\varphi_f(\delta(\beta))$ 为馈源位置误差对口径面电磁场相位的影响, $\varphi_s(\delta(\beta))$ 和 $\varphi_r(\gamma)$ 分别为主面变形和主面随机误差对口径面电磁场相位的影响.

(2) 环境载荷特征分析

在建立机电耦合模型之后, 为了在设计阶段准确地分析环境载荷(如风、温度、重力等)所带来的各项影响, 从而对望远镜的指向或增益等电性能给出评估, 还需要准确地分析出各种环境载荷对望远镜性能的影响机理.

自然环境下的风可以分为稳态风和瞬态风两种, 稳态风的周期一般远大于结构的自振周期, 它对结构的影响可以视为不随时间改变的静力, 从而以静载荷

的形式施加到结构上进行分析, 如文献[74]分析了天线在8级风速下的结构静力变形. 文献[75]通过风洞实验分析了天线在14 m/s风速下反射面上的风压分布情况; 而瞬态风的周期较短, 它的作用性质是动力的, 会引起结构的振动, 结构的振动则会引起天线指向的变化. 文献[76]分析了天线在瞬态风影响下的振动和指向误差变化情况; 对于射电望远镜较大口径面, 无论是稳态风还是瞬态风都会在天线上产生一定扭矩, 在该扭矩的影响下, 天线会发生一定的扭转变形, 从而引起天线指向的变化. 文献[77,78]分析了望远镜在风载荷影响下天线所受到的扭矩情况. 温度载荷和重力载荷均会引起天线反射面表面的变形, 从而影响望远镜最终的指向和增益性能. 任何材料在不均匀的温度场下都会产生一定的变形, 望远镜由于一直处于自然环境下, 会受到太阳的影响, 太阳的照射会在反射面表面以及背架处产生阴影区, 从而导致天线受热不均, 最终引起反射面及背架的变形. 文献[79]分析了天线在不同太阳入射角下的反射面热应力和变形情况. 任何物质都会受到重力的作用, 因此, 重力载荷的影响是无法避免的, 但由于重力不会变化, 只要天线的姿态不变化, 那么它受到的重力变形也就不会变化, 可以通过仿真分析或者各种测量手段来获得天线在重力载荷下的变形, 如全站仪^[80]、摄影测量^[81]、激光扫描仪^[82]等.

(3) 基于机电耦合的结构创新设计

重力载荷的影响虽无法避免, 但可以通过结构保型设计的手段来降低其带来的影响^[83]. 最简单也是最有效的方法就是减轻天线背架的重量, 但如果是单纯通过减少桁架数量来减轻背架的重量, 势必会导致天线整体强度和刚度的降低. 而用预应力索替换某些桁架结构, 在保证结构刚度和强度的前提下, 既可以减小天线背架的重量, 也可以改变结构工作时的应力分布, 减小结构变形^[84]. 文献[85]用预应力索替换掉了天线的部分受拉杆件, 在相同精度下, 通过索桁组合结构降低了8 m口径反射面天线15%的重量. 此外, 也可以对天线结构进行等柔度设计, 即需要对天线的结构形式进行拓扑优化, 保证其节点变形的一致性, 等柔度设计在HUSIR 37 m^[86], LMT 50 m^[87], SRT 64 m^[88], Effelsberg 100 m^[89]等天线中均有体现. 同时, 文献[90]也利用等柔度设计对即将建设的QTT 110 m天线反射体的支撑结构进行了优化, 通过仿真分析, 其采用的16

点等柔度支撑结构可以使天线的自重变形减小。

对于射电望远镜来说, 其天线座无论是轮台式还是滚轮式, 所需的驱动功率都比较大, 无论怎样对背架或座架进行传统的优化, 降低天线自重的效果都不够显著, 只有对结构进行创新, 才能大幅降低天线的重量。相比于传统的串联驱动, 并联的驱动方式具有刚度大、精度高、承载能力大以及运动负荷小等优点^[91], 比如文献[92]利用了六自由度Stewart平台对AMiBA望远镜进行指向控制。在射电望远镜中, Stewart平台多用于控制副反射面的姿态, 并不适用于大型的天线结构; 文献[93]提出了一种新型的索桁-并驱式天线驱动方式, 并利用这种驱动方式对26 m口径天线进行了实例验证, 新型驱动方式使该天线自重降低了54.3%, 驱动功率降低了63.3%。

(4) 天线面板分块设计

上述的天线结构保型设计是为了保证最终的天线反射面的表面精度, 而随着大型射电望远镜对表面精度的要求越来越高, 天线面板的加工制造精度也至关重要。考虑到天线的加工、运输、安装以及生产制造成本等问题, 天线主反射面面板的合理分块设计是很有必要的。天线面板是通过模具加工出来的, 因此, 虽然面板越小制造精度就可以越高, 但相应的模具数量也会增加, 成本也会随之上升。同时, 天线面板越小, 天线反射面整体安装所需的支撑结构就越多, 这会导致背架结构越来越复杂, 自重也会增加。所以, 天线面板不是越小越好, 也就需要对天线面板的模具进行合理设计。文献[94]针对QTT 110 m天线, 通过合理的分块设计以及模具共享策略, 在满足了天线电性能要求的前提下, 将原始的23类模具缩减为了14类。

(5) 天线形貌公差分配

射电望远镜的结构设计是一个系统工程, 它的整体结构由多个子结构组成, 比如轮轨、座架、背架、馈源仓、主反射面以及副反射面等, 这些结构一起决定着最终望远镜的理想性能, 实际应用中, 还可以通过天线的控制系统等来对性能进行一定的控制与补偿, 文献[87]指出天线的结构设计就是需要在结构和控制之间找到最佳平衡点。因为射电望远镜的最终性能与面精度直接挂钩^[95], 而天线的面精度又是由各个子结构共同决定的, 这就意味着工程师需要对各个子结构系统的公差进行合理的分配与控制, 以往这个过程通常是工程师利用自己的设计经验来进行分配, 如

果最终性能不达标再进行调整, 是一个试错的过程。在建立机电耦合模型之后, 可以通过该模型来分析各个结构误差对最终电性能的影响情况, 从而得到天线各子结构对性能的影响程度, 再根据影响程度来更合理地分配公差精度, 如文献[96]分析了天线方位轴、俯仰轴等轴系误差和天线轮轨的轨道不平度对最终指向精度的影响情况; 文献[97]通过利用副反射面补偿技术放宽了对主反射面的精度要求, 该技术可以在设计阶段对天线主面板的公差分配提出一定的指导; 文献[71,97]的研究表明, 天线主面各环面板的精度对最终电性能的影响是不同的, 结合文献[94]一起说明了反射体靠近中心的面板精度对电性能的影响比外围的面板要大, 因此在加工过程中可以提高内圈面板的加工精度, 同时可以适当降低外圈面板的加工精度。

3.2 缓变载荷下的性能保障技术

(1) 温度场重构

温度载荷是射电望远镜的重要载荷之一, 其最显著的特点就是受日照影响大。获取天线温度场分布的方法有2种: 有限元仿真和温度传感器测量。有限元仿真会受制于计算速度的限制, 无法保证温度场获取的实时性; 而囿于天线整体结构限制, 工程人员也无法在天线上布置过多的温度传感器进行测量。为了保证天线温度场获取的准确性和实时性, 就需要通过合适的方法来利用少量的温度传感器测量得到的温度数据精确重构出天线整体的温度场分布情况。文献[98]将传感器测量与有限元仿真两种方法结合起来, 首先利用有限元仿真分析得到了天线在不同时刻的温度场数据库, 然后利用实测得到的温度数据对数据库进行查表快速得到整体温度场分布, 再利用测得的环境温度对温度场进行修正; 文献[99]利用了一种插值算法来对少量传感器测得的温度数据进行插值, 进而得到天线整体的温度场分布。

(2) 反射面变形反演

射电望远镜的反射面会在重力载荷、温度载荷的影响下发生变形, 而为了准确分析与实时补偿(如需要快速计算出促动器调整量、副面调整量和馈源指向调整量等)望远镜的最终性能, 快速获取反射面的形面信息至关重要。文献[100]构建了一种影响因子矩阵, 用于快速计算天线的热变形; 文献[101]利用了精确的衍射算法来评估反射面的重复变形; 文献[102]提出了一

种基于角度传感器快速计算天线面板变形的方方法; 文献[103]提出了一种基于最小二乘法的反射面拟合方法, 该方法基于最小二乘原理和积分极值定理计算出反射面拟合方程所需的6个关键参数, 进而得到反射面的拟合方程, 完成反射面的重构.

(3) 变形反射面的性能补偿

当射电望远镜主面或副面存在变形时, 就会造成天线增益降低、副瓣抬高、指向偏转等问题, 因此需要通过一定补偿方式来弥补这部分电性能损失, 如主动面调整、副面调整或馈源调整等方式. 文献[73]表明增益损失与反射面的表面均方根误差有关, 因此, 要补偿增益, 就需要尽量减小天线的表面均方根误差. 主动面调整技术的目的就在于此, 该技术通过在天线面板背部安装促动器来对主反射面进行主动调整, 利用促动器将变形后的面板移动至指定位置来减小表面均方根误差. 主动面技术在20世纪90年代提出^[104], 到如今世界上诸多大型射电望远镜都应用了该项技术. 文献[105]利用主动面技术对一台天线进行了升级, 使其有效地提高了观测效率; 文献[68]提出一种基于机电耦合理论的主动面调整方法, 该方法也利用了最小二乘原理来计算变形面与最佳工作面之间的距离, 再将距离信息输出给促动器, 进而完成主动面调整.

副面调整指的是调整天线的副反射面, 比如副面位姿调整、主动副反射面调整和阵列副反射面调整等. 副反射面位姿调整通常是利用有6自由度的Stewart平台来调整副反射面整体的位置, 使副反射面能更好地与主反射面匹配, 比如文献[106,107]详细描述了新疆南山26 m天线的副反射面中的Stewart系统, 并通过最大化增益确定了副反射面的调整位置; 主动副反射面调整类似于上述的主动面调整, 只不过是将促动器安装在副反射面上, 通过调整副反射面的面型来补偿电性能, 主动副反射面技术在GreenBank 43 m^[108], Haystack 37 m^[109]和Effelsberg 100 m^[110]等射电望远镜上均有体现. 阵列副反射面调整本质是电子补偿的一种, 利用阵列单元替换掉传统的副反射面, 通过控制每个单元的激励幅值和相位, 构建共轭匹配的焦平面场, 从而在孔径平面上实现等相位面. 文献[111]利用微带反射阵列作为副反射器, 补偿了由主反射面表面畸变引起的孔径面相位误差, 从而显著提高天线性能.

馈源调整主要分为馈源位姿调整和阵列馈源调

整, 简单来说, 馈源的位姿调整是将馈源的位置与姿态调整到最佳吻合抛物面焦点对应的理论位置, 类似于副面位姿调整, 文献[112]提出了一种基于远场信息确定反射面天线馈源调整量的方法; 阵列馈源调整也是电子补偿技术的一种, 利用阵列馈源代替传统的波导馈源, 通过电调的方式改变接收信号的幅值或相位来实现天线波束赋形, 从而实现补偿作用, 文献[113,114]介绍了带有低噪声放大器的双极化相控阵馈源, 大大提高了天线的测量速度.

(4) 赋形面天线型面描述

在反射面天线的应用过程中, 往往会有特殊波束覆盖的需求, 或者需要向目标区域进行有效的全向辐射功率, 此时就需要对天线的波束进行赋形, 而该类天线被称作赋形波束天线或赋形面天线. 天线的波束赋形可以通过改变天线波导馈电器件或天线面型结构实现. 得益于主动面技术的发展, 具有主动面技术的射电望远镜可以实现天线运行状态下的型面切换工作, 从而实现不同观测需求. 以FAST为例, FAST可以说是一台特殊的赋形面天线, FAST本体是500 m口径的球反射面, 在进行观测时, 需要通过安装在面板背部的促动器来调整面板的位置, 使它的部分面板组合成300 m口径的抛物面^[115], 这其中就涉及了球面到抛物面之间的转换. 可以看到, 赋形面型面切换过程中有两个方面的技术内容: 赋形波束天线的型面描述以及抛物面与赋形面之间的切换. 赋形面天线可以说是一类具有特殊型面的天线, 该类天线的型面没有标准的方程去描述, 因此在进行型面切换时首先就需要对目标型面进行描述, 文献[116]使用雅克比多项式描述赋形面天线的型面, 并利用粒子群优化算法得到了最终的型面描述方程; 文献[117]利用几何光学法得到了指定波束形状下的天线型面几何信息; 文献[118]提出了利用Zernike多项式描述赋形面天线的方法. 天线的面形切换一般都是在正常工作状态下进行的, 也就是说会受到外载荷的作用, 这就需要计算变形面到目标赋形面的调整量. 可以采用最佳拟合面的思想, 利用最小二乘法计算出了每个促动器节点所需的位移量, 从而实现了变形抛物面到赋形面的切换过程. 赋形面到抛物面的切换可以说是一个逆过程, 首先对赋形面型面和最佳工作曲面(通常情况是抛物面)进行描述, 再计算出赋形面与最佳工作抛物面之间个节点的位移量, 即可实现切换过程.

(5) 补偿数据库的匹配与调用

射电望远镜运行过程中, 往往对电性能的补偿有着实时性的要求, 提高观测效率. 对于温度载荷和重力载荷等缓变载荷的影响, 如果利用有限元仿真等方法来分析并计算最终的补偿量, 由于有限元模型计算比较耗时, 显然不能够满足实时性要求. 对于重力载荷来说, 天线任意姿态下的自重变形都是可以事先通过仿真等方式得到的, 对于温度载荷也是一样(如本节第一部分内容所述), 在知道变形信息的情况下, 也就可以事先计算出相对应的调整量, 在天线观测过程中通过查表法直接匹配和调用调整量即可, 换言之, 可以通过事先建立补偿数据库的方法来实现补偿量的快速获取, 其中的关键就在于数据库匹配调用的准确性. 文献[119]指出意大利的SRT 64 m天线预先将自重变形对应的天线补偿信息存储在数据库中, 在天线运行过程中通过查表实现实时补偿; 文献[120]利用优化后的最佳拟合面参数和主副反面的匹配度实时调用存储在副反射器数据库中的调整量, 以补偿主反射器的重力变形; 文献[121]通过建立基于瞬态温度场模拟的温度数据库, 然后利用实时测量数据和查表法对温度数据库中提取出的模拟温度场进行修正, 再结合望远镜的有限元模型, 可以实时计算热变形并用于热变形补偿; 文献[122]提出了一种用于快速匹配和调用补偿数据库的方法, 该方法通过匹配数据的均方根误差、相似性区域和关键性区域来保证数据库调用的准确性.

3.3 快变载荷下的性能保障技术

(1) 近似动力学建模

对于处在自然环境下的射电望远镜来说, 风扰由于其随机性与时变性, 已成为各个环境载荷中最复杂也是最难以解决的问题. 风载荷不仅会引起天线的变形, 也会造成天线的振动, 导致最终指向不稳, 观测性能不佳, 因此就需要研究如何抑制风扰振动. 为了描述反射面在扰动作用下变形(柔性、刚性)引起的指向偏差, 预估反射面的指向, 便于设计具有良好控制性能的系统, 就需要建立一个高精度的天线结构动力学模型. 对天线进行动力学建模可以采用理论建模的方式. 而理论建模可分为刚性建模、柔性建模以及刚柔混合模型. 如文献[123]采用刚性建模对GBT 110 m射电望远镜进行建模, 其优势为模型阶数较小, 但随着天线口径的增大, 天线结构所产生的柔性变形越来越无

法忽视, 但刚性建模无法反映天线柔性信息, 对于设计的控制器产生的实际控制效果不那么理想. 文献[124]介绍了利用柔性建模对大口径天线进行有限元分析的方法, 可以估计结构变形. 在进行有限元分析的基础上, 对天线进行模态分析, 选择对天线性能影响较大的模态保留, 进行模态缩聚, 降低自由度, 并与刚体模型相结合, 得到天线的整体动力学模型, 有利于进一步的设计控制器. 文献[125]基于模态叠加法, 建立了天线结构动力学模型, 并依据各阶振型模态对指向的影响程度对动力学模型进行缩聚, 进一步建立刚柔混合模型. 建立的面向指向控制的大型反射面天线动力学模型既有利于设计控制器, 又能够反映柔性变形对指向的影响.

(2) 伺服控制系统参数辨识

大型射电望远镜结构复杂且存在风载荷、摩擦等非线性影响, 难以进行精确理论建模, 这时可以利用系统建模的方式来建立精确的系统模型. 该方法是对从现场测试中获取的数据进行处理并利用参数辨识算法进行描述, 来表征系统行为, 建立一个能预测系统输出的精确模型. 系统辨识已发展出一系列的方法, 如阶跃响应法、神经网络系统辨识法、模糊逻辑系统辨识法等. 伺服驱动系统中的参数辨识主要包含两方面内容, 即内部电机电感等参数辨识与外部机械参数包括负载惯量、摩擦阻尼和轴系刚度等参数辨识. 如文献[126]利用系统在线辨识的方法实时采集控制对象输入输出数据, 使用四阶受控自回归滑动平均模型, 选用二次型指标对其参数进行最小二乘拟合, 建立系统数学模型. 文献[124]介绍了从现场测试数据得出速度环模型的过程, 其包括对天线白噪声测试、测试条件、输入和输出信号、开环和闭环测试、仪器设置以及系统识别测试的描述. 数据描述和数据处理的分析背景也包括在内. 其次, 讨论天线模型与其仰角位置以及碟形天线直径的相关性, 最后对解析模型和识别模型进行比较.

(3) 抗风扰伺服控制算法

对于大口径、高频段天线, 风扰由于其随机性与时变性, 导致其带来的指向误差依旧是最棘手、最难以克服的问题之一. 为提高天线的指向精度, 要有效地抑制由风扰带来的指向误差, 需针对其特点研究有效的误差分析和控制补偿方法, 设计合适的伺服控制算法和伺服控制系统. 文献[127]针对LMT 50 m天线, 对比了4种控制算法的天线的抗风扰能力, 包括PI-PI,

PI-LQG, LQG-PID, LQG-LQG算法, 仿真结果显示 LQG-LQG的控制效果最佳. 文献[128]指出系统应用模糊PID控制器比应用传统PID控制器时具有更好的动态性能, 并且, 在系统中引入干扰观测器能更有效地减少指向误差. 文献[129]结合不确定模型开发出了可以应用于不同天线并且能有效抑制风扰的 H_∞ 控制器. 此外, 阵风的频率远高于控制系统的响应频率. 当风的风向与风速改变时, 控制系统来不及调整自身的控制策略, 使得控制系统不能很好地对风扰造成的指向误差进行补偿. 因此, 未来会采用基于阈值的调控策略^[7,130], 来等效一段时间天线所受风的干扰, 即对于一段时间的风, 均采用一个调整量. 在某些长时间大风场下, 可以采用主动面(阈值下)与伺服双系统调控策略, 达到稳定控制的效果.

(4) 基于风预测的抗风扰指向误差补偿

由于风扰动具有较强的脉动性, 并且实际测量或计算也需要一定的时间, 就导致风扰也具有一定的时滞性. 意味着当风作用到天线反射面上时, 控制系统无法根据收到的干扰信号来进行实时的调节. 这就需要合理地预测来风信息, 提前进行调整量计算, 每时每刻都可以计算出一个调整量, 但控制系统作用于天线进行调整还是需要时间, 因此还需针对某个时间段内计算一个最佳的调整量(阈值), 天线进行提前的调整来减小风扰动的影响. 风速预测模型的建立为天线指向误差的实时补偿提供了可能, 预测控制区别于传统的基于误差反馈的补偿策略, 而是通过提前产生补偿作用进而减小未来扰动的状态反馈补偿策略; 同时, 依靠补偿作用所产生的天线转角来减小随机风扰所致指向误差是一个复杂的过程, 为了获得期望的指向性能, 就要实现各个环节的补偿要素间的匹配, 具体表现在: 预测参数与控制器参数匹配(实现变时长预测风速下的自适应控制参数最优选择), 预估值与性能匹配(避免预估值引入的累积预估误差), 时间裕量与系统时滞性匹配(避免复杂控制算法长时间迭代导致的补偿滞后). 文献[131]验证了在实时的方式下, 准确估计风场的径向和切向速度分量是可能的, 并验证了稳态风速预测模型的有效性.

4 机电耦合未来挑战

本文以近年来的几宗重大射电天文发现事件为切

入点, 展现了射电望远镜在这些重大发现中所起到的关键作用, 从其中的几大VLBI网络可以发现射电望远镜的一个全球化发展趋势, 单台射电望远镜性能的保障与提升是观测的根本, 各国之间的射电望远镜进行组网观测也是能极大地发挥天线性能的一种方法. 本文接着描述了世界上近些年建设的射电望远镜以及正在建设和将要建设的望远镜或望远镜阵列的发展概况, 可以看到中国近些年来建设了比较多的单口径射电望远镜, 也积极参与到了一些国际化射电望远镜阵列的建设中, 比如平方公里阵. 而在欧美等国家近些年来的关注点在于望远镜阵列的建设, 同时对单口径天线进行改造、升级和组网观测. 未来, 随着射电望远镜向更大口径或更高频段的方向发展, 应重点关注如下几个技术挑战.

(1) 射电望远镜误差的不确定性分析及处理

对于射电望远镜这种结构功能一体化的电子装备来说, 机械结构是其电性能实现的载体, 器件性能是其电性能提升的保障, 材料参数是其电性能突破的制约, 环境因素是其电性能稳定的阻碍. 而随着射电望远镜朝着高频段高增益等方向的发展, 上述4个方面的因素对性能的影响也越来越明显, 并且这4个方面还存在着相互耦合的现象, 同时, 在工程中, 有着制造安装误差、器件性能温漂、材料参数变化、环境载荷浮动等不确定性因素, 如果以处理确定性误差的方式来对待不确定性因素, 一是结果有可能无法完全反映出误差造成的影响, 二是有时会出现矛盾或不合理的结果. 因此, 在后续的研究过程中, 针对误差可以运用一定的不确定性分析方法, 在厘清不确定性因素对望远镜影响机理的基础上, 提出更加符合实际情况的耦合模型和性能保障方法, 以保障射电望远镜的可靠运行.

(2) 台址风场调控策略及实施技术

现有的射电望远镜多数都是通过抗风扰控制或者建造天线罩等被动方式来减小自然风的影响, 抗风扰控制在高频风或者大风情况下很有可能效果不佳; 而天线罩的建造费用昂贵且会影响电性能, 对于大型射电望远镜来说不现实. 那么就需要从另一个角度出发, 通过主动减弱风速或者改变风向的方式来削弱风的影响, 称之为风场调控技术. 风场调控是在不改变望远镜状态的同时, 利用台址地形地貌特征, 设计风场调控装置, 达到主动降低天线近场风速、引导风流绕过天线的目的, 从而减少射电望远镜风扰, 增加望远镜高频

稳定观测时间. 风场调控的思想是“弱风能, 降风速, 改风向”以达到“稳观测, 增时长”的效果, 调控难点在于如何调控百米级高度的风. 风场调控的重点一方面是设计具有良好遮蔽效应和极大消耗风能的装置结构, 另一方面是与基于地形地貌的风预测和天线伺服系统补偿的协同.

(3) 新型材料在天线结构设计中的低成本应用

目前射电望远镜基本都是利用金属材料来建造天线的机械结构, 金属材料本身密度高的性质就导致天线自重较大, 且存在着天然的结构极限, 可以尝试使用新型材料来设计天线的结构. 碳纤维复合材料具有质量轻、模量高、热膨胀系数低、抗冲击振动能力强等一系列特点, 材料本身也具有一定的导电性, 因此, 是非常理想的反射面材料. 但如果要应用到实际中, 还需要对其表面进行一定的金属涂覆来增强抗氧化性和耐腐蚀性. 上述的新型材料在射电望远镜上的应用前景很广阔, 但囿于成本等因素, 现阶段极少用于天线中.

(4) 瞬态风与温度载荷同时作用下的性能稳健保障技术

大口径射电望远镜由于其特殊的室外工作环境不可避免地受到外部载荷如重力、温度、风荷等的作用. 前文已分别对这三种载荷单独作用时对反射面表

面精度和天线电性能的影响进行了分析, 但天线的实际服役环境不可能只有单一载荷作用, 如反射面的温度均匀性会因为风场作用而影响其结构变形. 所以未来还应研究非稳态风和温度场共同作用时对大型天线电性能的影响机理.

(5) 月基射电天文望远镜

地球上的射电望远镜口径因为重力的影响已经达到极限, 月球上的重力只有地球的1/6, 自然可以考虑在月球上建立超大口径(120 m及以上)的射电望远镜, 比如在本文前面中提到的“月球环形山射电望远镜”, 但该望远镜是网状天线, 建成之后也只能做到低频观测, 如要接收到高频信号, 则必须使用实体面板来建造天线. 在2021年, 中国政府和俄罗斯政府联合提出了“中国国家航天局和俄罗斯国家航天集团公司关于合作建设国际月球科研站的联合声明”, 在未来相当长的一段时间里, 中国、俄罗斯会与其他国家一起, 共同建设国际月球科研站^[132], 这其中的月球天文观测站就是重点之一, 因此, 可以预见将来月基射电天文望远镜必是一大研究热点, 其中月球地形地貌分析、望远镜选型、能源供给、环境保护技术、热控装置与技术(月昼散热、月夜保温)、拼装测量与调试标定、望远镜运维和遥控监测等都将是突破的环节.

参考文献

- 1 Cowen R. Telescope captures view of gravitational waves. *Nature*, 2014, 507: 281–283
- 2 Li X Z. Primordial gravitational waves (in Chinese). *Science*, 2014, 66: 16–20 [李新洲. 原初引力波. *科学*, 2014, 66: 16–20]
- 3 Levan A J, Jonker P G. Electromagnetic counterparts of gravitational wave sources at the Very Large Telescope. *Nat Rev Phys*, 2020, 2: 455–457
- 4 Akiyama K, Alberdi A, Alef W, et al. First M87 event horizon telescope results. II. Array and instrumentation. *Astrophys J*, 2019, 875: L2, arXiv: 1906.11239
- 5 Marcote B, Nimmo K, Hessels J W T, et al. A repeating fast radio burst source localized to a nearby spiral galaxy. *Nature*, 2020, 577: 190–194, arXiv: 2001.02222
- 6 Rahmat-Samii Y, Haupt R. Reflector antenna developments: A perspective on the past, present and future. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2015, 57: 85–95
- 7 Wang C S, Xiao L, Xiang B B, et al. Development of active surface technology of large radio telescope antennas (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 059503 [王从思, 肖岚, 项斌斌, 等. 大型射电望远镜天线主动面补偿研究进展. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47: 059503]
- 8 Duan B Y. Electromechanical Coupling Theory, Method and Application of Electronic Equipment (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011 [段宝岩. 电子装备机电耦合理论, 方法及应用. 北京: 科学出版社, 2011]
- 9 Du B, Wu Y, Zhang Y F, et al. Overview of large reflector antenna technology (in Chinese). *Radio Commun Tech*, 2016, 42: 1–8 [杜彪, 伍洋, 张一凡, 等. 大口径反射面天线技术综述. *无线电通信技术*, 2016, 42: 1–8]

- 10 von Hoerner S, Woon-Yin Wong S. Gravitational deformation and astigmatism of tiltable radio telescopes. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1975, 23: 689–695
- 11 Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 783–794 [王娜. 新疆奇台110米射电望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 783–794]
- 12 Li J X, Zuo S F, Wu F Q, et al. The Tianlai Cylinder Pathfinder array: System functions and basic performance analysis. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 129862, arXiv: [2006.05605](#)
- 13 Wu W R, Li H T, Li Z, et al. Status and prospect of China's deep space TT&C network (in Chinese). *Sci Sin Inform*, 2020, 50: 93–114 [吴伟仁, 李海涛, 李赞, 等. 中国深空测控网现状与展望. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 93–114]
- 14 Yu G B, Liu J Z, Zhang L H. The “Chang'E” 4 relay star “Queqiao” to build the Earth-Moon communication link (in Chinese). *Aerospace China*, 2019, 1: 19–23 [于国斌, 刘继忠, 张立华. 搭建地月通信纽带的“嫦娥”四号中继星“鹊桥”. 中国航天, 2019, 1: 19–23]
- 15 Yu Y Z, Han L, Zhou S, et al. A study on the measurements and improvements of pointing accuracy of Jiamusi 66 m radio telescope (in Chinese). *Astron Res Tech*, 2016, 13: 408–415 [喻业钊, 韩雷, 周爽, 等. 佳木斯66 m射电望远镜指向精度测量及改进. 天文研究与技术, 2016, 13: 408–415]
- 16 Dong G L, Li H T, Hao W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C system (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2018, 005: 99–114 [董光亮, 李海涛, 郝万宏, 等. 中国深空测控系统建设与技术发展. 深空探测学报, 2018, 005: 99–114]
- 17 Shen Z Q. Research and development of Tianma telescope and scientific observation progress (in Chinese). In: *Proceedings of the 2017 Annual Academic Conference of the Chinese Astronomical Society*. Nanjing: Editorial Department of the Chinese Astronomical Society, 2017 [沈志强. 天马望远镜研发及科学观测进展. 见: 中国天文学会2017年学术年会论文集. 南京: 中国天文学会编辑部, 2017]
- 18 Liu Q H, He Q B, Zheng X, et al. Analysis of VLBI observation for Tianma radio telescope in Chang'E-3 orbit determination (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 039501 [刘庆会, 贺庆宝, 郑鑫, 等. 天马望远镜在嫦娥三号测定轨VLBI观测中的应用分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 039501]
- 19 Tian Z. Precise measurement of phase center coordinates of 40 m aperture radio antenna at Haoping Station of National Time Service Center (in Chinese). In: *2015 Annual Academic Meeting of the Chinese Astronomical Society*. Nanjing: Editorial Department of the Chinese Astronomical Society, 2015 [田镇. 国家授时中心昊平站40米口径射电天线相位中心坐标的精密测定. 见: 中国天文学会2015年学术年会. 南京: 中国天文学会编辑部, 2015]
- 20 Luo J T, Gao Y P, Yang T G, et al. Pulsar timing observations with Haoping Radio Telescope. *Res Astron Astrophys*, 2020, 20: 111, arXiv: [2003.08586](#)
- 21 Luo J T. 40 meter aperture radio telescope of the National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese). In: *2015 Annual Academic Meeting of the Chinese Astronomical Society*. Nanjing: Editorial Department of the Chinese Astronomical Society, 2017 [罗近涛. 中科院国家授时中心40米口径射电望远镜. 见: 中国天文学会2017年学术年会. 南京: 中国天文学会编辑部, 2017]
- 22 Nan R D. FAST—500 Meter Aperture Spherical Radio Telescope (in Chinese). *Chin Natl Astron*, 2009, 11: 16–23 [南仁东. FAST——500米口径球面射电望远镜. 中国国家天文, 2009, 11: 16–23]
- 23 Yan J, Zhang H Y. Introduction to main application goals of Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2020, 2: 128–135 [严俊, 张海燕. 500米口径球面射电望远镜(FAST)主要应用目标概述. 深空探测学报, 2020, 2: 128–135]
- 24 Nan R, Li D I, Jin C, et al. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project. *Int J Mod Phys D*, 2011, 20: 989–1024, arXiv: [1105.3794](#)
- 25 Raffin P, Algaba-Marcosa J C, Asada K, et al. The Greenland Telescope (GLT): Antenna status and future plans. In: *Ground-based and Airborne Telescopes V. Intl Soc Opt Photon*, 2014, 9145: 91450G
- 26 Inoue M, Algaba-Marcos J C, Asada K, et al. Greenland telescope project: Direct confirmation of black hole with sub-millimeter VLBI. *Radio Sci*, 2014, 49: 564–571, arXiv: [1407.2450](#)
- 27 Chen M T, Raffin P, Ho P T P, et al. The Greenland telescope: Thule operations. In: *Ground-based and Airborne Telescopes VII. Intl Soc Opt Photon*, 2018, 10700: 107000H
- 28 Bandura K, Bender A N, Cliche J F, et al. ICE: A scalable, low-cost FPGA-based telescope signal processing and networking system. *J Astron Instrum*, 2016, 05: 1641005, arXiv: [1608.06262](#)
- 29 Newburgh L B, Addison G E, Amiri M, et al. Calibrating CHIME: A new radio interferometer to probe dark energy. In: *Ground-based and Airborne Telescopes V. Intl Soc Opt Photon*, 2014, 9145: 91454V

- 30 Amiri M, Bandura K, Berger P, et al. The CHIME fast radio burst project: System overview. *Astrophys J*, 2018, 863: 48, arXiv: [1803.11235](#)
- 31 Johnston S, Taylor R, Bailes M, et al. Science with ASKAP. *Exp Astron*, 2008, 22: 151–273, arXiv: [0810.5187](#)
- 32 Dickey J M, McClure-Griffiths N, Gibson S J, et al. GASKAP—The galactic ASKAP survey. *Publ Astron Soc Aust*, 2013, 30: e003, arXiv: [1207.0891](#)
- 33 McConnell D, Allison J R, Bannister K, et al. The Australian Square Kilometre Array Pathfinder: Performance of the boolardy engineering test array. *Publ Astron Soc Aust*, 2016, 33: e042, arXiv: [1608.00750](#)
- 34 Lee-Waddell K. Early science results from ASKAP. In: 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). New York: IEEE, 2017. 1–4
- 35 Tingay S J, Goetze R, Bowman J D, et al. The Murchison widefield array: The square kilometre array precursor at low radio frequencies. *Publ Astron Soc Aust*, 2013, 30: e007, arXiv: [1206.6945](#)
- 36 Wayth R B, Tingay S J, Trott C M, et al. The phase II murchison widefield array: Design overview. *Publ Astron Soc Aust*, 2018, 35: e033, arXiv: [1809.06466](#)
- 37 Bowman J D, Cairns I, Kaplan D L, et al. Science with the Murchison widefield array. *Publ Astron Soc Aust*, 2013, 30: e031, arXiv: [1212.5151](#)
- 38 Booth R S, Jonas J L. An overview of the MeerKAT project. *African Skies*, 2012, 16: 101
- 39 Jonas J L. MeerKAT—The South African array with composite dishes and wide-band single pixel feeds. *Proc IEEE*, 2009, 97: 1522–1530
- 40 Wiid P G, Reader H C, Geschke R H. Karoo array telescope: Lightning protection issues and RFI. In: 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. New York: IEEE, 2011. 1–4
- 41 Heywood I, Camilo F, Cotton W D, et al. Inflation of 430-parsec bipolar radio bubbles in the Galactic Centre by an energetic event. *Nature*, 2019, 573: 235–237, arXiv: [1909.05534](#)
- 42 Neben A R, Bradley R F, Hewitt J N, et al. The hydrogen epoch of reionization array dish. I. Beam pattern measurements and science implications. *Astrophys J*, 2016, 826: 199, arXiv: [1602.03887](#)
- 43 DeBoer D R, Parsons A R, Aguirre J E, et al. Hydrogen epoch of reionization array (HERA). *PASP*, 2017, 129: 045001, arXiv: [1606.07473](#)
- 44 de Vos M, Gunst A W, Nijboer R. The LOFAR telescope: System architecture and signal processing. *Proc IEEE*, 2009, 97: 1431–1437
- 45 van Haarlem M P, Wise M W, Gunst A W, et al. LOFAR: The low-frequency array. *Astron Astrophys*, 2013, 556: A2, arXiv: [1305.3550](#)
- 46 Stappers B W, Hessels J W T, Alexov A, et al. Observing pulsars and fast transients with LOFAR. *Astron Astrophys*, 2011, 530: A80, arXiv: [1104.1577](#)
- 47 Xiao L. Research on the Active Adjustment Method of QTT Performance of Super Large Antenna Based on Electromechanical Coupling (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2017 [肖岚. 基于机电耦合的超大型天线QTT性能主动调整方法研究. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2017]
- 48 Lee K J, Yuan J P, Wang J B, et al. The potential breakthroughs of GW detection using future Chinese radio telescopes (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 059507 [李柯伽, 袁建平, 王晶波, 等. 中国大型射电望远镜在引力波探测方面的潜在突破. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059507]
- 49 Zhang H R, Huang Q, Shi Q X. Exploring the mystery of the shy—Important instruments for astronomy and science in Yunnan (in Chinese). *Yunnan Sci Technol Manag*, 2020, 6: 2 [张恒荣, 黄晴, 施启兴. 穹苍之上探奥秘——云南天文科技重器侧记. 云南科技管理, 2020, 6: 2]
- 50 Kawabe R, Kohno K, Tamura Y, et al. New 50-m-class single-dish telescope: Large Submillimeter Telescope (LST). In: Ground-based and Airborne Telescopes VI. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9906: 990626
- 51 Bolcar M R, Balasubramanian K, Clampin M, et al. Technology development for the advanced technology large aperture space telescope (ATLAST) as a candidate large UV-optical-infrared (LUVOIR) surveyor. In: Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VII. Intl Soc Opt Photon, 2015, 9602: 960209
- 52 Klaassen P D, Mroczkowski T K, Ciccone C, et al. The Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope (AtLAST). In: Ground-based and Airborne Telescopes VIII. Intl Soc Opt Photon, 2020, 11445: 114452F
- 53 Kohno K, Kawabe R, Tamura Y, et al. Large format imaging spectrograph for the Large Submillimeter Telescope (LST). In: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X. Intl Soc Opt Photon, 2020, 11453: 114530N
- 54 Sebring T A, Giovanelli R, Radford S, et al. Cornell Caltech Atacama Telescope (CCAT): A 25-m aperture telescope above 5000-m altitude. In: Ground-based and Airborne Telescopes. Intl Soc Opt Photon, 2006, 6267: 62672C
- 55 Woody D P, Padin S, Sebring T. CFRP truss for the CCAT 25 m diameter submillimeter-wave telescope. In: Ground-based and Airborne

- Telescopes III. Intl Soc Opt Photon, 2010, 7733: 77332B
- 56 Woody D, Padin S, Chauvin E, et al. The CCAT 25 m diameter submillimeter-wave telescope. In: Ground-based and Airborne Telescopes IV. Intl Soc Opt Photon, 2012, 8444: 84442M
- 57 Jaroenjittichai P, Bandudej K, Kempet P, et al. Radio astronomy network and geodesy for development project: The 40-m Thai national radio telescope. In: 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). New York: IEEE, 2017. 1–2
- 58 Bandyopadhyay S, Lazio J, Stoica A, et al. Conceptual ideas for radio telescope on the far side of the Moon. In: 2018 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2018. 1–10
- 59 Bandyopadhyay S, McGarey P, Goel A, et al. Conceptual Design of the Lunar Crater Radio Telescope (LCRT) on the Far Side of the Moon. In: 2021 IEEE Aerospace Conference (50100). New York: IEEE, 2021. 1–25
- 60 Wuensche C A, BINGO Collaboration. The BINGO telescope: A new instrument exploring the new 21 cm cosmology window. J Phys: Conf Ser, 2019, 1269: 012002
- 61 Abdalla E, Ferreira E G M, Landim R G, et al. The BINGO project I: Baryon acoustic oscillations from integrated neutral gas observations. *Astron Astrophys*, 2022, 664: A14, arXiv: [2107.01633](#)
- 62 Saliwanchik B, Bandura K, Chiang H C, et al. Mechanical and optical design of the HIRAX radio telescope. In: Ground-based and Airborne Telescopes VIII. Intl Soc Opt Photon, 2020, 11445: 114455O
- 63 Newburgh L B, Bandura K, Bucher M A, et al. HIRAX: A probe of dark energy and radio transients. In: Ground-based and Airborne Telescopes VI. Intl Soc Opt Photon, 2016, 9906: 99065X
- 64 Kuhn E R, Saliwanchik B R B, Harris M, et al. Noise temperature testing for the Hydrogen Intensity and Real-time Analysis eXperiment (HIRAX). In: Ground-based and Airborne Telescopes VIII. Intl Soc Opt Photon, 2020, 11445: 114452Z
- 65 Zhang J-F, Wang B, Zhang X. Forecast for weighing neutrinos in cosmology with SKA. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 280411, arXiv: [1907.00179](#)
- 66 Hall P, Schillizzi R, Dewdney P, et al. The square kilometer array (SKA) radio telescope: Progress and technical directions. Intl Union Radio Sci URSI, 2008, 236: 4–19
- 67 Rahmat-Samii Y, Densmore A. A history of reflector antenna development: Past, present and future. In: 2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). New York: IEEE, 2009. 17–23
- 68 Wang C S, Xiao L, Wang W, et al. An adjustment method for active reflector of large high-frequency antennas considering gain and boresight. *Res Astron Astrophys*, 2017, 17: 043
- 69 Duan B Y, Wang C S. Reflector antenna distortion analysis using MEFCM. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2009, 57: 3409–3413
- 70 Song L W, Duan B Y, Zheng F. Effects of reflector errors and phase center errors of feed on the far-field pattern of reflector antennas (in Chinese). *Syst Eng Elec*, 2009, 6: 6 [宋立伟, 段宝岩, 郑飞. 反射面表面与馈源误差对天线方向图的影响. *系统工程与电子技术*, 2009, 6: 6]
- 71 Rahmat-Samii Y. An efficient computational method for characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1983, 31: 92–98
- 72 Song L W, Duan B Y, Zheng F, et al. The effect of surface error on reflector antenna performance (in Chinese). *Acta Electron Sin*, 2009, 37: 552–556 [宋立伟, 段宝岩, 郑飞, 等. 表面误差对反射面天线电性能的影响. *电子学报*, 2009, 37: 552–556]
- 73 Wang C S, Wang W, Song L W. *Microwave Antenna Multi Field Coupling Theory and Technology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015 [王从思, 王伟, 宋立伟. *微波天线多场耦合理论与技术*. 北京: 科学出版社, 2015]
- 74 Huang Q Q, Qin X Z, Huang H Y. Analysis of stress and strain on radar antenna based on wind loads (in Chinese). *Modern Radar*, 2007, 29: 4 [黄琼琼, 秦显柱, 黄红艳. 雷达天线风荷的应力应变分析. *现代雷达*, 2007, 29: 4]
- 75 Liu Y, Qian H L, Fan F. Reflector wind load characteristics of the large all-movable antenna and its effect on reflector surface precision. *Adv Steel Construct: Intl J*, 2017, 13: 1–29
- 76 Liang W, Huang J, Zhang J. A new adaptive system for suppression of transient wind disturbance in large antennas. *Intl J Antennas Propagat*, 2019, 2019: 13
- 77 Gawronski W. Modeling wind-gust disturbances for the analysis of antenna pointing accuracy. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2004, 46: 50–58
- 78 Gawronski W, Mellstrom J A, Blenkiewicz B. Antenna mean wind torques: A comparison of field and wind-tunnel data. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2005, 47: 55–59
- 79 Wang C S, Yuan S, Liu X, et al. Temperature distribution and influence mechanism on large reflector antennas under solar radiation. *Radio Sci*,

- 2017, 52: 1253–1260
- 80 Brenner M, Britcliffe M J, Imbriale W A. Gravity deformation measurements of 70 m reflector surfaces. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2002, 44: 187–192
- 81 Subrahmanyam R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a Cassegrain antenna. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2005, 53: 2590–2596
- 82 Sarti P, Vittuari L, Abbondanza C. Laser scanner and terrestrial surveying applied to gravitational deformation monitoring of large VLBI telescopes' primary reflector. *J Surv Eng*, 2009, 135: 136–148
- 83 von Hoerner S. Design of large steerable antennas. *Astron J*, 1967, 72: 35
- 84 Greschik G. Truss beam with tendon diagonals: Mechanics and designs. *AIAA J*, 2008, 46: 557–567
- 85 Feng S, Duan B, Wang C, et al. Topology optimization of pretensioned reflector antennas with unified cable-bar model. *Acta Astronaut*, 2018, 152: 872–879
- 86 Ingalls R P, Antebi J, Ball J A, et al. Upgrading the Haystack radio telescope for operation at 115 GHz. *Proc IEEE*, 1994, 82: 742–755
- 87 Kärcher H J, Baars J W M. Design of the large millimeter telescope/gran telescopio millimetrico (LMT/GTM). In: *Radio Telescopes. Intl Soc Opt Photon*, 2000, 4015: 155–168
- 88 Kärcher H J. Telescope structures worldwide. *Steel Construct*, 2009, 2: 149–160
- 89 Mar J, Liebowitz H. The 100-m Radio Telescope of the Max Planck Institute for Radio Astronomy in Bonn. In: *Structures Technology for Large Radio and Radar Telescope Systems*. Cambridge: MIT Press, 2003
- 90 Feng S, Wang C, Duan B, et al. Design of tipping structure for 110 m high-precision radio telescope. *Acta Astronaut*, 2017, 141: 50–56
- 91 Feng S F. Research on Structural Shape Preservation and Innovative Design of Large Fully Movable Reflector Antenna (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019 [冯树飞. 大型全可动反射面天线结构保型及创新设计研究. 博士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2019]
- 92 Ho P T P, Altamirano P, Chang C H, et al. The Yuan-Tseh Lee array for microwave background anisotropy. *Astrophys J*, 2009, 694: 1610–1618, arXiv: 0810.1871
- 93 Feng S F, Duan X C, Duan B Y. A novel design of large full-steerable reflector antenna (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 059509 [冯树飞, 段学超, 段宝岩. 一种大型全可动反射面天线的轻量化创新设计. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059509]
- 94 Feng S, Ban Y, Duan B, et al. Electronic performance-oriented mold sharing method and application in QTT 110 m large radio telescope. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2020, 68: 6407–6412
- 95 Ruze J. Antenna tolerance theory—A review. *Proc IEEE*, 1966, 54: 633–640
- 96 Li N, Wu J, Duan B Y, et al. Effect of the rail unevenness on the pointing accuracy of large radio telescope. *Acta Astronaut*, 2017, 132: 13–18
- 97 Ban Y, Wang C, Feng S, et al. Iteration path-length error correction approach to subreflector shaping for distortion compensation of large reflector antenna. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2019, 67: 2729–2734
- 98 Greve A, Hooghoudt B G. Quality evaluation of radio reflector surfaces. *Astron Astrophys*, 1981, 93: 76–78
- 99 Lian P Y, Zhu M B, Wang W, et al. Estimation method of temperature field of large axial symmetric reflector antenna in real-time (in Chinese). *J Mech Eng*, 2015, 51: 165–172 [连培园, 朱敏波, 王伟, 等. 一种轴对称反射面天线温度场实时预估方法. 机械工程学报, 2015, 51: 165–172]
- 100 Greve A, Bremer M, Penalver J, et al. Improvement of the IRAM 30-m telescope from temperature measurements and finite-element calculations. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2005, 53: 851–860
- 101 Greve A, Morris D. Repetitive radio reflector surface deformations. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2005, 53: 2123–2126
- 102 Wang C S, Yan Y F, Xu Q, et al. Edge sensor based real-time calculation method for active panel position of QTT. *Res Astron Astrophys*, 2020, 20: 182
- 103 Wang C S, Duan B Y, Qiu Y Y. Accurate algorithm for analysis of surface errors in reflector antennas and calculation of gain loss. In: *2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*. New York: IEEE, 2005, 2: 1365–1368
- 104 Orfei A, Maccaferri G, Mariotti S, et al. The Upgrade Proposal for the VLBI Medicina Antenna. *VLBI Technology: Progress and Future Observational Possibilities*, 1994: 165–170
- 105 Orfei A, Morsiani M, Zacchiroli G, et al. An active surface for large reflector antennas. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2004, 46: 11–19

- 106 Xiang B, Wang N, Chen M, et al. Subreflector adjustment system for NSRT. In: *Ground-based and Airborne Telescopes VII*. Intl Soc Opt Photon, 2018, 10700: 107002E
- 107 Kazezkhan G, Xiang B, Wang N, et al. Dynamic modeling of the Stewart platform for the NanShan Radio Telescope. *Adv Mech Eng*, 2020, 12: 168781402094007
- 108 Von Hoerner S, Woon-Yin Wong S. Improved efficiency with a mechanically deformable subreflector. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1979, 27: 720–723
- 109 Antebi J, Zarghamee M S, Kan F W, et al. A deformable subreflector for the Haystack radio telescope. *IEEE Antennas Propag Mag*, 1994, 36: 19–28
- 110 Bach U. Out of focus holography at Effelsberg. In: *Proceedings of the 12th European VLBI Network Symposium and Users Meeting (EVN 2014)*. Cagliari, 2014
- 111 Xu S, Rahmat-Samii Y, Imbriale W A. Subreflectarrays for reflector surface distortion compensation. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2009, 57: 364–372
- 112 Lian P, Wang W, Hu N. Feed adjustment method of reflector antenna based on far field. *IET Microwaves Antennas Propagat*, 2014, 8: 701–707
- 113 W. A. van Cappellen, L. Bakker. APERTIF: Phased array feeds for the westerbork synthesis radio telescope. In: *2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 2010. 640–647
- 114 Ivashina M V, Iupikov O, Maaskant R, et al. An optimal beamforming strategy for wide-field surveys with phased-array-fed reflector antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2011, 59: 1864–1875
- 115 Li H X, Nan R D. Progress and outlook of FAST (in Chinese). *Chin J Nature*, 2015, 37: 424–434 [李会贤, 南仁东. FAST工程进展及展望. 自然杂志, 2015, 37: 424–434]
- 116 Xu S, Rahmat-Samii Y, Gies D. Shaped-reflector antenna designs using particle swarm optimization: An example of a direct-broadcast satellite antenna. *Microw Opt Technol Lett*, 2006, 48: 1341–1347
- 117 Karimkashi S, Mallahzadeh A R, Rashed-Mohassel J. A new shaped reflector antenna for wide beam radiation patterns. In: *2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*. New York: IEEE, 2007. 535–538
- 118 Gupta R C, Sagi S K, Raja K P, et al. Shaped prime-focus reflector antenna for satellite communication. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2017, 16: 1945–1948
- 119 Wang C, Li H, Ying K, et al. Active surface compensation for large radio telescope antennas. *Int J Antennas Propagat*, 2018, 2018: 1–17
- 120 Wang W, Wang C, Duan B, et al. Compensation for gravity deformation via subreflector motion of 65 m shaped Cassegrain antenna. *IET Microwaves Antennas Propagat*, 2014, 8: 158–164
- 121 Lian P, Wang C, Xu Q, et al. Real-time temperature estimation method for electromagnetic performance improvement of a large axisymmetric radio telescope under solar radiation. *IET Microwaves Antennas Propagat*, 2020, 14: 1635–1642
- 122 Wang C S, Wang N, Lian P Y, et al. Thermal Deformation Compensation Technology of Large Reflector Antenna in High Frequency Band (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [王从思, 王娜, 连培园, 等. 高频段大型反射面天线热变形补偿技术. 北京: 科学出版社, 2018]
- 123 Garcia Sanz Mario. *Robust Control Engineering: Practical QFT Solutions*. Florida: CRC Press, 2017
- 124 Gawronski W K. *Modeling and Control of Antennas and Telescopes*. Berlin: Springer, 2008
- 125 Zhang J, Huang J, Qiu L, et al. Analysis of Reflector Vibration-Induced Pointing Errors for Large Antennas Subject to Wind Disturbance: Evaluating the pointing error caused by reflector deformation. *IEEE Antennas Propagat Mag*, 2015, 57: 46–61
- 126 Ranka T, Garcia-Sanz M, Symmes A, et al. Dynamic analysis of the Green Bank Telescope structure and servo system. *J Astron Telesc Instrum Syst*, 2016, 2: 014001
- 127 Gawronski W, Souccar K. Control systems of the large millimeter telescope. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2005, 47: 41–49
- 128 Kim J, Park S, Jin T S. Simplified fuzzy-PID controller of data link antenna system for moving vehicles. In: *Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 1083–1088
- 129 Gawronski W. Design and Performance of the H ∞ Controller for the Beam-Waveguide Antennas. Jet Propulsion Laboratory, Tech Rep, 2011
- 130 Wang C S, Wang X Q, Xu Q, et al. Preliminary study of regulation technology of wind field distribution on QTT site based on test of equivalent wind field (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 099515 [王从思, 王雪晴, 许谦, 等. 基于等效风场试验的QTT台址风场分布调控技术方案初探. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 099515]
- 131 Towers P, Jones B L. Real-time wind field reconstruction from LiDAR measurements using a dynamic wind model and state estimation. *Wind*

[Energ](#), 2016, 19: 133–150

- 132 Dong J, Lu Z. ILRS Partner Guide (Overview) (in Chinese). *Space Intl*, 2021, 8: 17–20 [董俊, 陆征. 国际月球科研站合作伙伴指南(概览). 国际太空, 2021, 8: 17–20]

Development of large-aperture radio telescopes and applications of coupled structural-electromagnetic theory

YAN YueFei¹, WANG CongSi^{1*}, LI Shuai¹, WANG WenJuan¹, DUAN BaoYan¹,
WANG Na², XU Qian², LI Lin³, KONG DeQing⁴ & WANG HaiRen⁵

¹ Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China;

² Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

³ School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

⁴ National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁵ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China

The smooth operation of radio telescopes is essential in radio astronomy. This paper establishes the importance of radio telescopes via examples of the discovery of gravitational waves, the merger of neutron stars, and the first black hole photograph. As radio astronomy advances, radio telescopes require larger apertures and higher pointing accuracy, resulting in a closer structural-electromagnetic coupling. To solve the coupled structural-electromagnetic problem of radio telescopes, the development of a coupled structural-electromagnetic theory is key to the smooth and efficient operation of large-aperture radio telescopes. To this end, this paper describes the development of radio telescopes built and put into operation in the last decade, as well as those under construction and to be built, and emphasizes the importance of coupled structural-electromagnetic theory in the design, manufacture, and operation of radio telescopes. Then, the paper systematically summarizes the application of coupled structural-electromagnetic theory in radio telescopes. Finally, future research hotspots of electromechanical coupling are proposed based on the development of radio astronomy and the performance requirements of large-aperture radio telescope antennas.

radio telescope, large aperture, high pointing accuracy, coupled structural-electromagnetic, performance assurance

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Ba, 89.20.Bb

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0121](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0121)