大型射电望远镜天线主动面补偿研究进展

王从思^{1,2*}, 肖岚^{1,3}, 项斌斌^{1,4}, 王伟¹, 许谦⁴, 蒋力⁵, 王娜⁴, 段宝岩¹

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. 加利福尼亚大学机械工程系, 伯克利 94720, 美国;

3. 华为技术有限公司, 深圳 518129;

4. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;

5. 中国电子科技集团公司第三十九研究所, 西安 710065

*联系人, E-mail: congxiwang@163.com

收稿日期: 2017-01-13; 接受日期: 2017-02-21; 网络出版日期: 2017-03-17

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)、国家自然科学基金(编号: 51522507, 51475349, 51490660)、陕西省青年科技新星计划(编号: 2016KJXX-06)、高等学校学科创新引智计划(编号: B14042)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: SPSZ011401, 7214479606)资助项目

摘要 随着射电望远镜全可动天线的口径扩大与频段提升, 天线在观测时的高电性能难以保障, 必须采用机械补偿与电子补偿等手段. 为确保天线的指向精度与作用距离, 有必要对天线赋形反射面的空间位置与几何形状进行调整, 即主动面调整, 这是补偿天线电性能最有效的手段. 为此, 本文阐述了国内外有关主动面补偿的应用情况, 总结了大型天线主动面补偿的基本原理及适用范围, 详细分析了面形调整量计算、主面分块设计、促动器设计、主动面控制系统及面形检测五项关键技术, 并对世界上已采用主动主反射面调整的四部大天线进行了对比讨论, 最后给出了主动面补偿技术在未来大型射电望远镜天线上的研究方向.

关键词 射电望远镜, 天线反射面, 主动调整, 机电耦合, 性能补偿

PACS: 07.57.-c, 84.40.Ba, 89.20.Bb, 87.80.Ek

1 引言

射电望远镜是主要接收天体射电波辐射的精密仪器, 也可以向外辐射电磁波, 不同于传统光学望远镜, 它没有长长的可伸缩镜筒, 也没有物镜或目镜, 而是由天线和接收系统两大部分组成, 巨大的天线是其显著特征^[1]. 射电望远镜天线的每一次重要进步都毫无例外地成为天文学发展的里程碑. 作为最常用的射电

望远镜天线——反射面天线^[2,3], 可以很容易实现大口径、窄波束, 有着高分辨率和高灵敏度, 广泛应用于射电天文、雷达、通讯和太空探测等领域^[4,5]. 射电望远镜的历史刚过80年, 却经历了从小口径到大口径、从米波段到毫米、亚毫米波段、从单天线到阵列天线的发展过程, 逐步进入昌盛时期. 过去, 地面大型射电望远镜天线通常指十米或十米以上的口径, 随着现代科技的迅猛发展, 天线设计制造和馈电技术大大升级,

引用格式: 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
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, doi: [10.1360/SSPMA2017-00011](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00011)

地面射电望远镜天线的大中小型应重新定义,口径在十米以下可归为小型,10–30 m为中型,30–100 m为大型,大于100 m为超大型. 目前国内外已建成二十多部大中型射电望远镜,其形式繁多^[6,7],包括固定式单口径球面射电望远镜、非全可动标准抛物面射电望远镜、全可动赋形射电望远镜和射电望远镜阵列等. 在复杂环境中观测的大型射电望远镜天线(以下简称为“大型天线”)受到自重、温度和风荷等因素影响,产生结构变形,另外存在制造、安装等不确定性误差,一起导致天线表面精度变差并偏离需求面形,从而使得天线增益降低、指向偏转、副瓣抬高等^[8–14]. 因此需要对天线结构、面形进行调整,从而补偿电性能的损失.

为此,本文讨论了射电望远镜电性能补偿方法的发展历程,概述了应用主动面调整的大型天线,总结了主动面调整的关键技术,并对其一一解析,然后总结对比了国际上应用主动主反射面调整的典型大型天线,最后探讨了基于主动面调整的反射面天线补偿方法的未来研究方向,为超大型射电望远镜的性能保障与改善提供技术参考.

2 射电望远镜天线性能补偿发展历程

由经典Ruze公式^[15]可知,天线口面效率与天线表面精度直接相关. 为此,天线技术人员早期认为,保障面形精度是最为关键的问题之一. 然而相同的反射面效率,对于大口径高频段天线而言,表面精度要求非常苛刻,可接受的加工表面均方根误差越来越难以实现.

后来为降低面板加工难度,设计师采用刚性较好的材料来制造天线,或采用精密的天线结构设计,如保型设计^[16,17],以减小不同仰角下主面变形来保证电性能. 针对工作过程中的大型天线,常用补偿电性能的方法有机械补偿、电子补偿和其他补偿方法^[18],其中机械补偿包括主反射面补偿、副反射面补偿和可变形平板补偿,主要是通过改变主、副反射面的空间位置或/和几何形状,或在电磁波传播路径上安装一个可变形的平板来消除由主、副面变形所引起的电场相位差;电子补偿主要指馈源阵列补偿,即在焦平面放置阵列馈源来捕获入射能量,然后计算出阵列元素的激励系数,以达到补偿的效果. 通过对比分析认为,主反射面补偿能够提供最好的总体性能,副反射面补偿在结构变形不是很大的情况下能很好地实现

效果,可变形平板能使天线性能得到一定提升,不能改变主、副反射面形状时,馈源阵列也可以部分补偿结构变形,总体来说,机械与电子综合补偿效果优于单一方法补偿效果.

为满足射电天文的发展需求,天线口径越造越大、工作频率越来越高,天线结构也越来越复杂,使得天线口径效率与指向对结构变形越来越敏感,此时移动主、副面到最佳匹配位置等传统补偿方法已无能为力,必须调整主面面形,即实现主反射面的主动调整来补偿天线电性能——通过控制天线背架上的促动器主动调整主反射面上分块面板的位置,优化反射面整体面形,来保证天线在高频段工作时,满足高指向精度和高面形精度的苛刻要求. 由图1可以看出,按时间顺序,为进一步提高天线面形精度,大型天线设计与安装调试中提出了多种面型控制方法^[19–22],例如刚性设计、同源设计、天线罩或包裹处理、最佳预调角安装等,目前工作在GHz的国内外大型天线都综合采用刚性设计、结构保型和主动面调整,使天线面形精度达毫米级. 可见,主动面是天线结构的设计趋势,更是实现高波束指向精度必不可少的一项重要技术.

3 天线主动面补偿技术体系

观测过程中受环境影响,随位姿变化,天线表面形貌实时动态变化,工作在高频段的大型天线采用主动面调整势在必行^[23,24].

图2概括了大型天线主动面调整的实现过程. 在天线观测时,通过现代面形检测技术对大型天线表面进行实时检测,把实际面变形信息传递回主控计算机,通过数学算法得出面板调整量,再通过主动面控制系统的控制网络,远程操控不同位置的促动器进行机械运动,精细调整分块面板位置,修正天线表面面形. 结合大型天线的发展历程及主动面应用情况,作者总结了实现主动面补偿的关键技术包括面形调整量计算、主动面分块设计、促动器设计、主动面控制系统和面形检测,下面就这些关键技术的基本原理、难点、适用范围等方面进行分析说明.

3.1 面形调整量计算

面形调整量计算是实现主动面修型的核心,既可通过基于结构模型模拟计算得到,也可通过测量得到反射

图 1 (网络版彩图)射电望远镜发展历程

Figure 1 (Color online) Development history of radio telescopes.

图 2 (网络版彩图)大型天线主动面调整的实现过程

Figure 2 (Color online) The process of active surface adjusting of large antennas.

面形貌,前者需要预先存入控制系统数据库中.大型天线主面一般由成百上千的分块面板组成,安装形成

的反射面实际表面与理想设计面总会存在位置误差.过去工作人员根据实测数据凭经验手动调节面板背后的螺栓高度来对面板位置进行反复调整,直到反射面均方根误差值在可接受范围内.文献[25]提出了一种以最佳吻合面为调整目标面的调整量计算方法,找出调整量和表面误差的转换关系,使表面各节点与理想面的偏差最小,通过优化算法直接得出面板最佳调整量.西安电子科技大学研究团队在微波天线机电耦合研究基础上也在面板调整量确定方面做了许多相关研究^[26-29].这些方法理论上能一次性将天线表面精度调整至最佳,但多数用于天线观测前的安装调试.

主动面的面板调整策略与上述“最佳调整量”的基本思想相似,计算方法是通用的,区别在于如何能快速实现电性能补偿.文献[30-34]以面精度、增益或波束指向等为设计目标进行支撑桁架结构参数、馈电照射参数优化分析.此时要求调整量的计算必须精确地选择好参考面(理想设计面、吻合面或其他),如果调整量不准确,那么就要多次计算调整量并反复调整面板;另外减少促动器数量,主动面的分块面板间多

采用“共用促动器”^[35],此时需要考虑面板间调整量耦合问题.目前作者以天线波束指向和增益为目标,提出了面向电性能的大型反射面天线主动面板调整量机电耦合计算方法,首先通过建立和修正天线结构有限元模型,分别通过面板移动拟合调整、面板整体面型精度调整和面板吻合旋转调整,来确定对应的目标曲面,以快速计算出促动器的最佳调整量,实现大型面天线在变形情况下性能补偿调整,或者在赋形面和抛物面两种工作模式下的面型精准转换,保证单一类型面板的天线具有多种功能.应用该方法时,应通过实测,逐渐对包含座架、中心体、背架、反射体的天线结构有限元模型进行精细修正,另外,要测量主动面各面板安装位置误差和促动器初始行程,并在调整量计算方法中消除这些确定性偏差.

3.2 主面分块设计

主面分块设计是实现主动面调整的基础,其涉及的考虑因素有面板尺寸、面板精度、面板形状、分块形式与辐射梁布局等设计参数.

首先,面板(辐射梁)布局一般呈现周向/径向分布,这样使得反射面成轴对称或者中心对称,便于面板制造、加工与安装,有利于促动器布局及控制总线布置,面板形式可分为“整体式”和“组合式”,其中“组合式”将在后文LMT面板分块设计中进行说明;“整体式”又可根据面板尺寸分成“大面板”和“小面板”两种形式,一般单块面板尺寸不宜过小,过小的尺寸势必增加反射面的分块数量,使天线背架结构更加复杂、促动器数目多.因此需要优化面板尺寸,尽量选用大尺寸面板.

面板形状一般可选三角形、四边形(梯形)或六边形,其中三角形面板在射电望远镜中较少见,六边形面板常用于光学望远镜和球面天线(Five-Hundred-Meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST)中.在LMT早期设计方案中,主反射面采用六边形面板为单块面板形式,因面板模具过多导致成本过高,后期改变了面板分块方案^[35,36].目前全可动射电望远镜多数采用四边形面板分块方案,例如LMT, GBT, SRT, CCAT和天马望远镜均采用了梯形分块面板,这是因为梯形面板加工所需模具较少,曲面分段拟合较优,从而降低天线造价并保证主面精度.然而面板形状也可不限于这三种,只要能达到好的天线性能,同时能有效降低

成本、减小重量、提高面精度,可以考虑搭配多种形状进行分块设计或做出创新.

作者认为,面板划分原则是需综合考虑制造能力、天线成本以及天线电性能,在满足成本限制条件下,单块面板尺寸越大越好,这样不仅减少面板个数,更重要的是减轻了结构重量与控调系统复杂度.目前,建议从两方面着重进行:(1)基于反射面原理性误差.首先从误差分配得出满足天线工作需要的原理性误差的分配值,然后是正向推导,即根据模具母线、模具尺寸、天线反射面母线等参数计算产生的原理性误差.对于多环面板使用同一种模具,当使用一种类型的模具制造面板来逼近反射面上某环抛物面,则这两者母线上任意一点法向存在偏差,这时针对弦长对应的整块面板积分得到该块面板的偏差.然后以单块面板面积与同一辐射角范围内各面板面积和的比值为权重,计算全部面板的原理性误差.(2)基于面板自重变形误差.由于无法通过安装方式或促动器调节进行单块面板区域内的形面补偿,因此单块/组合面板的面积不能过大,否则将引起过大的自重变形.组合面板自重变形受到面板面积、长宽比、面板支撑位置、面板结构形式等多种因素的综合约束.为此,建议通过子桁架拓扑形式优化、子桁架杆截面积和高度的尺寸优化、面板支撑点位置选择优化来优化组合面板支撑框架,从而减轻重量,同时保证支撑变形最小.其中,子桁架结构等效刚度的计算精准度对优化结果影响明显.

3.3 促动器设计

促动器是主动面调整得以实现的关键,是大型天线面形调控中主要的机械调节装置.促动器设计指促动器机械结构设计,其规格指标中最关键的有3点,分别是重量、行程和调节精度.文献^[37,38]从促动器的设计、仿真、制造与测试等方面开展了系列研究.为达到主动面调整的实时性要求,就要确保促动器能响应快速、定位精密以及行程足量,并且保证在宽温严峻的工作条件下,促动器具有高可靠性、较强抗环境干扰能力和较长使用寿命等.随着现代精密仪器的发展,常用的有压电陶瓷促动器、电致伸缩促动器、磁致伸缩促动器、形状记忆合金促动器、电流变流体促动器等.据了解,美国GBT天线每经历一个冬天,都有几十个促动器发生故障,需要维修或更换.考虑到

工作人员的人身安全以及批量化生产、成本等工程实际问题, 在新疆奇台建设的110 m口径全可动射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)的促动器还是需要继续突破, 其设计应趋向于小型化、轻量化, 同时也应兼顾寿命、可靠性和低温环境适应性. 为此, 建议促动器采用步进电机和轻巧丝杠, 配以精密传感器的设计方案, 同时根据台址环境, 应辅以除冰雪、抗低温密封措施, 当然EMC是必须考虑的.

3.4 主动面控制系统

主动面控制系统是实现主动面调整的根本, 它属于天线控制系统的子系统, 由从属计算机、促动器、控制总线及供电单元等部分组成, 其中连接并操控促动器的控制总线形成整个控制网络. 一般, 主控计算机先将面形检测结果进行数据转换和调整量计算, 通过控制网络把调整信息传递给促动器进行精确调节. 文献[39,40]对控制系统布线、电机、通信协议、促动器等进行了研究. 控制系统的走线布置是关键之一, 路线越简单越好, 这样对天线结构造成的负担少, 控制响应速度和信号损耗也能改善.

基于造成主面变形的因素不同, 目前主动面控制系统主要分为3类: 一是针对重力变形, 基于有限元模型的开环修正控制系统, 例如意大利的撒丁岛射电望远镜(Sardinia Radio Telescope, SRT)天线^[41]将自重变形对应的天线补偿信息预先储存于数据库中, 天线观测时查表进行实时补偿; 二是针对温度变形, 基于温度测量和有限元模型的半闭环修正控制系统, 例如天马望远镜天线在2016年针对夜间温差大开展了温度变形主动补偿; 三是基于大尺度面形测量技术(如全息测量法)的准实时闭环控制系统, 例如采用偏焦全息测量的美国绿岸射电望远镜(Green Bank Telescope, GBT)

天线^[42]. 然而, 由于测量速度和精度(天线口径超大)以及控制响应速度(控制单元数量大)的限制, 主动面控制系统目前仍然未能实现实时闭环控制. 建议QTT天线在补偿数据库建立、反射面形貌快速检测和精准反演、促动器响应时间等方面继续深入研究.

3.5 面形检测

天线反射面的面形标定和实时测量是主动面调整实现过程的第一步. 一般测量精度要求达到大型天线表面误差的1/3–1/5, 因天线口径大和面形精度高, 因此, 对反射面面形检测技术的要求比较苛刻.

过去没有主动面调整的时候, 面形检测主要在初始面板制造与安装调试阶段, 传统测量方法主要有机械、光学和电等方法^[43], 如表1所示. 这些方法的主要特点是量程较小、精度较低、测量速度慢、自动化程度低、劳动强度大、对天线姿态有限制等.

20世纪80年代开始, 国内外不断研制出许多现代化精密测量仪器, 使面形检测方法发生了巨大变化. 表2所示的天线面形现代测量方法^[44]具有更大灵活性, 下面分别加以说明.

(1) 经纬仪法

应用两台以上高精度电子经纬仪, 结合其他附件和系统软件, 以空间角度前方交会的测量原理对天线无接触测量^[45], 广泛应用在天线制造业中.

(2) 全站仪法

应用一台高精度全站仪, 配以反射片等测距标志, 以极坐标的测量原理对天线实施测量, 例如GBT用全站仪结合经纬仪进行安装测量, 得到表面精度为1.1 mm.

(3) 摄影测量法

应用单台或多台高精度测量相机, 以交会的测量

表 1 天线面形传统测量方法
Table 1 Traditional measuring methods of antenna surface

方法		测量精度 (mm)	适用范围
机械	样板法	±0.1–0.2	只适于天线仰天时测量, 对中小型天线的安装检测比较有效
	车床法	±0.02–0.1	只适于测量小型天线(直径≤4 m)
光学	经纬仪钢带尺法	<±0.2	应用广泛
	双五棱镜法	±0.15–0.66	测量抛物面不同仰角时的表面精度
其他		五棱镜带尺法、钢丝测距法、小车测量法等	

表2 大型天线面形检测方法
Table 2 Modern measuring methods of antenna surface

方法	测量范围	测量精度 (mm)	备注
经纬仪	2–20 m	$\pm 0.01\text{--}0.2$	大型天线的测量过程缓慢
全站仪	<120 m	$\pm 0.2\text{--}0.5$	相对前者, 成本低、操作易、坐标系建立快、维持时间长
摄影测量	<100 m	± 0.25	利用物体影像来重建三维形状
激光跟踪测量	<50 m	± 0.05	仪器倾斜时, 需要重新校准; 密集采样时缓慢
全息法	更大	更好	基于射电天文技术

原理进行快速无接触测量^[46], 特别适合于动态测量场合. 例如美国Arecibo望远镜升级时, 工作频率由600 MHz提高到10 GHz^[47], 专门采用摄影测量法, 调整后使表面精度优于2 mm.

(4) 激光跟踪测量法

测量原理与全站仪法一样, 应用单台激光跟踪仪, 以极坐标的测量原理进行快速跟踪测量^[48], 其测量精度非常高, 在200 m范围内可达到100 μm , 且每秒可以测量5个区域, 测量速度非常快.

(5) 射电全息法

利用天线的远场方向图与口径面场分布间的傅里叶变换关系, 通过测量远场方向图来反推天线口径面上的场分布, 包括幅度和相位, 再通过几何光学法得到天线表面变形信息^[49]. 该方法无需额外仪器, 设备简单、对天线姿态无特殊要求, 具有实时、高精度、高自动化、非接触、非破坏、量程无限制等特点, 例如GBT利用射电全息法, 配合经纬仪和全站仪的调整, 将表面精度从1.1 mm提高到0.46 mm^[50].

另外, 天线形面测量中还有测量多个远场幅值的相位恢复法, 以及测量近场幅值和相位的近场全息法, 前者早年使用较多, 测量方便但精度低, 后者近年来逐渐流行, 具有很高的测量精度, 但是因其需要信号塔和参考天线, 大口径天线难以使用. 因此, 作者认为射电全息法是最适用QTT天线面形检测的测量手段. 当然在高频段观测时, 可综合采用多种测量手段来提高面形测量数据的精确度.

4 国际典型望远镜主动面补偿现状

国际上已建成和筹建中的大型射电望远镜相当多, 基本都直接采用或改造升级为主动面调整, 例如国外的GBT, LMT, HUSIR, Effelsberg, SRT和国内的天

马, FAST, QTT等^[51–58], 表3给出了上述天线的主要性能参数. 通过分析这些射电望远镜可知, 国际上已开始观测的并采用主动主反射面的大型全可动射电望远镜仅四部, 他们是美国的绿岸射电望远镜(GBT)、墨西哥的大型毫米波望远镜(LMT)、意大利的撒丁岛射电望远镜(SRT)和中国的天马望远镜, 表4所示的是这四部大型天线主动面相关指标. 下面就这四部典型天线的主动面调整的应用情况作进一步解析.

4.1 绿岸射电望远镜(GBT)

GBT主动面调整^[59]主要针对自重引起的结构变形, 且只在夜间工作, 这样可以很好地避免因太阳照射导致的望远镜结构热变形, 在开启主动面调整后天线面精度可达0.24 mm.

(1) 分块设计

GBT主面分块设计^[60]是基于208 m标准圆抛物面的分块设计, 如图3(b), 在圆抛物面上设计成周向/径向环状的划分形式, 由于GBT主面只是圆抛物面的一部分, 整体构成椭圆形, 所以每环面板周向也只是圆环的部分, 整个主动面面板呈现出由反射面一端向另一端的辐射状分布, 面板分布呈现“两头少, 中间多”的形式, 如图3(a)所示. GBT主面上不同环数的面板数如图4所示, 主面沿径向方向分为44环, 共划分为2004块面板, 并将44环中某些环设计成相同类型面板, 可用同一模具进行制造, 共分为16种, 这意味着44环面板只需16种模具, 这可以大幅度减少面板加工成本, 但由此也产生了面板与设计面间的原理性误差. GBT面板由铝制表层和铝制加强筋框架构成, 单块分块面板的径向长度约2.5 m, 宽度为2 m, 面积平均约3.9 m², 面板表面精度约68 μm , 面板间缝隙为2 mm.

总的来说, GBT这样“小面板”的分块设计方案使得百米级口径反射面天线面精度达到毫米级, 具有其

表3 应用主动面补偿的典型射电望远镜

Table 3 Typical radio telescopes with active surface

名称	口径 (m)	总质量 (t)	频率 (GHz)	表面精度 (mm)	指向精度 (")	工作年份	备注
GBT	100×110	7856	0.1–116	0.24	1.5	2000	美国
LMT	50	800	75–350	0.075	1.08	2008	美国、墨西哥
HUSIR	37	340	85–115	0.1	3.6	2010	美国; 副面可调
Effelsberg	100	3200	0.395–95	1	10	1972	德国; 副面可调
SRT	64	3000	0.3–115	0.15	5	2011	意大利
Tianma	65	2640	1.25–46 (L/S/C/X/Ku/K/Ka/Q)	0.3	3	2012	中国
FAST	500	30(馈源舱)	0.7–3	1–2	4	2016	中国
QTT	110	6000	0.15–115	0.2	2.5	预计2025	中国

表4 采用主动主反射面调整的4部射电望远镜

Table 4 Four radio telescopes with active main surface

名称	主面形式	表面精度 (mm)	分块数目	面板种类	面板形状	单块面板制造精度 (μm)	促动器数目
GBT	偏置格里高利	0.24	2004	44环	梯形	68	2209
LMT	标准卡塞格伦	0.075	180	5环	不规则四边形(组合)	<40	720
SRT	赋形格里高利	0.15	1008	14环	梯形	<65	1116
Tianma	赋形卡塞格伦	0.3	1008	14环	梯形	<130	1104

图3 GBT主面分块设计示意图^[60]. (a) GBT主面; (b) GBT的母抛物面

Figure 3 The block design of GBT main surface ^[60]. (a) The main surface of GBT; (b) the parent paraboloid for the GBT.

独特之处.

(2) 促动器设计

GBT采用每4个相邻分块面板角共用一个促动器,即“共用促动器”形式,主面共采用了2209个精密促动器. GBT专用促动器实物如图5(a)所示,相比于每个独立面板都由4个促动器来驱动,这样大大缩减了促动器的数量,不仅降低了促动器分布密度,还使得面板调

图4 (网络版彩图)GBT主反射面各环对应面板数

Figure 4 (Color online) The panels amount of each ring of GBT main surface.

整更加均匀、更加连贯,而且减轻了天线整体重量,具有很好的工程应用价值. 图5(b)是GBT促动器的结构示意图^[59],促动器安装在平板托架上,可进行3个正交方向上的机械设定,托架调节其垂直方向的高度,平板调节其水平面的位移,当调整到距离理想抛物面的3.2 mm内,垂直和水平位置都被锁定. 帽形支架上的

图5 (网络版彩图)GBT促动器^[59]. (a) 实物照片; (b) 结构示意图

Figure 5 (Color online) The GBT actuator [59]. (a) Photograph of a GBT actuator; (b) the mechanical configuration of GBT actuators.

调节螺栓则提供4个相邻面板角的相对调节, 以及铝板和钢背架结构的膨胀差调节. 表5给出了GBT专用促动器的设计规格, 选用“电机丝杆”形式, 行程达51 cm, 定位精度是25 μm .

(3) 主动面控制系统与面形检测

GBT主动面控制系统通过控制总线把天线形变量传至主控计算机, 主控计算机通过控制网络和控制总线, 把修正数据施加至对应促动器, 以此修正天线表面面形. 联接促动器的所有电缆铺设在电缆槽中, 形成背架结构中的电缆网络, 将其连接到控制室. 控制室设在俯仰轴顶部, 容纳了所有促动器的布线、控制所需的电子器件和附加电源等.

在面形检测方面, GBT采用了偏焦(Out-Of-Focus, OOF)全息测量技术^[42], 或称相位恢复全息测量技术, 以Zernike多项式表示口径面相位误差以及引入偏焦为特色, 可以准实时测量大型天线在任意俯仰角上由自重和温度引起的大尺度形变.

4.2 大型毫米波望远镜(LMT)

LMT采用主动面调整^[61]使其面精度达到75 μm , 是目前其相同工作频段内, 主面精度指标最高的大型全可动射电望远镜, 在天线设计史上具有重大意义.

(1) 分块设计

图6是LMT主面分块设计示意图, 50 m口径的抛物面上也呈周向/径向环状分布, 与GBT不同之处是它不依赖于其他面形, 分块后仍是完整的环形, 沿径向分为五环, 共5种类型, 由内向外每环分别有12, 24, 48, 48和48块, 共有180块位置可调的组合面板, 以此作为主动面调整的最小单元. 每个面板都由8块高精度子面板拼接而成, LMT主面共有子面板1440块, 单块子面板由电铸镍表层粘贴在铝制蜂窝芯上构成, 面精度达15 μm . 目前只有LMT采用了“组合面板”设计^[62], 相比于GBT的“小面板”, 大大降低了促动器数量, 有效减轻天线结构重量(但子桁架结构增加了额外重量), 其优点还有面板种类少、易加工、子面板加工精度提高和便于运输安装等. 另外CCAT 25 m天线也采用这种分块设计.

理论上只需3个促动器就可调整一个面板位置, 然而LMT组合面板体积较大, 形状近似为梯形, 实际需要更均匀的支撑, 由此“组合面板”形式增加了更多支撑结构, 使天线结构设计变得复杂, 这是其不可避免的问题. 如图7所示^[63,64], 组合面板的支撑结构包括基板和子桁架结构, 基板由方截面铝管铆接而成, 刚度较大, 与子面板构成一个整体, 通过5个差动螺旋调节装置对单个子面板进行固定和调节; 子桁架结构由不锈钢材料制成, 采用均衡支撑的桁架结构, 通过8个均衡支撑点使整个面板在重力作用下受力均匀、变形均匀, 且变形量小.

(2) 促动器与主动面控制系统

LMT主动面以一个组合面板为调整单元, 分别使用4个相互独立的精密促动器在面板4个角点进行驱动调节. LMT共使用了720个促动器, 采用直流齿轮电机驱动的位移机构, 定位精度达5 μm . LMT的控制网络遍布在天线结构上, 控制总线随着每环面板的分布而安装, 考虑到第1–3环分块面板数分别为12, 24, 48, 于是控制总线分为7组, 每组12个模块分别调控12个分块面板^[61]. 由图8所示^[65], 在LMT主动面控制系统

表5 GBT促动器设计参数
Table 5 Design parameters of GBT actuators

行程 (cm)	定位精度 (μm)	速率 ($\mu\text{m/s}$)	静载荷 (kg)	动载荷 (kg)	使用寿命	电机类型	位置传感器
51	25	250	481	186	20年, 每年 1270 m	直流有刷电机	LVDI(线性可变 差动变压器)

图6 (网络版彩图)LMT主面分块设计示意图^[48]. (a) 整体示意图; (b) 局部示意图

Figure 6 (Color online) The block design of LMT main surface ^[48]. (a) Overall schematic drawing; (b) enlarged partial view.

图7 (网络版彩图)LMT组合面板支撑结构^[63,64]. (a) 结构示意图; (b) 实物图

Figure 7 (Color online) The support structure of LMT composite panels ^[63,64]. (a) Structural schematic; (b) photograph of a real object.

组成框图中, 第1.1组控制第1环, 第2.1和2.2组控制第2环, 第3.1–3.4组控制第3环. 这种方法具有很好的延展性, 并且每组总线都有独立的交流电路, 便于部署与升级.

LMT的主动面控制系统选用了开环控制系统, 通过查表法(Look Up Table, LUT)来控制促动器的运动. 对于温度变形, LMT结构采用了封闭包裹处理, 并在内部强制通风, 有效使得温度变形最小化. 未来计划通过增加温度传感器和相关热设计对天线加强控制和升级.

LMT副反射面也采用了整体主动调整, 由一个激光跟踪仪对副面位置进行监视, 激光跟踪仪感知由风和温度引起的4个支撑脚架的变形或副面位置的偏移, 并将修正信号传递给副面的3个促动器, 通过促动器将其移动到主面最佳吻合抛物面焦点对应的最佳副面位置上, 这也不失为一种有效的补偿方法.

4.3 撒丁岛射电望远镜(SRT)

SRT采用主动面调整的整体方案是基于意大利Noto 32 m天线的主动面设计^[66,67], 包括主反射面分块设计、促动器设计、主动面控制系统等关键技术, Noto 32 m天线建于2001年, 整体模型取得了很好的调整效果, 为SRT主动面调整的研究与应用积累了宝贵经验.

(1) 分块设计

从图9(a)可以看出, SRT主面分块设计呈中心对称, 共有1008块面板, 沿周向/径向环状分布, 径向分为14环, 每环由24, 48或96块面板周向环状构成. 参考图9(b), 表6给出了SRT对应面板几何尺寸^[68]. 与GBT一样, SRT采用“小面板”分块设计, 每个面板由铝结构表面和铝制Z型加强筋构成, 面板精度优于 $65\ \mu\text{m}$. 为了获得如此高精度面板, 采用了当时(2006年)最先进的粘贴技术, INAF-IRA将Vertex RSI公司最初的面板设计进行了修改, 使面板加工精度由 $0.124\ \text{mm}$ 提高到 $0.072\ \text{mm}$.

当不启用主动面调整时, SRT表面精度为 $630\ \mu\text{m}$; 当工作在高频段23–100 GHz时, SRT将开启主动面调整, 用于补偿因重力、温度和风荷等引起的表面变形, 此时面精度达 $185\text{--}119\ \mu\text{m}$, 其中误差分配为: 重力变形 $67\ \mu\text{m}$ 、温度变形 $11\ \mu\text{m}$ 、风荷变形 $4\ \mu\text{m}$ (此时风速约为 $11.5\ \text{km/h}$).

(2) 促动器设计

图10是SRT促动器安装示意图^[69], 可见SRT也采用了“共用促动器”形式, 每个分块面板下方由位于4个角点处的4个促动器进行驱动调节. 主面共使用了1116个促动器.

与前两部天线应用不同, SRT的精密促动器作用有二, 除了能实时调整主面面形使主面始终接近理想曲面、减小天线口径面的光程差、提高天线指向精度和面形精度以补偿电性能损失, 还可用于天线主面主动变形, 使主面实现在赋形面与标准抛物面之间进

图 8 (网络版彩图)LMT主动面控制系统组成框图^[65]
Figure 8 (Color online) The composition block diagram of LMT active surface control system ^[65].

图 9 SRT主面分块设计与面板尺寸示意图^[68]. (a) SRT主面; (b) SRT面板几何结构图
Figure 9 The block design and panel sizes of SRT main surface ^[68]. (a) Primary reflector of SRT; (b) geometry of the SRT panels.

行面形转换,使望远镜观测视场增大,提高主焦点工作的最高频率.这可总结为“主动保型”和“主动变形”两个功能. QTT的促动器就需要实现这两个功能.

由此,促动器的最大行程由两功能中位移偏差量较大的来决定,综合设计后,给出SRT促动器的行程范围为30 mm,表7是SRT促动器的设计规格^[68].

(3) 主动面控制系统与面形检测

SRT主动面控制系统采用了与LMT相似的开环控制系统,并在此基础上增加了热保护和热控制设计,

但尚未安装完全.另外,除了摄影测量和微波全息测量, SRT天线设计团队还研究了一些更先进、独立的测量系统,例如用于测量主反射面变形的线性光电传

表 6 各环对应面板的几何尺寸
Table 6 Geometric sizes of corresponding ring panels

环数	C1 (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)
1	1670	1214	1646
2	1827	1646	2117
3	2165	1061	1337
4	2166	1337	1611
5	2227	1611	1889
6	2229	1889	2163
7	2313	1082	1221
8	2316	1221	1359
9	2070	1359	1479
10	2073	1479	1597
11	2140	1597	1717
12	2141	1717	1835
13	2241	1835	1956
14	2632	1956	2094

图 10 SRT促动器安装示意图^[69]
Figure 10 The actuators installation of SRT [69].

表 7 SRT促动器设计参数
Table 7 Design parameters of SRT actuators

参数	数值
重量	8.5 kg
规格	280 mm×185 mm×288 mm
行程	30 mm
峰值定位精度	±0.015 mm
轴向负载	工作250 kg(最大1000 kg)
径向负载	工作100 kg(最大700 kg)
速率	360 μm/s
电源	115 V AC
通信协议	RS485+LAN Gateway
工作温度范围	-10°C-60°C
最小/最大功耗	16/23 VA
待机功耗	4 VA
使用寿命	20年

感器;用于绘制温度分布图的温度传感器,一般布置于射电望远镜最敏感区域,从而用于预测温度梯度引起的结构变形等.

4.4 天马望远镜

天马望远镜是目前国内最具代表性的大型全可动射电望远镜之一,其工作频段覆盖8个频段,不启用主动面调整时,表面精度为530 μm.在Ka, Q频段工作时开启主动面调整能使天线表面精度达300 μm,对应口径效率分别为50%, 45%.由图11^[70]可发现天马望远镜高频工作时采用了主动面调整,这大大提高了天线

图 11 (网络版彩图)天马望远镜工作频率与天线效率之间的关系^[70]
Figure 11 (Color online) The relationship between the working frequency and the antenna efficiency of Tianma [70].

的工作效率,同时,相比其他射电望远镜,在相同工作频段内,天马望远镜属于天线效率最高的^[71].

(1) 分块设计

天马望远镜主面口径为65 m,面积达3780 m²,相当于9个标准篮球场,由14环共1008块高精度实面板组成,其分块设计方案与SRT 64 m天线基本相同.天马望远镜第1-12环的面板精度为0.1 mm,第13, 14环的面板精度为0.13 mm,这代表了当时国内大尺度面板加工技术的最高水平^[72].天马望远镜的主动面调整为国内首创,以补偿跟踪观测中重力引起的主面变形,有效提高了天线高频观测性能,使之成为一部国内领先、国际先进的大型全可动天线.与光学望远镜相比,天马望远镜的优点在于看得远,可以观测到100多亿光年以外的天体信号.

(2) 促动器与主动面控制系统

天马望远镜促动器选用“丝杠升降机”方案,由南京优励精工科技有限公司和上海交通大学共同研制完成,天线主面共安装1104台精密促动器,以天线背架的主梁(共24根)为单位,将促动器分为24组,每组46台.该促动器定位精度要求很高,仅为15 μm,并且能承受150 kg侧向载荷,工作寿命要求20年以上,表8给出了天马望远镜促动器设计指标.

每组促动器沿天线面板节点分布来布置,促动器与安装底座之间为菱形结构,不仅保证了促动器的安装定位,还能防止促动器的受力扭转.每台促动器需要两根电缆,分别为电源线和信号线,并均固定在天线背架上.每组促动器通过并联方式供电,电源采用

表 8 天马望远镜促动器设计参数
Table 8 Design parameters of Tianma actuators

重量	高度	行程	重复定位精度	轴向工作负载	径向工作负载	最大速度	工作温度范围	使用寿命
<13 kg	<330 mm	30 mm	0.015 mm	300 kg(破坏 1000 kg)	150 kg(破坏 700 kg)	>0.36 mm/s	-10°C-60°C	20年

交流220 V. 为了简化系统布线, 方便控制点的地址管理和实现控制点的可扩展功能, 主动面控制系统采用分布式总线通讯方式, 实现各个促动器间的联接和协同工作.

4.5 总结与对比

上述四部典型天线应用实例采用了主动主反射面调整技术, 但其主动面设计方案却各不相同. 通过对四部天线主动补偿方案的详细分析, 下面从5个方面进行讨论.

(1) 对于GBT和SRT, 天线低频时工作在主焦点, 高频时工作在格里高利焦点, 并开启主动面以补偿重力变形, 此外SRT可通过促动器调节主面实现赋形面和抛物面等多种面型转换.

(2) LMT 50 m是四部天线中口径最小的, 主面采用“组合面板”这种独特形式, 利于其子面板的精加工, 这使得整个主面精度达到75 μm , 从而大幅度减少了促动器数量, 但因为引入了子桁架结构, 若不减轻背架结构、降低结构复杂度, 就难以适用于类似QTT这样超大口径的天线结构设计. GBT, SRT和天马望远镜都选择了“小面板”配合“共用促动器”形式, 从而降低了天线重量.

(3) SRT和天马望远镜天线口径相当, 一个是欧洲性能最强大的望远镜之一, 一个是国内自主研发, 其主动面设计方案虽有共同点, 但是在天线设计、机械制造、测试调整等方面, 国内与国外最先进技术相比还有继续发展的空间. 例如主面分块都采用小面板设计, 共分为14环1008块, 而天马望远镜的分块面板单块制造精度为0.1-0.13 mm, 约是SRT的两倍; 相邻面板采用同一个促动器进行支撑调节, 共有1116/1104个促动器, 两部天线促动器的行程与精度非常接近, 而天马望远镜天线促动器重量约为SRT的1.5倍. 为此, 未来应在促动器轻量化和性能提升方面加强创新.

(4) 目前四部天线的主动面控制系统与面形检测

方法都在不断完善. 因自重变形具有可重复性, 所以四部天线都采用LUT开环控制方式, 实现自重变形的补偿. 为消除或减弱太阳照射的影响, GBT多选择在夜间工作, LMT和SRT增加温度传感器并采用热控措施, 而我国的天马望远镜正在应用热变形补偿技术. 为进一步提高天线面型调控效率与效果, 表面形貌获取方法与变形补偿控制算法仍有很大发展空间.

(5) 上述四部天线主要采用钢铝等传统材料来保证支撑结构的高刚度与驱动构件的高强度, 而新型材料在大型天线中有着“潜力无限”的应用前景. 例如美国筹建的CCAT天线, 其采用碳纤维作为背架结构的主要材料, 对关键联接部位与主要驱动构件采用复合材料进行过渡, 来减弱材料物理特性不一致带来的天线性能额外损耗, 最终实现在25 m物理口径上, 以不采用主动面的10 μm 表面精度工作于THz频段. 为提升天线性能, 应加大新型材料在QTT等超大型射电望远镜中的研究深度与应用广度.

纵观国际射电望远镜, GBT和LMT分别是“大口径”与“高精度”的典型代表, 两部天线都是由美国主导设计研制而成的, 可见这个超级大国在射电天文领域有着雄厚实力与坚实基础. 为促进我国天文科学与深空探测技术的发展, QTT应多借鉴国外天线在结构创新设计方案、精密与主动补偿、新型功能材料应用等多方面的成功经验.

5 QTT主动面研究建议

射电望远镜已进入大口径、高增益、高灵敏度、宽频段、大样本的时代, 面对天线复杂结构和高精度面形提出的挑战, 主动面调整发挥了巨大作用. 在未来110 m QTT建设中, 建议主动面研究重点关注如下3个方面:

(1) 面向制造成本和电性能的面板分块设计
合适的分块策略需兼顾面板成型工艺、赋形面与标准面切换和天线背架结构复杂度. 低频时主反射

面为抛物面, 高频时面型切换为赋形面. 考虑到国内天线面板制造能力, 单块面板的最大面积可达 2 m^2 左右, 所以组合面板是否采用、精度提升与重量增加如何平衡等都需要探讨. 同时, 面板形貌误差分布应结合电性能指标(波束指向和增益)来确定, 因为作者以往研究已经证明面形精度满足要求的天线, 其指向精度未必是最佳的. 因此, 面向制造成本和电性能的反射面合理分块是QTT天线结构研究中的重要一环.

(2) 高可靠性和轻量化的精密促动器研究

从前述内容可知, 实现面形的精准调整, 必须有超精密的促动器. 而大量促动器的装配, 必然增加背架结构的负担和造成主面形貌的额外起伏, 所以轻量化也应是促动器的指标. 当然, 所有电子设备环境适应性方面的可靠性、电磁兼容性、使用寿命都是促动器必然的考虑内容. 另外, 因QTT促动器预期达到7600个, 所以制造成本方面应多采用新型材料、集成工艺、外包加工等手段来设法降低.

(3) 精确的主动面调整模型构建和计算

随着天线观测仰角变化、太阳照射的热流密度变化、脉动风的随机和时变, 都会导致结构变形的不确定. 另外, 促动器复位精度和行程精准性、主副面板安装位置误差、重力最佳预调角的面板安装等都应采用不同手段融入到主动面调整模型中. 同时, 天线反射体和座架结构有限元模型与工程实际结构中必然存在非常多的结构细节差别和连接方式变化, 所以在天线安装后需要通过结构力学参数测试(比如局部模态振型), 逐渐精细修正结构有限元模型(用于面板形貌计算), 包括转动副和连接自由度等. 还有, 轨道不平度、座架安装不准和载荷扭转也应在主面指向调整时作为确定性误差加以考虑和消除.

天线的设计与建造本就不是易事, 何况射电望远镜的研制各不相同, 随着口径越大、频率越高、要求越苛刻, 更不是易事. 对于天线设计师和机械工程师来说, 超大口径射电望远镜QTT结构设计、指向控制、主动面调整等方面的研究与实现是一个长远而复杂的过程, 充满机遇与挑战.

参考文献

- 1 Rahmat-Samii Y, Haupt R. Reflector antenna developments: A perspective on the past, present and future. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2015, 57: 85–95
- 2 Rusch W V T. The current state of the reflector antenna art. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1984, 32: 313–329
- 3 Du B, Wu Y, Zhang Y F, et al. Overview of large reflector antenna technology (in Chinese). *Radio Commun Tech*, 2016, 42: 01–08 [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: 01–08]
- 4 Kärcher H J, Baars J W M. Ideas for future large single dish radio telescopes. In: *Proceedings of Ground-Based and Airborne Telescopes V*. Quebec: SPIE, 2014
- 5 Shi H L, Zhang J Y. Recent advances in large antenna & antenna-array in China (in Chinese). *Electron Mech Eng*, 2004, 20: 21–24 [施浒立, 张巨勇. 我国大天线的新进展. *电子机械工程*, 2004, 20: 21–24]
- 6 Von Hoerner S. Design of large steerable antennas. *Astron J*, 1967, 72: 35–47
- 7 Gawronski W. Control and pointing challenges of antennas and telescopes. In: *Proceedings of American Control Conference*. Portland: IEEE, 2005. 175–178
- 8 Duan B Y, Wang C S. Reflector antenna distortion analysis using MEFCM. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2009, 57: 3409–3413
- 9 Imbriale W A, Britcliffe M J, Brenner M. Gravity Deformation Measurements of NASA's Deep Space Network 70-Meter Reflector Antennas. Progress Report, National Aeronautics and Space Administration. 2001
- 10 Wang C S, Duan B Y. On development and application of mechanical-electromagnetic-field coupling model of reflector antennas (in Chinese). *Acta Electr Sin*, 2011, 39: 1431–1435 [王从思, 段宝岩. 反射面天线机电场耦合关系式及其应用. *电子学报*, 2011, 39: 1431–1435]
- 11 Griffith P. Thermal Design of The Large Millimeter Telescope (LMT) and Expected Accuracy of Temperatures from Measurements. Technical Report, Simpson Gumpertz and Heger Inc. 1997
- 12 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 Propag*, 1983, 31: 92–98
- 13 Wang M, Wang W, Wang C S, et al. A practical approach to evaluate the effects of machining errors on the electrical performance of reflector antennas based on paneled forms. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2014, 13: 1341–1344

- 14 Mobrem M. Methods of analyzing surface accuracy of large antenna structures due to manufacturing tolerances. In: Proceedings of the 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Norfolk: AIAA, 2003
- 15 Ruze J. Antenna tolerance theory—A review. [Proc IEEE](#), 1966, 54: 633–640
- 16 Grahl B H, Godwin M P, Schoessow E P. Improvement of the Effelsberg 100-meter telescope based on holographic reflector surface measurement. *Astron Astrophys*, 1986, 167: 390–394
- 17 Zhang P. Structural homology design of large diameter radio telescope (in Chinese). *Electron Mech Eng*, 2014, 6: 43–46 [张萍. 大口径射电望远镜结构的保型设计. *电子机械工程*, 2014, 6: 43–46]
- 18 Cowles P R, Parker E A. Reflector surface error compensation in Cassegrain antennas. [IEEE Trans Antennas Propag](#), 1975, 23: 323–328
- 19 Xu S, Rahmat-Samii Y, Imbriale W A. Subreflectarrays for reflector surface distortion compensation. [IEEE Trans Antennas Propag](#), 2009, 57: 364–372
- 20 Srikanth S. Gain Reduction Due to Gravity-Induced Deflections of the GBT Tipping Structure and Its Compensation. Technical Report, NRAO, 1994
- 21 Wang J Q, Yu L F, Zhao R B, et al. Sub-reflector model depending on elevations and performance evaluation for TM65 m radio telescope (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2014, 44: 1232–1240 [王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. TM65 m 射电望远镜副面随动模型及性能评估. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 1232–1240]
- 22 Yu W Q, Shi B J. Best-fit of the Cassegrain antenna sub-reflector and its adjustment (in Chinese). *Electron Mech Eng*, 1987, 3: 60–71 [俞惟铨, 时宝军. 卡氏副面最佳吻合和主副面最佳匹配调整. *电子机械工程*, 1987, 3: 60–71]
- 23 Rothman H, Chang F K. Maintaining Surface Accuracy of Large Radio Telescopes by Active Compensation. New York: Structures Technology for Large Radio and Radar Telescope Systems, 1969. 273–286
- 24 Greve A, Karcher H J. Performance improvement of a flexible telescope through metrology and active control. [Proc IEEE](#), 2009, 97: 1412–1420
- 25 Liang J K, Men J H, Ju Z T, et al. Microcomputer detection and adjustment system of paraboloid antenna reflector (in Chinese). *Electron Mech Eng*, 1990, 1: 54–60 [梁健康, 门俊环, 鞠志涛, 等. 旋转抛物面天线反射面微机检测和调整系统. *电子机械工程*, 1990, 1: 54–60]
- 26 Wang C S, Wang W, Song L W. Field Coupling Theory and Technology of Microwave Antennas (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]
- 27 Wang C S, Liu X, Wang W, et al. Analysis method of temperature distribution characteristic and thermal distortion of large reflector antennas (in Chinese). *J Astron*, 2013, 34: 1523–1528 [王从思, 刘鑫, 王伟, 等. 大型反射面天线温度分布规律及变形影响分析. *宇航学报*, 2013, 34: 1523–1528]
- 28 Wang W, Duan B Y, Ma B Y. A method for panel adjustment of large reflector antenna surface and its application (in Chinese). *Acta Electron Sin*, 2008, 36: 1114–1118 [王伟, 段宝岩, 马伯渊. 一种大型反射面天线面板测试与调整方法及其应用. *电子学报*, 2008, 36: 1114–1118]
- 29 Wang C S, Duan B Y, Qiu Y Y. On new fitting method of large distorted antenna reflectors based on Coons surface and B-spline (in Chinese). *J Electron Inf Tech*, 2008, 30: 233–237 [王从思, 段宝岩, 仇原鹰. Coons曲面结合B样条拟合大型面天线变形反射面. *电子与信息学报*, 2008, 30: 233–237]
- 30 Bolli P, Olmi L, Roda J, et al. A novel application of the active surface of the shaped Sardinia radio telescope for primary-focus operations. [Antennas Wirel Propag Lett](#), 2014, 13: 1713–1716
- 31 Von Hoerner S. Internal twist and least-squares adjustment of four-cornered surface plates for reflector antennas. [IEEE Trans Antennas Propag](#), 1981, 29: 953–958
- 32 Woody D, MacDonald D, Bradford M, et al. Panel options for large precision radio telescopes. In: Proceedings of Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation. Marseille: SPIE, 2008
- 33 Wang C S, Duan B Y, Zheng F, et al. Mechatronic optimization design and analysis of large space parabolic antennas with active truss support structures (in Chinese). *Acta Electron Sin*, 2008, 36: 1776–1781 [王从思, 段宝岩, 郑飞, 等. 大型空间桁架面天线的结构——电磁耦合优化设计. *电子学报*, 2008, 36: 1776–1781]
- 34 Wang C S, Duan B Y, Qiu Y Y. On distorted surface analysis and multidisciplinary structural optimization of large reflector antennas. [Struct Multidisc Optim](#), 2007, 33: 519–528
- 35 Antebi J, Kan F W, Rao R S. Active segmented primary reflector and pointing accuracy of the large millimeter telescope (LMT). In: Proceedings of SPIE Advanced Technology MMW, Radio, and Terahertz Telescopes Conference. Hawaii: SPIE, 1998. 220–230
- 36 Cortes-Medellin G, Goldsmith P F. Analysis of active surface reflector antenna for a large millimeter wave radio telescope. [IEEE Trans Antennas Propag](#), 1994, 42: 176–183
- 37 Smith D R, Souccar K, Magaña C A, et al. Performance testing of the LMT/GTM primary surface actuators. In: Proceedings of Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation. Quebec: SPIE, 2014

- 38 Sun C, Zhu L C, Yu D J. Control algorithm with node movement of the active reflector for the FAST (in Chinese). *Sci Tech Eng*, 2012, 20: 489–493 [孙纯, 朱丽春, 于东俊. FAST主反射面节点运动控制算法. 科学技术与工程, 2012, 20: 489–493]
- 39 Wang Y Z. Design of active reflector adjustment system for large radio telescope (in Chinese). *Radio Eng*, 2010, 40: 36–38 [王宇哲. 大型射电望远镜反射面主动调整系统设计. 无线电工程, 2010, 40: 36–38]
- 40 Li T, Zhang Z, Li A, et al. Active surface control for a large radio telescope. *J Univ Sci Tech China*, 2013, 43: 24–28
- 41 Pernechele C, Barbieri C, Bolli P, et al. A control loop closure system for the Sardinia radio telescope active surface. In: *Proceedings of Modern Technologies in Space-and-Ground-based Telescopes and Instrumentation*. San Diego: SPIE, 2010
- 42 Nikolic B, Prestage R M, Balser D S, et al. Out-of-focus holography at the green bank telescope. *Astron Astrophys*, 2007, 465: 685–693
- 43 Li Z C, Li G Y, Wu X P. Review of accuracy measuring technology of antenna's surface (in Chinese). *Bull Surv Mappin*, 2003, 6: 16–19 [李宗春, 李广云, 吴晓平. 天线反射面精度测量技术述评. 测绘通报, 2003, 6: 16–19]
- 44 Parker D H, Payne J M, Shelton J W, et al. Instrument for setting radio telescope surfaces. In: *Proceedings of ASPE 2000 Annual Meeting*. Scottsdale: American Society for Precision Engineering, 2000. 21–24
- 45 Li L Y, Wang Y F. Active compensation technology of photoelectric theodolite primary mirror surface-shape error (in Chinese), *Acta Photon Sin*, 2013, 42: 79–83 [李零印, 王一帆. 光电经纬仪主镜面型误差主动补偿技术研究. 光子学报, 2013, 42: 79–83]
- 46 Subrahmanyam R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a Cassegrain antenna. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2005, 53: 2590–2596
- 47 Goldsmith P. Resetting the Arecibo primary reflector surface. *Arecibo Observatory Newsletter*, 2001, 32: 1–4
- 48 Gale D M. Experience of primary surface alignment for the LMT using a laser tracker in a non-metrology environment. *SPIE*, 2012, 8444: 844453
- 49 Bennett J C, Anderson A P, McInnes P A, et al. Microwave holographic metrology of large reflector antennas. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1976, 24: 295–303
- 50 Hunter T R, Schwab F R, White S D, et al. Holographic measurement and improvement of the green bank telescope surface. *Publ Astron Soc Pac*, 2011, 123: 1087–1099, arXiv: [1107.2081](https://arxiv.org/abs/1107.2081)
- 51 Prestage R M, Constantinescu K T, Hunter T R, et al. The green bank telescope. *Proc IEEE*, 2009, 97: 1382–1390
- 52 Schloerb F P, Carrasco L. The large millimeter telescope. In: *Proceedings of the 15th International Symposium on Space Terahertz Technology*. Northampton: University of Massachusetts, 2004. 305–308
- 53 Ustoff J M, Clarke M T, Chao L, et al. Optimizing the HUSIR antenna surface. *Lincoln Lab J*, 2014, 21: 83–105
- 54 Hachenberg O, Grahl B H, Wielebinski R. The 100-meter radio telescope at Effelsberg. *Proc IEEE*, 1973, 61: 1288–1295
- 55 Pelosi G, Tofani G. Sardinia radio telescope (SRT): Instrumentation research and development. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2005, 47: 178–180
- 56 Shen Z Q. Shanghai 65 m radio telescope (in Chinese). *Science (Shanghai)*, 2013, 65: 15–20 [沈志强. 上海65米射电望远镜. 科学(上海), 2013, 65: 15–20]
- 57 Nan R D. FAST 500 m spherical telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2005, 35: 449–466 [南仁东. 500 m 球反射面射电望远镜 FAST. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2005, 35: 449–466]
- 58 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 m射电望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 783–794]
- 59 Lacasse R J. Green bank telescope active surface system. *SPIE*, 1998, 3351: 310
- 60 Balser D, Braatz J, Frayer D, et al. Observing With The Green Bank Telescope. Green Bank: National Radio Astronomy Observatory, 2015
- 61 Jacob W M B, Hans J K. Design features of the Large Millimeter Telescope (LMT). In: *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. IEEE, 1999. 1544–1547
- 62 Alvarez M L, Torres C T, Rios E H, et al. Metrology and surface adjustment of primary reflector panels on the LMT. In: *Proceedings of Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*. Quebec: SPIE, 2014
- 63 Irvine W M, Carrasco E, Aretxaga I. The Large Millimeter Telescope: Neighbors Explore the Cosmos. Amherst: University of Massachusetts, 2005
- 64 Hughes D. The LMT and mm VLBI. In: *Proceedings Of From Stars to Black Holes: mm-VLBI with ALMA and Other Telescopes Scientific Workshop*. Garching: European Southern Observatory, 2012
- 65 Souccar K, Wallace G, Grosslein R, et al. The architecture of the active surface control system of the large millimeter telescope. In: *Proceedings of Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*. Quebec: SPIE, 2014
- 66 Orfei A, Morsiani M, Zacchiroli G, et al. The active surface system on the Noto radio telescope. In: *Proceedings of the 6th European VLBI Network Symposium*. Bonn: Max-Planck-Institute für Radioastronomie, 2002
- 67 Zacchiroli G, Fiocchi F, Maccaferri G, et al. The panels for primary and secondary mirror reflectors and the active surface system for the new

- Sardinia Radio Telescope. *Memorie Della Società Astron Italiana Suppl*, 2006, 10: 126–130
- 68 Elena C. SRT Project Book. Bologna: the Istituto di Radioastronomia di Bologna, the Cagliari Observatory (Cagliari) and the Arcetri Astrophysical Observatory (Florence), 2007
- 69 Orfei A, Morsiani M, Zaccaro G, et al. Active surface system for the new Sardinia radio telescope. In: *Proceedings of Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*. Quebec: SPIE, 2014
- 70 Shen Z Q. Tianma 65-m radio telescope. In: *Proceedings of The 3rd China-U.S. Workshop on Radio Astronomy Science and Technology-Emerging Opportunities*. Green Bank: NRAO and Shanghai Astronomical Observatory, 2014
- 71 Wang W, Leng G, Duan B, et al. Compensation for gravity deformation via subreflector motion of 65 m shaped Cassegrain antenna. *IET Microwaves Antennas Propag*, 2014, 8: 158–164
- 72 Jin C, Wei F, Li J L, et al. Principle and application of precision forming for panel of 65 m radio telescope (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2015, 30: 1–7 [金超, 尉飞, 李金良, 等. 65 m射电望远镜面板精密成形原理与应用. *电波科学学报*, 2015, 30: 1–7]

Development of active surface technology of large radio telescope antennas

WANG CongSi^{1,2*}, XIAO Lan^{1,3}, XIANG BinBin^{1,4}, WANG Wei¹, XU Qian⁴,
JIANG Li⁵, WANG Na⁴ & DUAN BaoYan¹

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

² Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley 94720, USA;

³ Huawei Technologies Company, Limited, Shenzhen 518129, China;

⁴ Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

⁵ China Electronics Technology Group Corporation No. 39 Research Institute, Xi'an 710065, China

Aperture expanding and frequency upgrading of full steerable antennas make the electrical performance of the antennas difficult to guarantee, and that radio telescopes operate in a complex environment, so it has to improve the performance by some methods like mechanical or electronic compensation. To control the pointing accuracy and the detecting distance of antennas, we must adjust the position and the surface shape of shaped reflectors, in another word, the active surface adjustment is the most effective way. Therefore, this article describes the situation and status of applications of active surface adjustment. Then, it summarizes the basic principle and the applications of active surface adjustment and particularly analyzes the key technologies which include the calculation of actuator movement, the block design of main surface, the actuator design, the active surface control system and the surface profile measuring. The comparisons among four large radio telescopes of the world are discussed, which have used active surface technology. At last, it points out some suggestions on the future research of active surface technology of large radio telescopes such as QTT.

radio telescope, antenna reflector, active adjustment, electromechanical coupling, performance compensation

PACS: 07.57.-c, 84.40.Ba, 89.20.Bb, 87.80.Ek

doi: 10.1360/SSPMA2017-00011