



反射面天线全路径机电耦合建模与补偿研究综述

王伟^{1,2}, 顾原冰^{1*}, 王祖铨¹, 王娜³, 古丽加依娜·哈再孜汗³

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. 西安电子科技大学空间太阳能电站系统陕西省重点实验室, 西安 710071;

3. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011

*联系人, E-mail: guyuanbing1119@163.com

收稿日期: 2023-07-04; 接受日期: 2023-08-16; 网络出版日期: 2023-12-26

国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203501)、国家自然科学基金(编号: 52275270)和陕西省自然科学基金(编号: 2023-JC-JQ-38, 2020JM-179)资助项目

摘要 反射面天线广泛应用于射电天文、卫星通信等领域, 其电性能与结构制造工艺、安装误差和环境载荷等因素间存在极为复杂的影响关系, 因此随着天线口径增大、频段提高, 天线设计制造的难度也在不断增加. 为突破该技术难题, 本文围绕反射面天线机电耦合理论建模与补偿技术发展现状, 从误差分类角度分别概述了主面、副面结构变形及馈源位姿偏移等误差对天线电性能的影响, 从主动反射面、阵列馈源等技术手段出发, 梳理了反射面天线在服役过程中的全路径电性能补偿方法. 这些现状梳理, 有助于理论方法的创新, 更好地完成天线设计, 有助于准确预测天线服役性能, 更有效地实现全工况下的综合补偿, 达到天线的性能指标.

关键词 反射面天线, 机电耦合, 全路径, 误差, 补偿

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Ba, 87.80.Ek

1 引言

随着射电天文学、深空探测和地球观测等领域的快速发展, 对大口径、高频段反射面天线的需求不断增加. 大口径反射面天线具有高增益、窄波束和高方向性等优点, 是实现远距离通信的关键设备. 然而, 受制造工艺、安装误差和环境载荷等因素的影响, 天线结构不可避免地出现偏差, 从而导致天线性能下降. 在大口径和高频段的发展趋势下, 这种性能恶化更加明显. 因此, 研究大口径反射面天线的误差分析和补

偿方法具有重要的理论意义和实际工程应用价值.

自20世纪50–60年代以来, 研究人员一直致力于反射面天线的误差分析, 为国内外大型射电望远镜的设计和制造提供了有效的指导. 目前, 有关反射面天线误差分析的研究已经涵盖主反射面、副反射面和馈源等组成天线系统的主要结构部件. 借助概率统计和数值分析等方法, 研究人员给出了各类误差对天线电性能的影响关系, 为提高天线的设计水平和保证天线的电性能提供了帮助.

随着大口径反射面天线的发展以及对服役工况适

引用格式: 王伟, 顾原冰, 王祖铨, 等. 反射面天线全路径机电耦合建模与补偿研究综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 219502
Wang W, Gu Y B, Wang Z H, et al. A review of full-path electromechanical coupling modeling and compensation for reflector antennas (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 219502, doi: [10.1360/SSPMA-2023-0218](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0218)

应性需求的进一步提高, 仅仅依靠机电分离的纯结构设计已经不能完全满足天线的性能指标要求, 这促使了机电耦合设计理论以及电性能补偿技术的产生. 研究人员在设计阶段建立结构参数与电性能之间的关系, 进而以电性能为目标设计天线结构, 实现反射面天线的机电耦合设计. 在建造阶段, 通过在天线结构、馈源辐射等方面采取一定的调整手段, 来补偿天线结构偏差带来的影响. 目前, 主动面调整等主动补偿技术已经广泛应用于大口径反射面天线, 为服役于复杂环境中的天线提供了良好的补偿效果.

综上所述, 大口径反射面天线的机电耦合理论与补偿技术的研究对保障天线电性能具有重要价值. 本文概述了反射面天线机电耦合理论建模与补偿技术研究现状, 为相关领域的研究者提供有益参考.

2 反射面天线全路径机电耦合建模研究

反射面天线是一种典型的机电集成的电子装备,

其工作环境通常比较复杂, 容易受到重力、温度载荷、风荷等因素的影响, 导致天线自身结构发生变形, 从而引起系统误差. 此外, 在反射面天线的制造与安装过程中, 会产生无法事先预测的随机误差, 这些误差都对天线电性产生不利影响, 如增益下降、副瓣电平抬高^[1].

从结构误差的角度来看, 反射面天线机电耦合分析中存在的误差主要包括主面误差、副面误差、馈源误差以及其他结构带来的影响. 其中, 主面误差主要为主反射面变形误差, 副面误差包括副面变形误差以及副面位姿误差, 馈源误差则包括馈源位置误差以及馈源指向误差等. 反射面天线全路径机电耦合建模研究相关内容如图1所示.

2.1 反射面天线主面误差

以误差来源为分类标准, 主面上的表面误差可以分为随机误差和系统误差. 在反射面天线全路径机电耦合分析中, 分析主面误差对电性能的影响至关重要.

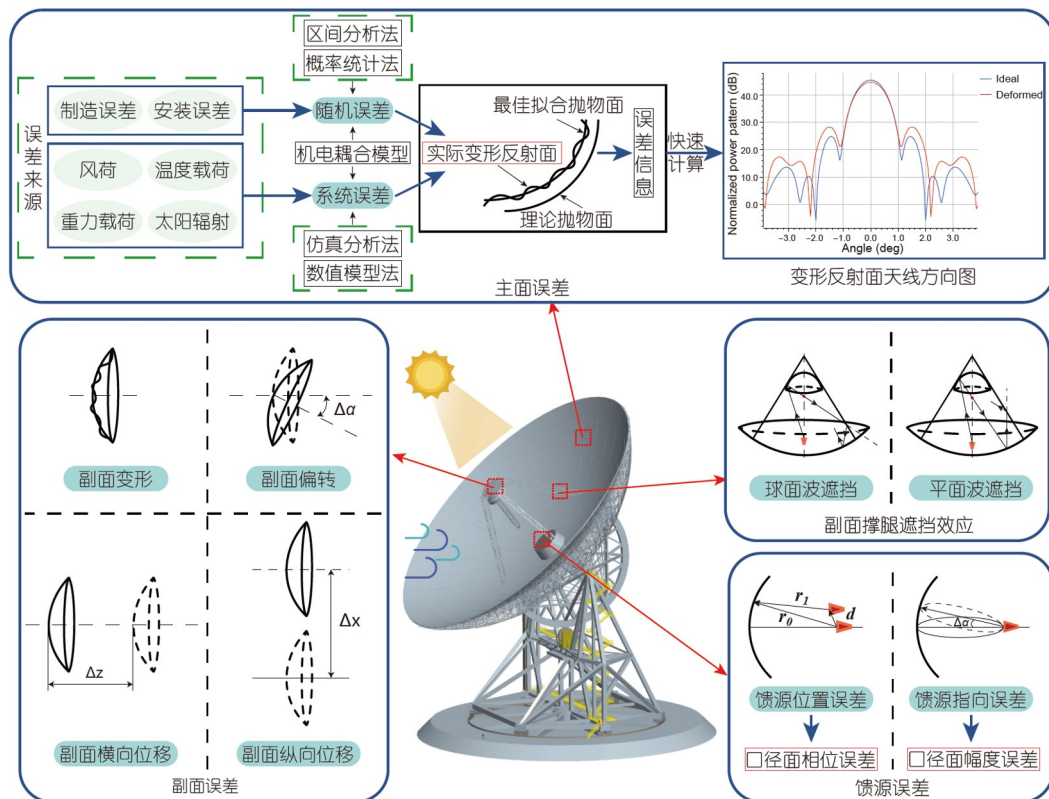


图1 反射面天线全路径机电耦合建模方法

Figure 1 Reflector antenna full-path electromechanical coupling modeling methods.

2.1.1 表面随机误差对天线电性能影响分析

随机误差主要是加工、装配过程中产生的误差, 其误差的大小和分布具有随机性. 其分析方法主要有概率统计法以及区间分析法.

(1) 概率统计法

在实际应用中, 反射面天线表面随机误差通常使用均方根误差(RMSE)作为评估的指标. 为了研究表面随机误差对反射面天线电性能的影响, 可以使用概率统计法来分析其概率分布特征. Ruze^[2]最早使用概率统计分析方法, 给出了表面随机误差与天线电性能之间的影响关系, 并被广泛应用于天线结构设计中. Kaufmann等人^[3]使用近似高斯分布分析了缓变表面误差对天线性能的影响机理. Tripp^[4]提出了一种改进的概率模型来分析随机误差对平均功率图的影响, 并推导了随机变形下孔径辐射平均功率图的闭合矢量表达式. Rahmat-Samii^[5]在Ruze公式的基础上, 结合Greve等人^[6]提出的模型, 给出了随机表面误差对平均功率图影响的计算方法. 该模型将孔径平面划分成同心圆环, 每个圆环又划分成子区域, 并将每个子区域上的误差视为相互独立且服从同样的高斯分布. 此后, 大量研究工作基于Rahmat-Samii的模型展开^[7-9], 包括表面随机误差与旁瓣电平之间的概率关系研究, 随机表面误差对波束效率的影响研究, 随机误差与相位不匹配误差对天线性能的影响研究等. Sinton等人^[10]和Liu等人^[11]采用概率统计方法, 分别研究了表面随机误差对偏置柱面天线和偏置卡塞格伦天线的电性能的影响. 除了随机表面误差, 随机安装误差也会对天线电性能造成负面影响, Wang等人^[12]研究了面板设置误差对大型反射面天线电性能的影响, 并推导了面板设置误差与孔径误差之间的误差转换矩阵的近似表达式.

近年来, 许多研究人员将泰勒级数展开、优化模型等方法与概率统计法相结合, 来研究表面随机误差对天线电性能的影响. Wang等人^[13]研究了反射面天线面板加工误差对天线电性能的影响, 将每个面板的误差场用一阶泰勒展开表示, 给出了平均功率随面板误差和误差相关区间的变化规律. Zhang等人^[14]将随机表面变形引起的附加相位误差扩展为辐射积分的二阶泰勒级数展开. 基于相位误差的概率高斯分布, 可以将轴视增益损失和平均功率图简化为随机表面误差均方根值的二阶表达式. 之后, 针对非光滑抛物面反射面天

线, Zhang等人^[15]提出了广义随机误差表征方法, 在辐射积分二阶泰勒级数展开工作的基础上, 导出了广义方法的两个矩阵形式公式. 当随机表面误差为高斯分布时, 使用该方法可以很容易地计算出平均功率图. Lian等人^[16,17]基于Samii模型, 构建了以峰值增益损失和第一副瓣电平抬高量为目标的多目标优化模型, 分析了表面误差沿半径的非均匀性以及不同环内随机误差对反射面天线增益和副瓣电平的影响.

(2) 区间分析法

区间分析法一般将表面误差引起的相位误差表示为一个区间, 并利用区间算法计算相应的区间功率图, 所得的区间功率图也是一个有上下界的区间, 包括因区间范围内误差所辐射出的所有可能的功率图. Rocca等人^[18]最早提出了使用区间分析来研究抛物面天线表面变形对天线方向图的影响, 他将均方根表面误差建模为区间, 然后采用区间算法规则有效地预测了其功率模式的影响以及光束特性的灵敏度. Song等人^[19]采用区间分析研究了抛物面反射面天线的全局和局部表面变形对功率图的影响. Anselmi等人^[20]采用基于区间算法的分析工具, 研究了凹凸形表面变形对功率图的影响. 之后, Anselmi等人^[21]提出了基于Minowski求和方法的区间分析方法, 能够计算区间范围更加严格的情况.

除了以上两种方法之外, 研究人员也利用其他工具分析表面随机误差对天线电性能的影响. 例如, Li等人^[22]采用二维分形模型建立了天线表面随机误差模型, 研究了随机误差对反射面天线辐射特性的影响. Jo等人^[23]借助电磁分析软件, 分析了面板误差和随机表面误差对可展开天线性能的影响.

2.1.2 表面系统误差对天线电性能影响分析

系统误差主要是由重力载荷、温度载荷、风荷等因素作用于天线结构而引起的, 它是一种可以预测的误差, 可以采用仿真分析法和建模法来研究. 通常需要使用有限元软件或者测量技术获取反射面因系统误差产生的变形信息, 然后可以采用仿真分析法或建模法研究系统误差对天线电性能的影响, 两种方法可以相互印证.

(1) 仿真分析法

在分析表面系统误差时, 通常需要使用电磁仿真软件进行电磁仿真. 将包含系统误差信息的数据、模

型传递给电磁仿真软件后, 可以借助软件中的分析工具, 计算天线的电性能. 例如, Greve等人^[24]采用有限元分析法获取了天线表面的温度变形, 并分析了其对天线电性能的影响. 杨仲^[25]采用仿真分析的方法, 研究了反射面天线热变形对天线电性能的影响. Wang等人^[26]分析了反射面天线在不同太阳入射角下的反射面热应力和变形情况, 综合描述了一天內反射面温度分布及其影响. Pavlovic等人^[27]建立随机失真、一维余弦失真和二维余弦失真三种失真模型, 并使用 WIPL-D Pro对反射面天线的周期性表面变形进行全波分析. 宁亮等人^[28]研究并建立了综合考虑太阳辐射、环境对流、远空辐射等因素的反射面板的有限元模型, 分析了面板在最恶劣环境下的日照温度场与变形场时间和空间的分布特性.

(2) 数理模型分析法

物理光学模型、几何光学模型等模型的建立为分析系统误差提供了另一条途径. 该方法比仿真分析法更具有灵活性, 不受限于软件自身的功能, 可以根据研究内容的前置条件和研究需求建立相应的模型, 但模型的建立过程通常比较繁琐. Rusch等人^[29]研究了表面轴向周期性误差对伞形可展开天线电性能的影响. Rahmat-Samii^[30]基于物理光学法, 研究了热变形、重力变形引起的周期性误差对反射面天线电性能的影响, 分析了不同周期性误差对副瓣电平的影响. Dong等人^[31]利用物理光学法(PO)和物理绕射理论(PTD)分析具有表面畸变和穿孔的反射面天线电性能. Haddadi等人^[32]采用物理光学法, 研究了表面周期变形、非周期变形以及局部变形对偏置反射面天线的远场方向图和极化特性的影响. 宋薇薇等人^[33]利用二次曲面交截椭圆建立局部凸起形变的数学模型, 并采用物理光学法分析局部凸起形变对反射面天线电性能的影响. Yang等人^[34]基于反射面二维高斯模型, 研究了反射面局部变形对天线电性能的影响, 分析了各变形参数对天线接收功率的影响. Li等人^[35]采用机电耦合分析方法, 研究了地面反射面天线的温度分布, 并讨论了太阳辐射引起的热变形对天线电性能的影响.

除了主反射面随机误差和系统误差的研究之外, 研究人员还研究了加工条件、雨雪堆积、沙尘堆积等因素对天线电性能的影响. 李鹏等人^[36]利用分形函数建立反射面天线面板表面纹理的数学模型, 分析了不同加工纹理对反射面天线电性能的影响. Bashir^[37]研

究了沙尘堆积对抛物面反射天线的影响. Nechitaylo等人^[38]采用近似物理光学法, 研究了积雪对反射面天线增益的影响. Sukharevsky等人^[39]研究了反射面天线上沉积的降水层对天线电性能的影响. 刘彦等人^[40]研究了冲击波作用下的结构变形对反射面天线电性能的影响. 袁俊明等人^[41]利用电磁分析软件中的物理光学法和矩量法, 研究了破片穿孔毁伤对圆抛物面天线电性能影响, 分析了天线电性能随穿孔密度的变化规律.

2.1.3 变形反射面分析方法

随着科学技术的发展, 人们对反射面天线性能的要求也不断提高. 随着天线口径增大, 工作频率提高, 研究反射面变形对电性能的影响已成为反射面天线机电耦合分析中不可忽略的重要环节. 在过去几十年中, 国内外学者已进行了大量深入的研究, 提出了许多方法与思路.

(1) 变形反射面拟合方法

针对变形反射面拟合的方法是进行机电耦合分析的重要步骤之一. 由于反射面天线在服役过程中不可避免地受到随机误差和系统误差的影响, 其实际反射面皆为变形曲面. 因此, 需要尽可能精确地表示出变形反射面方程, 以便更加精确地分析变形反射面的电性能.

叶尚辉^[42]提出了最佳吻合抛物面法(BFP), 可以根据顶点的位移、焦轴的方向以及焦距的变化量来确定最佳吻合抛物面. 华慕麟^[43]给出了基于最小二乘法原理获得最佳吻合抛物面的数学模型. Keith等人^[44]提出利用变形板理论对反射面进行插值, 该方案能够处理非均匀网格, 并保证一定的计算效率. 王从思等人^[45]基于变形反射面的实际形状, 提出了分块Coons拟合法. 该方法将变形后的反射面进行分块, 对每个块域实施Coons曲面拟合, 并采用三角函数和二次径向函数拟合确定曲面边界条件, 最终得到变形反射面的完整信息. 之后, Wang等人^[46]又提出了Coons曲面结合B样条拟合变形反射面的方法. Ban等人^[47]将大型单、双反射面的最佳拟合抛物面概念推广到具有均匀振幅分布的大型双反射面的最佳拟合曲面, 并给出了变形反射面的同源参数. Lei^[48]提出使用非均匀有理B样条(NURBS)来拟合变形反射面, 并直接在结构模型的基础上完成电性能计算. 除此之外, 还可利用雅克比多项式、Zernike多项式等方式拟合反射面.

(2) 变形反射面电性能快速计算

在反射面天线的结构优化设计以及工程应用, 均需要反复计算天线在不同工况下的电性能, 这将耗费大量的时间与资源, 变形反射面天线电性能快速计算方法的研究, 不仅可以节省资源与时间, 提高天线设计的效率, 还能在工程应用中, 通过快速计算、数据存储等方式, 避免大量重复性的计算, 快速获取不同工况下的天线电性能, 以应对不断变化的外界环境干扰, 满足实时主动补偿的需求. Smith等人^[49]提出了一种基于表面误差分解的模式逼近方法, 将辐射积分分解为一系列辐射型积分, 通过回忆预先存储的数据, 实现快速计算. Zhang等人^[50]基于机电耦合设计研究了变形反射面辐射图的近似分析方法, 该方法采用形函数插值确定积分点变形, 进而建立了节点信息和辐射图之间的函数关系, 通过回忆存储的数据和结构有限元信息, 实现变形反射面辐射图的快速计算. 之后, Zhang等人^[51]又研究了考虑表面法向量变化的变形反射面天线方向图分析的近似数学公式, 通过将曲面法向量展开为一阶泰勒级数, 将相位误差展开为二阶泰勒级数, 完善了变形反射面方向图快速计算的过程. Lian等人^[52]研究了基于指数误差项分段线性拟合的变形反射面天线电性能快速计算方法, 该方法可以应用于变形尺寸较大的反射面, 并可以保证较高的计算精度. Zhang等人^[53]结合最佳拟合抛物面和加权馈源主方向图的概念, 提出了一种结构有限元网格划分方法, 并给出快速图形计算的近似公式, 用于不同表面变形情况下肋形反射器电性能的快速计算.

2.2 反射面天线副面误差

副面误差可分为副面位姿误差和副面变形误差. 在大多数副面误差分析中, 副面被视为刚体, 仅考虑其位姿误差. 然而, 随着天线口径的增加, 副面尺寸也不断增加, 因此需要将其视为一个大反射面, 并考虑其变形误差. Rusch等人^[54]研究了双反射面天线中副面和主面误差对总容差损失的相对影响计算公式. Young等人^[55]采用无迹变换的数学统计方法, 研究了天线增益、交叉极化特性以及副瓣电平对副面位移的灵敏度. Zang等人^[56]研究了副面轴向位移对全向双反射天线性能的影响. Xiang等人^[57]研究了副反射面位移对赛德尔波前像差的影响. Sun等人^[58]建立了天马65 m射电望远镜视仰角的副反射面模型, 分析了副面运动对

天线指向的影响.

2.3 反射面天线馈源误差

馈源误差可进一步分为馈源的位置误差和指向误差.

馈源位置误差是指馈源相位中心位置的移动. Cogdell等人^[59]研究了由馈源位置偏差引起的像散对反射面天线电性能的影响. Imbriale等人^[60]采用矢量电流法和标量孔径理论, 研究了馈源侧向位移对天线电性能的影响. Fiebig等人^[61]研究了发生馈源横向位移的轴对称反射面天线中出现的波束偏斜效应. 许金钢等人^[62]从纵偏、横偏、斜偏三个角度分析了馈源位置偏差对天线电性能的影响. Zhang等人^[63]研究了不同反射面夹角值和馈电位移对抛物面反射面天线的综合影响.

馈源指向误差可理解为馈源相位中心不变, 但馈源的方向图整体发生偏转. 馈源指向发生变化后口径面幅值分布发生改变, 从而导致反射面天线电性能的恶化. 王从思等人^[64]应用口径场法, 考虑了反射面表面误差和馈源位置误差、馈源指向误差等结构因素, 建立了偏置反射面天线的机电耦合模型, 并通过对2.6 m星载偏置反射面天线进行机电耦合分析, 将分析结果与电磁仿真软件计算结果进行对比, 验证了该模型的有效性.

2.4 其他结构误差

除了主、副反射面以及馈源结构会给反射面天线带来误差之外, 天线结构中本不希望参与电磁辐射的其他结构也会对天线电性能造成负面影响. 例如, 在双反射面天线中, 副面撑腿对主面会产生遮挡效应, 其主要包括两种典型情况: (1) 对电磁波由主面向远场传输过程中的遮挡, 该部分为平面波遮挡; (2) 对电磁波由副面向主面传输过程中的遮挡, 该部分为球面波遮挡. 电磁波经副面撑腿遮挡后传播方向发生改变, 最终对天线电性能造成影响. 此外, Lee等人^[65]采用等效电流法研究来自馈源支柱的辐射场, 分析了馈源支柱对天线电性能的影响. 王仁德等人^[66]研究了馈源支柱散射对天线副瓣的影响, 并验证了在支柱上添加吸收材料可以抑制不良影响. Huang等人^[67]研究了馈源支柱对单反射面天线电性能的影响, 采用仿真分析的方法, 对比增加支柱前后的天线方向图, 以估计支柱

带来的影响.

2.5 机电耦合模型

以上针对各误差的研究多是单独进行的, 但这些误差的影响是相互耦合、相互作用的, 需要综合考虑其对天线电性能的影响. 因此, 需要一种能够综合分析以上各类误差的精确快速的分析模型, 即反射面天线机电耦合模型. 西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室团队对电子装备的机电耦合问题开展了深入研究, 取得了重大突破. 机电耦合模型建立了天线结构参数与电性能之间的关系, 具有重要的研究意义和工程实践价值.

Duan 等人^[68]基于机械-电磁场耦合模型 (MEFCM), 讨论了反射面变形引起的随机误差和系统误差的影响. 宋立伟等人^[69]针对反射面天线误差信息对电性能影响的问题, 提出了包含馈源相位中心和反射面表面的误差信息对反射面天线远场方向图影响的数学模型. 将主面误差、馈源误差对天线电性能的影响叠加到反射面天线理想方向图公式中, 可以获得反射面天线机电耦合模型. 结合主反射面误差、馈源位置误差以及馈源指向误差对天线远场方向图的影响, 建立了如下反射面天线机电耦合模型:

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

式中, $f_0(\xi - \Delta\xi(\delta(\beta)), \phi' - \Delta\phi'(\delta(\beta)))$ 为馈源指向误差对口径场幅度的影响项, $\varphi_f(\delta(\beta))$ 为馈源位置误差对口径场相位的影响项, $\varphi_r(\delta(\beta))$ 与 $\varphi_r(\gamma)$ 分别为反射面系统误差与反射面板随机误差对口径场相位的影响项.

3 反射面天线全工况机电耦合补偿

随着反射面天线向大口径、高频率方向发展, 重力、风荷和温度载荷等因素引起的反射面变形对电性能的影响更加显著. 仅仅在设计阶段进行合理设计已经无法解决这个问题, 因此需要应用一些补偿手段来提高天线的电性能, 常见的补偿方式见图2所示.

3.1 主动主面补偿技术

主动面调整补偿技术通过安装在主面板背部的促动器驱动面板进行位置调整, 以达到减小表面变形, 提高表面精度的目的. 其关键环节包括面形检测技术、面板调整量计算、面板分析设计、促动器分析设计、控制系统设计等方面^[74]. 目前, 国内外诸多大型反射面天线都应用了该技术.

3.1.1 国内外反射面天线主动主面调整技术

美国西弗吉尼亚州绿岸望远镜 (GBT)^[75-78] 的主反射面采用分块设计, 其面板呈现从一端到另一端辐射分布的状态, 通过2209个共享式促动器驱动. 该天线采用偏角全息测量技术获取各仰角状态下主面的变形情况, 并通过控制系统将补偿信息传递给促动器, 驱动面板主动调整, 完成变形补偿. 墨西哥大型毫米波天线 (LMT)^[79-82] 的主反射面采用组合面板设计, 沿径向分布有5种不同类型的面板, 每种面板都由更小的子面板组成, 单个子面板的精度可以达到15 μm . 该天线利用实时闭环控制系统主动控制分段主反射面, 根据有限元分析获取主面重力变形, 同时利用温度传感器和应力传感器测量由温度和准静态风引起的变形信息, 将其输入到有限元模型中, 通过查表法驱动促动器调整面板位置实现补偿. 国内也有较多应用主动面调整技术的大型反射面天线, 其中, 天马望远镜^[83-85] 是国内首例采用主动面调整技术的反射面天线. 在应用主动面调整技术之后, 其表面精度从530 μm 降低到300 μm , 使天线效率明显提高.

3.1.2 QTT主动面调整技术研究

目前正在建设的新疆奇台110 m口径射电望远镜 (QTT) 也采用了主动面调整技术^[86].

主面板分析设计是实现主动面调整的基础, 需包含面板形状、尺寸、精度以及分布形式等研究内容. Wang 等人^[74] 对 QTT 面板分析设计提出了建议, 认为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环节. 之后, 研究人员还进行了有关高精度面板成型、组合面板结构、面板模具共享、最低成本面板尺寸确定方法等内容研究^[87,88].

主动面调整系统中, 面形检测技术主要包括光学测量方法和射电全息方法两大类, 这些方法是获取理

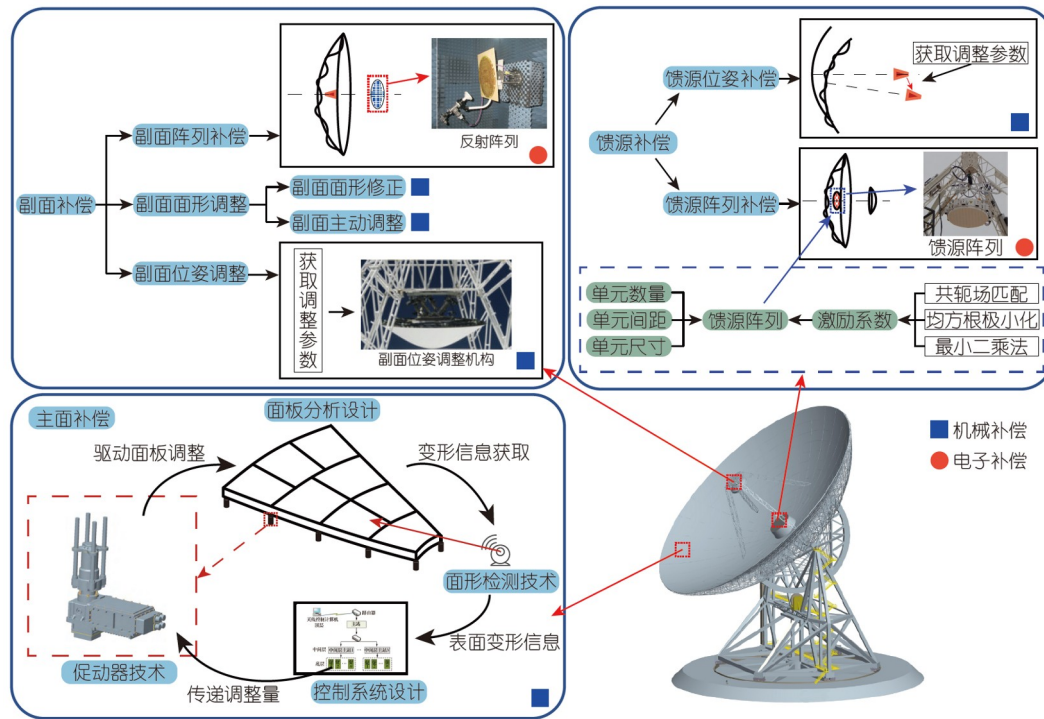


图 2 反射面天线补偿方法. 部分图片引用自参考文献[70-73]以及网络公开图片(<https://en.wikipedia.org/wiki/ASKAP>)

Figure 2 Reflector antenna compensation methods. Some images are adapted from refs. [70-73] and publicly available online images (<https://en.wikipedia.org/wiki/ASKAP>).

想主面与实际主面之间变形量的途径, 经纬仪、摄影测量、微波全息术等技术在射电望远镜领域都得到了广泛的应用. 研究人员针对QTT面形检测需求进行了大量研究. Liu等人^[89]研究了用于射电望远镜面形检测的两种相位恢复算法, 即Misell算法和离焦全息术(OOF), 通过对比, 发现Misell算法的优点在于单步迭代计算速度快、远场拟合精度更高且可以获得较高的表面分辨率, 而OOF算法的优点在于迭代次数较少且可以获得更好的口径场相位恢复精度. 许谦等人^[90]提出了利用激光跟踪仪从天线副面测量主面形面的方案. 该方案将激光跟踪仪安装在副面的背面, 激光探头可沿着副面背面的边沿导轨移动, 利用激光跟踪仪靶标自动搜索功能, 实现从副面测量主面形面且不会影响天线正常工作. Wang等人^[91]提出了一种基于边缘传感器计算QTT面板位置来实时估计天线面形的方法, 该方法通过建立面板坐标传递矩阵, 将边缘传感器的测量数据作为传递矩阵的输入, 实时计算出天线面板的实际位置.

关于面板调整量计算, Wang等人^[92]提出了一种考

虑增益和轴视的大型高频天线主动反射面调整方法, 以适应QTT的补偿需求. 该方法在大型天线结构设计中引入主动面, 并推导了一种直接计算面板位置校正的方法, 结合机电耦合模型, 该方法可以快速、高精度地计算电性能. Lian等人^[93]提出了一种基于面板调整矩阵的促动器调整值的计算方法, 并分析了考虑面板弹性变形引起的促动器调整误差对电磁性能的影响.

促动器是实现面型调整的关键机械装置. 促动器需要具备环境适应能力强、使用寿命长、快速响应和精准调整等特点, 并且需要朝向小型化和轻量化方向发展. 戚举鹏等人^[94]根据促动器的结构和传热学原理, 建立了促动器内气体的温湿度模型, 实现了促动器内气体温湿度的模拟计算. 项斌斌等人^[70]针对QTT的高精度位移促动器进行设计与测试研究, 提出了采用步进电机、角度传感器、滚珠丝杠加蜗轮蜗杆的位移促动器方案. 张鑫等人^[95]对极低电磁辐射要求下的促动器进行辐射源分析, 为降低主动面控制系统的电磁辐射奠定了基础. 李旻等人^[96]针对用于QTT的促动器进

行热误差补偿, 将促动器由于温度变化引起的精度变化量减小 $\pm 4\ \mu\text{m}$. 此外, 促动器的布局研究也十分重要^[97].

控制系统是连接面形检测环节与促动器调整环节的桥梁, 在获得面板调整量之后, 通过控制系统向促动器传递调整信息, 完成面形修正. Zhang等人^[98]基于一种新型的边缘传感器和位移执行器, 提出了一种新型的实时闭环主动表面系统, 其中, 光电边缘传感器用于检测相邻面板的角度变化, 位移执行器用于调整面板的位置和姿态, 以补偿角度的变化. 由这两部分组成的闭环面控系统能够实时主动地保持主反射面精度. Xiang等人^[71]结合QTT主动面初步设计需求, 分别设计了基于Ethernet Powerlink和EtherCAT两种工业以太网的分布式控制网络.

3.2 副面补偿

副面补偿技术包括副面位姿调整补偿、副面面形调整补偿以及副面反射阵列补偿, 前三者属于机械补偿的范畴, 副面反射阵列补偿则属于电子补偿的范畴.

3.2.1 副面位姿调整

副面位姿调整补偿是一种常用的副面补偿方法, GBT^[76], Effelsberg^[99], 天马^[100], 南山26 m射电望远镜(NSTR)^[72]等射电望远镜均采用了该方法. 副面的位姿调整主要通过多自由度调整装置来控制副面的位置与姿态, 该装置一端与副面连接, 一端与副面支柱连接, 调整之后, 副面与主面、馈源之间的匹配关系得到优化, 从而实现对天线电性能的补偿.

副面位姿调整的关键在于获取调整参数. Doyle^[101]研究了热扰动下射电望远镜天线性能预测及补偿方法, 利用主反射面、副反射面和馈源的热弹性响应建立天线的摄动光学模型, 在该模型的基础上确定了天线副面轴向位置的偏移量, 通过调整副面位置来补偿37 m口径射电望远镜的主面热变形和重力变形, 能够在较短时间内完成补偿工作. Wang等人^[83]研究了实时主反射面重力变形的补偿方法, 采用一组近似抛物面拟合变形曲面, 利用最优几何匹配对主反射面变形进行补偿, 得到合适的副反射面位置. 冷国俊等人^[102]采用最小二乘法对赋形反射面的母线进行分段抛物线拟合, 进而对变形曲面进行最佳吻合, 获得了主面吻合参数和副面调整参数. Xiang等人^[103]研究了

基于参数迭代技术的副面位置优化方法, 利用一种高效的数值迭代算法, 可以快速计算出副面位置的最优参数.

3.2.2 副面面形调整

副面面形调整补偿技术包含两个部分, 即副面主动面调整以及副面面形修正.

(1) 副面主动面调整

副面主动面调整与主面主动面调整类似, 也通过促动器驱动副面进行面形调整, 实现主动补偿. Von Hoerner等人^[104]最早提出了副面主动面调整技术, 通过控制副面背面的四个驱动器来控制副面形状, 实现了不同工况下的主面变形补偿. Lawson等人^[105]研究了使用驱动器驱动的分块式副反射面来补偿主面变形, 在卡塞格伦天线上使用31个促动器驱动48块面板组成的副反射面进行补偿工作, 使其表面误差降低到补偿前的33%. Antebi等人^[106]为了补偿Haystack天线主面的部分重力变形, 使用28个促动器控制2.8 m口径的副反射面形面, 其补偿效果较为显著.

(2) 副面面形修正

副面面形修正是采用修正后的副反射面来补偿主面变形, 常使用几何光学法(GO)和物理光学法(PO)进行修正副反射面的分析设计, 常见的组合有GO/GO, PO/PO以及GO/PO分析方法.

Galindo^[107]使用联立非线性常微分方程表示圆对称双反射面天线的GO成形方法. Von Hoerner^[108]开发了名为Derive的反射面设计程序, 该程序基于GO分析方法, 对任意给定形状的主面, 都能计算出相应的修正副面, 使路径长度误差为零, 实现了对主面变形的补偿. 基于GO的分析方法的主要限制在于反射面成形过程中并未考虑衍射效应的影响, 包括反射面表面和边缘的衍射、馈源和反射面之间的近场效应以及主面和副面之间的近场效应. Duan等人^[109]研究了基于PO的广义衍射合成技术, 可以用于设计反射面表面形状. Schlobohm等人^[110]针对偏置双反射面天线, 开发了基于PO/PO的直接优化方法. 然而, 基于PO的分析方法需要耗费大量的计算时间, 分析效率较低.

为了克服前两种技术的缺陷, Hoferer等人^[111]研究了GO/PO分析方法, 并结合Jacobi-Fourier全局展开方法设计修正副面, 在22, 34以及86 GHz下均有效补偿了主面变形. 该方法与PO/PO技术相比, 计算时间减少

了1-2个数量级,与GO/GO技术相比,计算时间增加不到两倍. Gonzalez-Valdes等人^[112]将迭代场矩阵法与PO法相结合来进行修正副面的设计. 该方法不包含任何优化过程,也不包含对辐射函数的重复求值,计算时间非常低,适用于大型天线. Ban等人^[113]将B样条曲面拟合及简化的GO/PO分析法相结合,对由96个面板组成主面的22 m口径卡塞格伦天线进行副面修正补偿,得到了理想的补偿效果. 该方法不包含复杂的迭代计算,而且具有很高的通用性,同样适用于其他类型的双反射面天线. 之后, Ban等人^[114]又提出了用于副面修正的光程差迭代补偿法(PEIC),其设计所需迭代步数少、时间少,满足快速设计出修正副面的要求.

3.2.3 副面反射阵列补偿技术

副面反射阵列补偿中常采用微带反射阵天线,该天线具有低剖面的特点,结合了反射面天线和阵列天线的双重优点^[73]. 它不仅可以单独作为高增益天线使用,还可以代替双反射面天线中的副反射面,以此来实现对主面变形的补偿.

关于副面反射阵列补偿技术, Rahmat-Samii团队进行了深入研究. Xu等人^[115,116]最早提出了这项技术概念,使用反射阵代替副反射面,并通过适当调整反射阵的相位,以补偿主反射面变形引起的相位误差,从而提高天线的性能. 同年, Rajagopalan等人^[117]研究了利用波前校正副反射面进行变形补偿的方法,该副反射面由反射阵列组成,并通过微机电系统(MEMS)控制反射阵列的相位反射特性. Jamnejad等人^[118]研究了基于副反射面场最小探测的补偿方法,同样使用反射阵代替副反射面,通过获取副反射面上有限个点的相位变化用以恢复整个相位误差范围,然后通过改变副面上所有单元的相位来补偿主反射面误差. 此外, Rajagopalan等人^[119]还研究了副反射面阵列补偿技术对ku波段对称双反射天线电性能的补偿效果,并完成了对该项技术的实验验证.

3.3 馈源补偿

馈源补偿方法主要分为馈源的位姿补偿和阵列馈源补偿.

3.3.1 馈源位姿补偿

馈源位姿补偿指的是将馈源的相位中心调整到与

变形主面最佳拟合抛物面的焦点一致的位置. Godwin等人^[120]提出了一种根据微波全息测量获得的辐射场相位、振幅信息来获取补偿后的馈源位置的方法. 宋立伟等人^[121]提出了寻找天线馈源最佳相位中心的优化模型,该模型基于变形反射面天线馈源相位中心与远场方向图的函数关系式,可以得到天线反射面存在任意表面误差时的馈源最佳相位中心,使天线的增益损失最小化. Lian等人^[122]针对传统的抛物面最佳拟合法需要事先获得反射面变形的精确值这一问题,提出了一种无需已知反射面变形的基于远场的馈源调整量确定方法. 该方法基于孔径场法,建立了远场对变形反射面拟合参数的灵敏度的显式表达式,然后将拟合参数与远场的超定线性方程联系起来,通过对远场的测量,基于最小二乘法近似计算出反射镜的变形,从而为变形后的反射面的馈源调整提供指导.

3.3.2 馈源阵列补偿

阵列馈源可以通过调整馈电单元的幅度和相位来实现对主面变形的补偿作用^[123]. 该方法的原理是在焦平面放置阵列馈源,通过增大馈源接收范围来接收焦平面上的弥散能量,并通过调整馈电单元的激励系数,即幅度和相位,以实现补偿电性能的效果. 实现馈源阵列补偿需要确定馈源单元的位置、尺寸大小以及激励系数,对于馈源几何尺寸的确定, Cherrette等人^[124]给出了馈源几何形状与反射面变形之间的近似关系,并认为单元间距与反射镜的焦距和直径有关. 馈源阵列设计的关键是激励系数的确定. 以下是常见的确定馈源激励系数的方法.

(1) 共轭场匹配技术

共轭场匹配技术是研究最为广泛的方法之一,其优势在于无需获取变形反射面的变形情况. 共轭场匹配技术包括直接共轭匹配和间接共轭匹配.

直接共轭匹配法应用于天线接收模式,需要通过用平面波照射反射面并采用物理光学法获取焦平面场,再利用共轭场匹配技术,通过焦平面场的复数共轭得到阵列馈源激励. Loux等人^[125]利用横向焦平面阵列技术对卡塞格伦天线进行了像差校正,将测量出的焦平面场的共轭场用于阵列馈源上,实现了对馈源的相位和幅值的调整,可以显著降低反射面变形引起的像差. Acosta^[126]使用单片微波集成电路(MMIC)阵列为馈电阵列中的每个辐射元件提供独立的振幅和相位控

制, 借助直接共轭场匹配技术获得了保持辐射性能所需的馈源激励系数. 所需的口径场分布可以被认为是从规定的观测方向入射到反射面的加权平面波. 利用这一概念, 可以从反射面上的反射场和衍射场计算出焦平面场.

间接共轭匹配法应用于天线发射模式, 该方法假设可以通过互易定理从远场方向图估算出焦平面场, 在此基础上, 计算每个馈电单元在固定方向上的远场, 利用计算出的远场的共轭值来确定阵列馈源的激励系数. Mrstik等人^[127]利用间接共轭匹配法研究了相控阵馈源的大型抛物柱面天线的扫描能力. Cherrette等人^[124]研究了减小反射面表面大尺度误差的馈源阵列设计方法, 包括馈源阵列单元的形状尺寸、间距以及发射模式下馈源激励系数的确定. Acosta等人^[128]对比了直接共轭匹配和间接共轭匹配的补偿效果以及实现速度, 间接共轭匹配能够获得最佳指向性, 但其副瓣电平比直接共轭匹配高3–5 dB, 在计算速度方面, 直接共轭匹配所需时间仅为间接共轭匹配的1/3. Rahmat-Samii^[129]对共轭匹配技术进行了推广, 开发了通用计算机程序, 用于自动计算所需馈电单元的复激励系数, 生成补偿后的远场图, 其增益和副瓣都能够得到补偿. Bahadori等人^[130]研究了利用平面阵馈电来校正球面相位像差的实用方法, 提出了两种基于相位共轭匹配的阵列激励系数确定方法, 并对结果进行了比较. 利用补偿馈电阵列对球面反射器在无扫描和大扫描情况下的辐射特性进行了仿真, 并与未补偿情况进行了比较, 结果表明补偿后的球面反射器性能有所提高.

(2) 最小二乘法

Bailey等人^[131]进行了使用约束最小二乘法(CLS)来确定馈源激励系数的研究. Bailey等人用阵列馈源中各单元孔径场分布的叠加来近似表示反射面天线的理想口径场分布, 并使用最小二乘法将两者之差最小化, 从而得到了最佳的馈源激励系数. 使用7, 19, 37个单元的馈源阵列对15 m网状天线进行补偿实验, 实验结果表明其补偿效果显著. 然而, Bailey等人发现随着

馈源阵列单元数量的增加, 会出现天线增益下降的现象, 这是由于馈源阵列的副瓣电平增加, 其辐射溢出反射面所导致的. 为此, Smith等人^[132]提出了约束最小二乘法, 给最小化程序施加了约束程序, 使溢出损失保持在合理的范围内. 此外, Smith等人^[133]还利用神经网络算法实现CLS电磁补偿算法, 缓解了CLS的计算压力, 以便对天线进行实时补偿.

(3) 均方根极小化法

Amitay等人^[134]研究了平面阵列馈源对球面反射器像差的补偿, 并提出了一种计算馈源激励的综合方法. 该方法以最小化理想远场方向图与实际远场方向图之间的均方根误差为目标, 建立积分函数, 从而求得所需的馈源激励系数.

除了以上方法之外, Rudge等人^[135]采用空间傅里叶变换装置控制阵列的相位来实现补偿. 他们的补偿方法需要对馈源阵列接收到的信号进行第二次空间傅里叶变换. 对于二维问题来说, 巴特勒矩阵的建立过于昂贵且困难, 因此该补偿方法的实现被限制在一维抛物柱面反射器, 为此, 需要寻找其他替代方法进行傅里叶变换.

4 总结

大口径反射面天线具有高增益、高方向性、高带宽等优点, 是射电天文等领域的关键设备. 在大口径、高频段的发展趋势下, 天线设计制造的难度不断增加, 制造安装误差以及环境载荷等因素引起的电性能下降更加明显, 对服役工况适应性需求也进一步提高, 机电耦合设计理论以及天线电性能补偿技术的产生与发展, 为上述问题提供了可靠的解决方案. 本文围绕反射面天线机电耦合建模研究与补偿技术的发展现状, 归纳了天线主要结构部件的误差对天线电性能的影响, 总结了主动面调整技术、馈源阵列技术等常用补偿方法, 为相关领域的研究人员提出创新性的研究思路与方法提供了有益参考.

参考文献

- 1 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]
- 2 Ruze J. Antenna tolerance theory: A review. *Proc IEEE*, 1966, 54: 633–640

- 3 Kaufmann P, Schaal R, Raffaelli J. The effect of slowly varying surface errors in large millimeter wave antennas: A practical verification in the Itapetinga 45-ft reflector. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1978, 26: 854–857
- 4 Tripp V. A new approach to random aperture errors. In: 1981 Antennas and Propagation Society International Symposium. Los Angeles: IEEE, 1981. 140–143
- 5 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
- 6 Greve A, Hooghoudt B G. Quality evaluation of radio reflector surfaces. *Astron Astrophys*, 1981, 93: 76–78
- 7 Wu S C, Rahmat-Samii Y. Beam efficiency of large reflector antennas subject to correlated random surface errors. In: International Symposium on Antennas and Propagation Society, Merging Technologies for the 90's. Dallas: IEEE, 1990. 144–147
- 8 Ling H, Lo Y, Rahmat-Samii Y. Reflector sidelobe degradation due to random surface errors. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1986, 34: 164–172
- 9 Kim J-W, Kim B S, Nam S, et al. Computation of the average power pattern of a reflector antenna with random surface errors and misalignment errors. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1996, 44: 996–999
- 10 Sinton S, Rahmat-Samii Y. Random surface error effects on offset cylindrical reflector antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2003, 51: 1331–1337
- 11 Liu S, Jiao Y, Zhang F. Effect of random surface errors on radiation characteristics of the side-fed offset Cassegrain antenna. *Front Electr Electron Eng China*, 2006, 1: 345–349
- 12 Wang W, Wang C, Li P, et al. Panel adjustment error of large reflector antennas considering electromechanical coupling. In: 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Xi'an: IEEE, 2008. 775–779
- 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 Zhang S, Duan B, Zhang X. Second-order expansion computation of average power pattern of cylindrical reflector antennas with random surface errors. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2018, 66: 4332–4336
- 15 Zhang S, Duan B. Random error characterization of nonsmooth parabolic reflector antennas with gore-faceted or discontinuous surface. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2021, 69: 1922–1930
- 16 Lian P Y, Wang C S, Wang W. Effects of random errors in different rings on reflector's gain and sidelobe levels. In: Fifth Asia International Symposium on Mechatronics (AISM 2015). Guilin: IET, 2015. 1–5
- 17 Lian P, Duan B, Wang W, et al. Effects of nonuniform surface errors along the radius on reflector's radiation characteristic and its quality evaluation. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2015, 63: 2312–2316
- 18 Rocca P, Manica L, Massa A. Interval-based analysis of pattern distortions in reflector antennas with bump-like surface deformations. *IET Microwaves Antennas Propag*, 2014, 8: 1277–1285
- 19 Song L W, Ma H B, Baum T, et al. Performance analysis of distorted reflector antennas basing on interval method. In: 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Nanjing: IEEE, 2015. 1–3
- 20 Anselmi N, Salucci M, Rocca P, et al. Generalised interval-based analysis tool for pattern distortions in reflector antennas with bump-like surface deformations. *IET Microwaves Antennas Propag*, 2016, 10: 909–916
- 21 Anselmi N, Rocca P, Massa A. A Minkowski-based interval analysis tool for pattern distortions in reflector antennas with localized surface deformations. In: 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Davos: IEEE, 2016. 1–4
- 22 Li N, Duan B, Zheng F. Effect of the random error on the radiation characteristic of the reflector antenna based on two-dimensional fractal. *Int J Antennas Propag*, 2012, 2012: 1–6
- 23 Jo S J, Lee J Y, Yoon S S, et al. Panel misalignment effects on the radiation pattern from a solid surface deployable antenna. *J Electromagn Eng Sci*, 2019, 19: 253–258
- 24 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
- 25 Yang Z. Effects of thermal deformation on the far-field pattern of reflector antenna (in Chinese). *Electro-Mech Eng*, 2015, 31: 19–22 [杨仲. 反射面天线热变形对其方向图的影响. *电子机械工程*, 2015, 31: 19–22]
- 26 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
- 27 Pavlovic M S, Milosevic T S, Kolundzija B M. Full wave analysis of periodic and random surface distortions on reflector antennas. *Am J Obstet Gynecol*, 2011, 185: 956–959
- 28 Ning L, Lei Z, Liu Y H, et al. Analysis of solar thermal deformation of large aperture radio telescope panels (in Chinese). *Technol Market*, 2022, 29: 78–80 [宁亮, 雷震, 刘宇华, 等. 大口径射电望远镜面板日照热变形分析. *技术与市场*, 2022, 29: 78–80]
- 29 Rusch W, Wanselow R. Boresight-gain loss and gore-related sidelobes of an umbrella reflector. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1982, 30: 153–157
- 30 Rahmat-Samii Y. Effects of deterministic surface distortions on reflector antenna performance. *Ann Télécommun*, 1985, 40: 350–360
- 31 Dong T, Xu X, Xiao J. Analysis of the radiation characteristics of the reflector antenna with surface distortion and holes using PTD. In: 6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Beijing: IEEE, 2003. 145–148
- 32 Haddadi A, Ghorbani A. Distorted reflector antennas: Analysis of radiation pattern and polarization performance. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2016, 64: 4159–4167
- 33 Song W W, Zhang X M, Yuan F C. Radiation pattern simulation of the offset reflector antennas with local protuberant distortion (in Chinese). *Mod Electron Technol*, 2008, 32: 1–3 [宋微微, 张小苗, 袁方成. 具有局部凸起形变反射面天线的方向图仿真. *现代电子技术*, 2008, 32: 1–3]
- 34 Yang Y, Tan L, Ma J, et al. Effects of localized deformation induced by reflector antenna on received power. *Opt Commun*, 2009, 282: 396–400
- 35 Li P, Duan B Y, Wang W, et al. Electromechanical coupling analysis of ground reflector antennas under solar radiation. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2012, 54: 40–57
- 36 Li P, Zheng F, Li N. Effects of surface texture on far field patterns of reflector antennas (in Chinese). *J Electron Inform Technol*, 2009, 31: 2278–2282 [李鹏, 郑飞, 李娜. 表面纹理对反射面天线电性能的影响. *电子与信息学报*, 2009, 31: 2278–2282]
- 37 Bashir S O. Effects of moist dust/sand accretion on parabolic reflector antennas. In: Tenth International Conference on Antennas and Propagation (Conf. Publ. No. 436). Edinburgh: IET, 1997. 51–54
- 38 Nechitaylo S, Sukharevsky O, Khlopov G, et al. Method of pattern calculation for reflector antenna with surface partly covered by snow. In: 2012 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Kharkiv: IEEE, 2012. 308–311
- 39 Sukharevsky O I, Nechitaylo S V, Voitovych O A, et al. The influence of asymmetric water layer on the radiation characteristics of reflector antenna. In: 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kharkiv: IEEE, 2015. 1–3
- 40 Liu Y, Yuan J M, Zhang Q M, et al. Numerical simulations of the radiation characteristics of reflector antenna under shock wave loading (in Chinese). *Trans Beijing Inst Technol*, 2009, 29: 763–766 [刘彦, 袁俊明, 张庆明, 等. 冲击波作用下反射面天线辐射特性数值模拟研究. *北京理工大学学报*, 2009, 29: 763–766]
- 41 Yuan J M, Zhang Q M, Liu Y. Simulation and calculation of influence of fragment damage to performance of antenna with paraboloid (in Chinese). *J Proj Rocket Missiles Guid*, 2009, 29: 129–132 [袁俊明, 张庆明, 刘彦. 破片穿孔毁伤对圆抛物面天线电性能影响的仿真计算. *弹箭与制导学报*, 2009, 29: 129–132]
- 42 Ye S H. *Antenna Structure Design* (in Chinese). Xi'an: Northwest Telecommunications Engineering Institute Press, 1986 [叶尚辉. *天线结构设计*. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986]
- 43 Hua M L. A best-fit method for deformed surface of antennas (in Chinese). *Mod Radar*, 1994, 16: 75–82 [华慕麟. 天线变形曲面的一种拟合方法. *现代雷达*, 1994, 16: 75–82]
- 44 Keith A R, Prata A. Interpolation of reflector surfaces using deformed plate theory. In: IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1995 Digest. Newport Beach: IEEE, 1995. 885–888
- 45 Wang C S, Duan B Y, Qiu Y Y. A novel method for fitting the distorted reflector of a large antenna (in Chinese). *J Xidian Univ*, 2005, 6: 839–843 [王从思, 段宝岩, 仇原鹰. 大型天线变形反射面的新拟合方法. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 6: 839–843]
- 46 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]
- 47 Ban Y, Duan B, Wang C, et al. Homology parameters for large axisymmetric shaped dual-reflector antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2017, 65: 3392–3398
- 48 Lei Z. Radiation pattern analysis of reflector antennas using cad model-based physical optics method. *IEEE Access*, 2019, 7: 162598–162604

- 49 Smith W T, Bastian R J. An approximation of the radiation integral for distorted reflector antennas using surface-error decomposition. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1997, 45: 5–10
- 50 Zhang S, Duan B, Yang G, et al. An approximation of pattern analysis for distorted reflector antennas using structural-electromagnetic coupling model. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2013, 61: 4844–4847
- 51 Zhang S, Yang G, Zhang Y. An approximation mathematical formula of pattern analysis for distorted reflector antennas considering surface normal vector variation. *Int J Antennas Propagat*, 2016, 2016: 1–6
- 52 Lian P, Duan B, Wang W, et al. A pattern approximation method for distorted reflector antennas using piecewise linear fitting of the exponential error term. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2015, 63: 4546–4551
- 53 Zhang S, Duan B, Huang J, et al. Fast pattern calculation of rib reflectors with varying surface distortions. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2018, 66: 1198–1207
- 54 Rusch W, Wohlleben R. Surface tolerance loss for dual-reflector antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1982, 30: 784–785
- 55 Young T, Villiers D. Assessment of the sensitivity of the South African KAT-7 and MeerKAT/SKA radio telescope reflector antennas. In: 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Cape Town: IEEE, 2012. 486–489
- 56 Zang S R, Bergmann J R. Omnidirectional dual-reflector antennas for flexible coverage. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2013, 12: 821–824
- 57 Xiang B, Lian P, Wang W, et al. Effect of subreflector displacement induced aberrations for dual-reflector antenna. In: 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). Taiyuan: IEEE, 2019. 1–3
- 58 Sun Z X, Wang J Q, Chen L. Subreflector model depending on elevation for the Tianma 65 m Radio Telescope. *Res Astron Astrophys*, 2016, 16: 002
- 59 Cogdell J, Davis J. Astigmatism in reflector antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1973, 21: 565–567
- 60 Imbriale W, Ingerson P, Wong W. Large lateral feed displacements in a parabolic reflector. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1974, 22: 742–745
- 61 Fiebig D, Wohlleben R, Prata A, et al. Beam squint in axially symmetric reflector antennas with laterally displaced feeds. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1991, 39: 774–779
- 62 Xu J G, Cui B, Liu X N, et al. Analyse mechanical errors to affect characteristics of paraboloid reflector in the simulation (in Chinese). *J Proj Rocket Missiles Guid*, 2005, 25: 985–988 [许金钢, 崔彬, 刘晓宁, 等. 机械误差对仿真中抛物面反射器特性的影响. 弹箭与制导学报, 2005, 25: 985–988]
- 63 Zhang Y, Liu H, Liu X. Influences of the reflector subtended angle on the performance of parabolic antennas with feed displacement. *Electronics*, 2022, 11: 2635
- 64 Wang C S, Li Z, Kang M K, et al. Electromechanical coupling modeling and analysis of offset reflector antenna (in Chinese). *Syst Eng Electron*, 2014, 36: 214–219 [王从思, 李兆, 康明魁, 等. 偏置反射面天线的机电耦合建模与分析. 系统工程与电子技术, 2014, 36: 214–219]
- 65 Lee S H, Rudduck R C, Burnside W D, et al. Feed strut scattering analysis for wide angle sidelobes. In: 1979 Antennas and Propagation Society International Symposium. Seattle: IEEE, 1979. 63–66
- 66 Wang R D, He B F. Influence of antenna feed support pole scattering on sidelobe in next-generation weather radar (in Chinese). In: 7th Academic Annual Conference of the Chinese Institute of Electronics. Beijing: Posts & Telecom Press, 2001. 681–684 [王仁德, 何炳发. 新一代天气雷达天线馈源撑杆散射对副瓣的影响. 见: 中国电子学会第七届学术年会. 北京: 人民邮电出版社, 2001. 681–684]
- 67 Huang N T, Mittra R, Hay S. Numerical study of the effect of the struts in a reflector antenna system by using the parallelized FDTD-based solver GEMS. In: 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Toronto: IEEE, 2010. 1–4
- 68 Duan B Y, Wang C S. Reflector antenna distortion analysis using MEFCM. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2009, 57: 3409–3413
- 69 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 Electron*, 2009, 6: 1269–1274 [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: 1269–1274]
- 70 Xiang B B, Peng H B, Wang N, et al. Design and test of a precision positioning actuator for QTT (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 099505 [项斌斌, 彭海波, 王娜, 等. QTT高精度位移促动器设计与测试. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 099505]
- 71 Xiang B B, Xue F, Liu X, et al. Preliminary design of QTT active surface system control network (in Chinese). *Electro-Mech Eng*, 2018, 34: 51–54 [项斌斌, 薛飞, 刘璇, 等. QTT主动面系统控制网络初步设计. 电子机械工程, 2018, 34: 51–54]
- 72 Guljaina K, Xiang B B, Wang N, et al. Error analysis of a subreflector adjustment mechanism for NSTR (in Chinese). *Acta Aeron Astron Sin*, 2020, 41: 284–293 [古丽加依娜·哈再孜汗, 项斌斌, 王娜, 等. 26 m射电望远镜副面调整机构误差分析. 航空学报, 2020, 41: 284–293]

- 73 Rosado-Sanz J, Jarabo-Amores M P, Dauvignac J Y, et al. Design and validation of a reflectarray antenna with optimized beam for ground target monitoring with a DVB-S-based passive radar. *Sensors*, 2021, 21: 5263
- 74 Wang C S, Xiao L, Xiang B B. Development of active surface technology of large radio telescope antennas (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 19–34 [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: 19–34]
- 75 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
- 76 Prestage R M, Constantikes K T, Hunter T R, et al. The Green Bank Telescope. *Proc IEEE*, 2009, 97: 1382–1390
- 77 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
- 78 Srikanth S, Norrod R, King L, et al. An overview of the Green Bank Telescope. In: IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1999 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting. Orlando: IEEE, 2002. 1548–1551
- 79 Baars J, Karcher H J. Design features of the Large Millimeter Telescope (LMT) In: IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1999 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting. Orlando: IEEE, 1999. 1544–1547
- 80 Irvine W M, Carrasco E, Aretxaga I. The Large Millimeter Telescope: Neighbors Explore the Cosmos. Amherst: University of Massachusetts, 2005
- 81 Alvarez M L, Torres C T, Rios E H, et al. Metrology and surface adjustment of primary reflector panels on the LMT. In: SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation. Montréal: SPIE, 2014. 1272–1285
- 82 Souccar K, Wallace G, Grosslein R, et al. The architecture of the active surface control system of the large millimeter telescope. In: SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation. Montréal: SPIE, 2014. 874–879
- 83 Wang W, Wang C, Duan B, et al. Compensation for gravity deformation via subreflector motion of 65 m shaped Cassegrain antenna. *IET Microwaves Antennas Propag*, 2013, 8: 158–164
- 84 Shen Z Q. Shanghai 65m radio telescope. In: 2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul: IEEE, 2011. 1
- 85 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]
- 86 Wang N, Xu Q, Ma J, et al. The Qitai radio telescope. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 289512
- 87 Wang C S, Feng S F, Duan B Y, et al. Reflector antenna block panel size determination method facing minimum cost (in Chinese). CN106096209-A. 2016-07-01 [王从思, 冯树飞, 段宝岩, 等. 一种面向最低成本的反射面天线分块面板尺寸确定方法. CN106096209-A. 2016-07-01]
- 88 Xu Q, Wen H X, Wang N, et al. Development challenges for the Xinjiang 110 m radio telescope (QTT) high accuracy panel structures (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 059502 [许谦, 温浩兴, 王娜, 等. 新疆110 m射电望远镜(QTT)天线高精度面板结构研制挑战. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059502]
- 89 Liu K, Qian Y, Xiang B, et al. Microwave holography measurement based on the active surface system of large reflector antenna. In: 2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Beijing: IEEE, 2016. 653–655
- 90 Xu Q, Lian P Y. Application of laser tracker to online adjustment of structural deformation for large dual-reflector antenna (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2022, 47: 396–404 [许谦, 连培园. 激光跟踪仪在大型双反射面天线形面在线调整中的应用. 武汉大学学报: 信息科学版, 2022, 47: 396–404]
- 91 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
- 92 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: 43
- 93 Lian P, Wang C, Xue S, et al. Panel adjustment and error analysis for a large active main reflector antenna by using the panel adjustment matrix. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2021, 69: 6351–6363
- 94 Qi J P, Jin H L, Ye Q. Waterproof strategy of actuator based on wet and thermal model (in Chinese). *Mechatronics*, 2016, 4: 27–33 [戚举鹏, 金惠良, 叶骞. 基于湿热模型的促动器防水策略. 机电一体化, 2016, 4: 27–33]
- 95 Zhang X, Xiang B B, Cheng L, et al. Analysis of the electromagnetic radiation of actuators applied to the active surface system of the radio telescope (in Chinese). *J Microw*, 2020, 36: 81–86 [张鑫, 项斌斌, 成龙, 等. 射电望远镜主动面促动器的电磁辐射分析. 微波学报, 2020, 36: 81–86]

81–86]

- 96 Li Y, Ye Q, Jing H L, et al. Thermal error compensation based on QTT actuator (in Chinese). *Astron Res Technol*, 2021, 18: 240–247 [李旸, 叶骞, 金惠良. 基于 QTT 促动器的热误差补偿. *天文研究与技术*, 2021, 18: 240–247]
- 97 Zhang S, Liu Z, Bao H, et al. Actuator layout design with gain-oriented modal selection for sectional offset reflector antennas. *Struct Multidisc Optim*, 2021, 64: 1909–1924
- 98 Zhang Y, Li G, Zhou G, et al. Real-time closed-loop active surface technology of a large radio telescope. *Publ Astron Soc Pac*, 2022, 134: 015003
- 99 Wielebinski R. The effelsberg 100-m radio telescope. *Naturwissenschaften*, 1971, 58: 109–116
- 100 Yang D H, Cheng Y, Wu C C, et al. A novel hexapod and its prototype for secondary mirror alignment in telescopes. *Res Astron Astrophys*, 2018, 18: 115–124
- 101 Doyle K B. Antenna performance predictions of a radio telescope subject to thermal perturbations. In: *SPIE Optical Engineering+Applications*. San Diego: SPIE, 2009. 1–9
- 102 Leng G J, Wang W, Duan B Y, et al. Subreflector real-time compensation for main reflector deformation of shaped Cassegrain antenna (in Chinese). *Syst Eng Electron*, 2011, 33: 996–1000 [冷国俊, 王伟, 段宝岩, 等. 赋形卡氏天线主面变形的副面实时补偿. *系统工程与电子技术*, 2011, 33: 996–1000]
- 103 Xiang B B, Wang C S, Lian P Y, et al. Optimal subreflector position determination of shaped dual-reflector antennas based on the parameters iteration approach. *Res Astron Astrophys*, 2019, 19: 062
- 104 Von Hoerner S, Wong W-Y. Improved efficiency with a mechanically deformable subreflector. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1979, 27: 720–723
- 105 Lawson P R, Yen J L. A piecewise deformable subreflector for compensation of Cassegrain main reflector errors. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1988, 36: 1343–1350
- 106 Antebi J, Zarghamee M S, Kan F W, et al. A deformable subreflector for the Haystack radio telescope. *IEEE Antennas Propag Mag*, 1992, 36: 19–28
- 107 Galindo V. Design of dual-reflector antennas with arbitrary phase and amplitude distributions. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1964, 12: 403–408
- 108 Von Hoerner S. The design of correcting secondary reflectors. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1976, 24: 336–340
- 109 Duan D-W, Rahmat-Samii Y. A generalized diffraction synthesis technique for high performance reflector antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1995, 43: 27–40
- 110 Schlobohm B, Arndt F, Kless J. Direct PO optimized dual-offset reflector antennas for small Earth stations and for millimeter wave atmospheric sensors. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 1992, 40: 1310–1317
- 111 Hoferer R A, Rahmat-Samii Y. Subreflector shaping for antenna distortion compensation: An efficient fourier-jacobi expansion with GO/PO analysis. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2002, 50: 1676–1687
- 112 Gonzalez-Valdes B, Martinez-Lorenzo J A, Rappaport C, et al. A new physical optics based approach to subreflector shaping for reflector antenna distortion compensation. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2013, 61: 467–472
- 113 Ban Y, Wang C S, Feng S F, et al. B-spline surface fitting and simplified GO/PO analysis of subreflector correction for large Cassegrain antenna distortion compensation. *Res Astron Astrophys*, 2018, 18: 079
- 114 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
- 115 Xu S, Rajagopalan H, Rahmat-Samii Y, et al. A novel reflector surface distortion compensating technique using a sub-reflectarray. In: 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Honolulu: IEEE, 2007. 5315–5318
- 116 Xu S, Rahmat-Samii Y. A compensated spherical reflector antenna using sub-reflectarrays. *Micro Opt Tech Lett*, 2009, 51: 577–582
- 117 Rajagopalan H, Rahmat-Samii Y, Imbriale W. Reconfigurable patch-slot reflectarray elements using RF MEMS switches: A subreflector wavefront controller. In: 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Honolulu: IEEE, 2007. 5203–5206
- 118 Jamnejad V, Imbriale W. On reflector surface compensation by minimal probing of subreflector field in dual reflector antennas. In: *The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007*. Edinburgh: IET, 2007. 1–5
- 119 Rajagopalan H, Xu S, Rahmat-Samii Y. Experimental demonstration of reflectarrays acting as conic section subreflectors in a dual reflector

- system. [IEEE Trans Antennas Propagat](#), 2013, 61: 5475–5484
- 120 Godwin M P, Anderson A P, Bennett J C. Optimisation of feed position and improved profile mapping of a reflector antenna from microwave holographic measurements. [Electron Lett](#), 1978, 14: 134–136
- 121 Song L W, Duan B Y, Zheng F. A study on the optimal feeds phase center for distorted reflector antennas (in Chinese). *Trans Beijing Inst Technol*, 2009, 10: 894–897 [宋立伟, 段宝岩, 郑飞. 变形反射面天线馈源最佳相位中心的研究. *北京理工大学学报*, 2009, 10: 894–897]
- 122 Lian P, Wang W, Hu N. Feed adjustment method of reflector antenna based on far field. [IET Microwaves Antennas Propag](#), 2014, 8: 701–707
- 123 Hay S G, Bird T S. *Applications of Phased Array Feeders in Reflector Antennas*. Singapore: Springer, 2016. 3139–3187
- 124 Cherrette A R, Acosta R J, Lam P T, et al. Compensation of reflector antenna surface distortion using an array feed. [IEEE Trans Antennas Propagat](#), 1989, 37: 966–978
- 125 Loux P, Martin R. Efficient aberration correction with a transverse focal plane array technique. In: 1958 IRE International Convention Record. New York: IEEE, 1964. 125–131
- 126 Acosta R J. *Active Feed Array Compensation for Reflector Antenna Surface Distortions*. Dissertation for Doctoral Degree. Akron: University of Akron, 1988
- 127 Mrstik A, Smith P. Scanning capabilities of large parabolic cylinder reflector antennas with phased-array feeds. [IEEE Trans Antennas Propagat](#), 1981, 29: 455–462
- 128 Acosta R J, Zaman A, Bobinsky E A, et al. Case study of active array feed compensation with sidelobe control for reflector surface distortion. In: 1988 IEEE AP-S International Symposium, Antennas and Propagation. Syracuse: IEEE, 1988. 863–866
- 129 Rahmat-Samii Y. A generalized reflector/array surface compensation algorithm for gain and sidelobe control. In: 1987 Antennas and Propagation Society International Symposium. Blacksburg: IEEE, 1988. 760–763
- 130 Bahadori K, Rahmat-Samii Y. An array-compensated spherical reflector antenna for a very large number of scanned beams. [IEEE Trans Antennas Propagat](#), 2005, 53: 3547–3555
- 131 Bailey M C, Cockrell C, Staton L. *Electronic Compensation for Reflector Surface Distortion to Improve Radiation Pattern Characteristics of Antennas*. Technical Report. National Aeronautics and Space Administration, 1989
- 132 Smith W T, Bailey M C. Quantization sensitivity of the constrained least squares compensation method. In: IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest. Chicago: IEEE, 1992. 32–35
- 133 Smith W T, Bastian R J. Electromagnetic surface error compensation for reflector antennas using neural network computing. In: Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Ann Arbor: IEEE, 1992. 750–753
- 134 Amitay N, Zucker H. Compensation of spherical reflector aberrations by planar array feeds. [IEEE Trans Antennas Propagat](#), 1972, 20: 49–56
- 135 Rudge A W, Davies D E N, Davies D E N. Electronically controllable primary feed for profile-error compensation of large parabolic reflectors. [Proc Inst Electr Eng UK](#), 1970, 117: 351–358

A review of full-path electromechanical coupling modeling and compensation for reflector antennas

WANG Wei^{1,2}, GU YuanBing^{1*}, WANG ZuiHua¹, WANG Na³ & GULJAINA Kazezkhan³

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

² Shaanxi Key Laboratory of Space Solar Power Station System, Xidian University, Xi'an 710071, China;

³ Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

*Corresponding author (email: guyuanbing1119@163.com)

Reflector antennas are extensively used in radio astronomy, satellite communication, and other industries; however, a complex interaction exists between their electrical performance and structure manufacturing process, installation errors, environmental loads, and other factors; thus, with the increase of antenna aperture and frequency band, the difficulty of antenna design and manufacturing increases. To address this technical issue, this paper focuses on the current state of reflector antenna electromechanical coupling theory modeling and compensation technology development and outlines the impact of errors on antenna electrical performance, such as main and subreflector deformation of the structure and feed source position offset from the angle of error classification. The paper also sorts out the full-path electrical performance compensation method of reflector antenna in service from active main and sub-surface technique, array feed technology, and other methods. A review of the current state of affairs aids in the development of theoretical methods and the creation of more complete antenna designs. It also allows for more accurate prediction of antenna service performance and more effective achievement of comprehensive compensation under full working conditions, ultimately assisting in achieving the performance index of the antenna.

reflector antenna, electromechanical coupling, full-path, error, compensation

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Ba, 87.80.Ek

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0218](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0218)