

## Views &amp; Comments

## 提升大口径反射面天线服役性能的未来研究趋势

连培园<sup>a</sup>, 王从思<sup>a</sup>, 薛松<sup>a</sup>, 王艳<sup>b</sup>, 严粤飞<sup>a</sup>, 许谦<sup>c</sup>, 段宝岩<sup>a</sup>, 王娜<sup>c</sup>, 段玉虎<sup>d</sup>, 伍洋<sup>e</sup><sup>a</sup> School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China<sup>b</sup> School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China<sup>c</sup> Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China<sup>d</sup> China Electronics Technology Group Corporation No. 39 Research Institute, Xi'an 710065, China<sup>e</sup> China Electronics Technology Group Corporation No. 54 Research Institute, Shijiazhuang 050081, China

深空测控网在卫星通信、载人航天、深空探测等人类空间活动中具有重要地位,而大口径反射面天线是深空测控网的重要组成[1]。该类天线的主要特点是口径极大,通常需要严格的表面精度以保障高增益和高指向精度等电性能要求[2-3]。根据反射面天线是否全向可动,可分为两大类:非全向可动天线和全向可动天线。中国贵州500 m口径球面射电望远镜是典型的非全向可动天线,反射面板只能在小角度范围内转动,该天线的口径超级大,主要用于低频观测。全向可动天线的反射面可以在方位和俯仰两个方向转动,根据天线口径和最高工作频率,将其划分为四种类型,如图1所示,其中,天线的详细信息可以参考文献[4],这里不再详细给出。第一类天线指传统的大口径反射面天线,因表面精度较低,只能工作在较低的工作频段。第二类天线指面板安装有促动器的大口径主动主反射面天线,可通过促动器来调整反射面的形面精度,其表面精度更高,因此,相对反射面不可调的第一类天线而言,其可工作的频段更高。例如,美国100 m绿岸射电望远镜(green bank telescope, GBT),该天线主反射面由2004块面板拼装而成,共计安装2209个促动器。第三类天线指口径较小、精度更高的亚毫米波天线,例如,阿塔卡玛大型毫米波天线阵(Atacama large millimeter array, ALMA)的组成单元——12 m口径天线,其表面精度高达0.01 mm。第四类天线指口径较大的亚毫米波天线,该类天线的口径大且精度要求高,导致天线结构对服役环境

非常敏感,图1给出了几个典型的已公开的大口径亚毫米波天线,该类天线目前均处于概念设计阶段[5]。

因大口径高精度反射面天线的结构对环境非常敏感,导致其高服役性能很难保障。天线台址通常位于戈壁或高山区域,除了自身重力之外,像风荷、温度、惯性、振动冲击等其他外部载荷是不可避免的,严重降低了天线的服役性能。工程中当天线温度梯度较大或者风荷较强时,天线仅在低频进行观测,故减小了天线高频观测任务的有效时长。因此,未来大口径高精度反射面天线相关研究应聚焦在天线服役性能提升方面,使天线在服役过程中具有更远的探测距离、更高的分辨率和稳健性,进而有效保障天线高频观测任务。基于相关研究现状,概况了九个提升天线服役性能的关键研究方向,如图2所示。

(1) **机电耦合**。环境因素通过影响天线结构部件来影响天线的电性能,天线结构和电性能之间具有相互影响和相互制约关系,因此,天线好的电性能的实现依赖于考虑环境因素作用下的多学科综合设计水平。文献[6]给出了天线结构与电磁之间的机电耦合模型,并开展了相应的机电耦合分析,未来需进一步探索天线服役环境与其结构和电磁之间的耦合关系,从而为考虑环境因素的多学科集成设计和服役性能提升提供理论支撑。

(2) **状态监测**。高精度大尺度转动部件是大口径反射面天线方位和俯仰精确驱动的关键,因天线的低速重载条件和恶劣服役环境,转动部件的表面磨损是不可避免的,

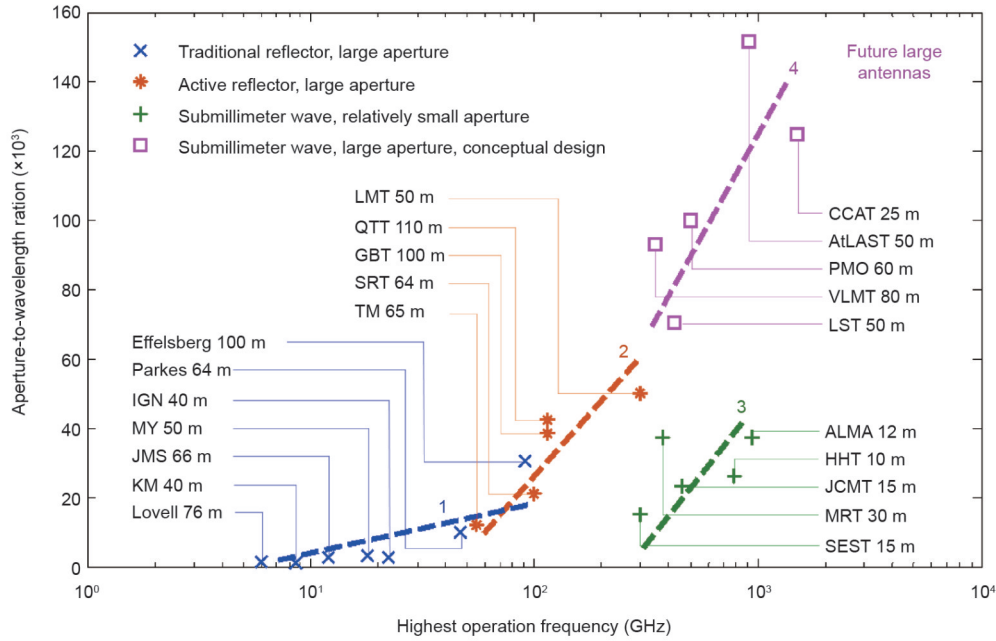


图1. 根据口径和最高工作频率划分的四类全向可动反射面天线。IGN: 西班牙国家地理研究所; MY: 密云; JMS: 佳木斯; KM: 昆明; LMT: 墨西哥大型毫米波望远镜; QTT: 奇台射电望远镜; SRT: 撒丁岛射电望远镜; TM: 天马; HHT: 赫兹望远镜; JCMT: 麦克斯韦望远镜; MRT: 西班牙毫米波射电望远镜; SEST: 瑞典ESO(欧洲南方天文台)亚毫米波望远镜; CCAT: 康奈尔-加州理工阿塔卡马望远镜; AtLAST: 阿塔卡马大口径亚毫米波望远镜; PMO: 紫金山天文台; VLMT: 甚大毫米波望远镜; LST: 大型亚毫米波望远镜。

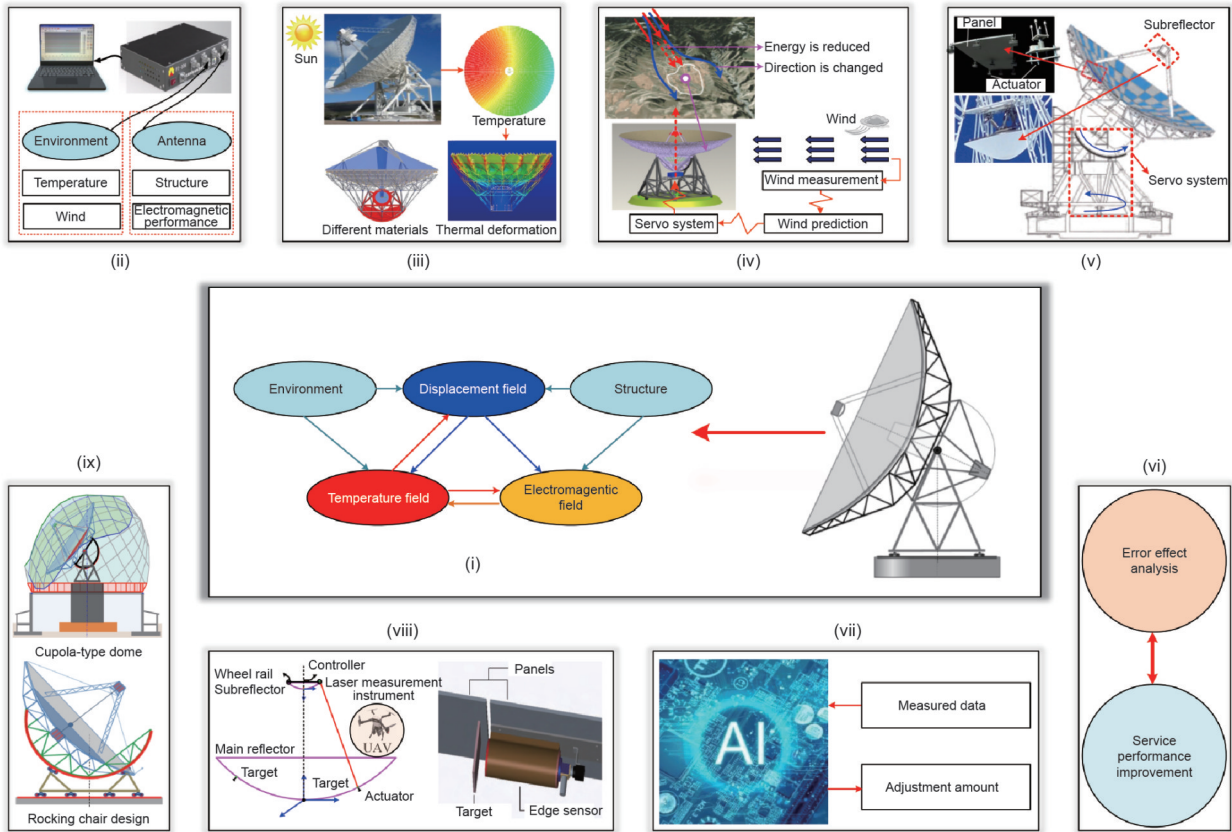


图2. 提升天线服役性能的关键研究方向。(i) 机电耦合; (ii) 状态监测; (iii) 热变形补偿; (iv) 风扰控制; (v) 多系统协同调控; (vi) 误差影响分析; (vii) 人工智能应用; (viii) 新的测量方案; (ix) 创新结构设计。UAV: 无人机; AI: 人工智能。

恶化了天线的转动精度，将引起天线的指向误差。同时，天线的服役性能依赖于结构抵御环境扰动的稳健性，天线环境和结构状态发生变化将导致天线服役性能的改变。因此，未来需要从以下两个方向开展研究：

- 研究天线转动系统磨损演变机理和动态载荷作用下轮轨接触问题，通过转动系统的状态监测实时分析其对天线性能的影响和开展转动部件寿命预测工作；

- 建立天线环境信息和结构状态的实时监测系统，为服役性能提升提供数据支撑。

**(3) 热变形补偿。**结构热梯度是影响天线服役性能的一个重要原因，因温度场的时变特性，实现热致电性能变化的实时补偿具有一定挑战性。目前，工程中利用隔热材料将天线包裹起来或者配置天线罩且内部安装热控设备，从而保障天线结构温度的均匀性，或者直接采用低热膨胀系数的碳纤维复合材料来制造天线以减小热变形[7]。然而，对于大口径天线而言其高昂的成本是不可接受的，因此，未来需要从以下两个方向开展研究：

- 研究低成本和轻量化的热控系统，同时探索仅关键部件采用低热膨胀系数复合材料时的热保型设计方法，研究不同热膨胀系数组合材料的结构设计问题[5,8]；

- 研究利用少量温度传感器实现天线温度场的快速重构，例如，可事先建立典型工况仿真温度场数据库，用少量实测数据修正相应仿真温度，近似得到真实温度场[9]。

**(4) 风扰控制。**风扰动是引起天线指向误差的重要环境因素，因风扰动的瞬态时变特性，导致经过一系列计算后通过伺服系统开展风扰控制时的风场信息早已改变，即实时性难以实现。工程中实现风扰动引起指向误差的实时补偿是极其困难的，建议未来从以下两个方向开展研究：

- 探索天线台址风场主动调控方法，可能的方法是根据天线台址地形建立风场仿真模型，根据风场分布特征人为布设并优化防风带或者风能设备，以减小风到达天线时的能量或者直接改变风的方向[10]；

- 研究天线伺服系统抗风扰控制策略，以达到风扰下稳定指向的目的，可能的方法是利用距离天线较远的关键位置的风场测量数据，通过构建天线远区到近区的风场预测模型，预测风场到达天线附近时的状态，从而为伺服系统调整量的计算和响应提供足够的时间[11]。

**(5) 多系统协同调控。**大口径反射面天线的调整子系统通常包含主动主反射面、副面六杆机构、伺服系统和相控阵馈源（仅指以相控阵天线作为馈源的反射面天线）。前三种调整子系统是通过调整反射面板、副面位姿、方位俯仰来改善天线的电性能，第四种相控阵馈源技术可有效扩大射电望远镜的视场，极大提高其巡天效率，通过调

整阵元激励的幅度和相位，可以有效减小结构变形对电性能的影响[12]。实际上，不同调整子系统对天线服役性能的影响是相互耦合的，未来应深入分析各个子系统独立运行时的调控能力，建立不同调整子系统之间的耦合模型，寻找一种最优的权重分配方案，以开展多系统协同调控。

**(6) 误差影响分析。**很多文献已经通过概率和区间等分析方法研究了天线结构误差对其电性能的影响[6-7,13]，但是很少有文献研究天线服役性能补偿过程中的误差对电性能调控效果的影响，如状态监测误差、温度重构误差、风场测量误差、有限元建模误差、调整子系统调控误差等，上述误差均会降低服役性能的补偿效果。随着相关补偿方法研究的深入，亟需开展服役性能补偿过程中各类误差对补偿效果的影响研究，以实现服役性能补偿的稳健性。

**(7) 人工智能应用。**在天线状态监测和性能补偿过程中将会积累大量多类型数据，如风场数据、温度数据、振动数据、应变数据、多系统调控数据等。如何引入人工智能方法，充分利用累积的大量历史数据，实现大口径反射面天线服役过程中的电性能自适应智能补偿，未来需要开展深入的研究。可能的应用有温度和风场的智能预测、副面位置和姿态的智能自适应调控、各调整子系统调整量的权重自适应分配等，为大口径反射面天线的智能化提供技术支撑。

**(8) 新的测量方案。**现有面形测量方法应用在反射面天线结构变形实时补偿方面仍存在一定不足，例如，激光测量和摄影测量方法，其测量过程复杂耗时，且需要人工参与，难以实现在线实时测量和补偿；例如，相位恢复全息测量方法，其测量过程中需要主动离焦或者主动面板变形，在天线执行任务过程中难以开展测量。工程中目前尚未完全实现复杂环境载荷作用下反射面变形的实时补偿，因此，有必要探索新的测量方案，满足服役性能补偿的实时性或者快速性要求。文献[14]和[15]研究了不同的测量方案，例如，将测量仪器放置于副反射面背面边沿位置来测量主反射面的变形，利用无人机实现主反射面变形的快速测量，利用安装在面板上的边沿传感器测量相邻面板之间的偏转角度等。

**(9) 创新结构设计。**开展天线创新结构设计，打破现有的传统设计框架，使得天线结构对环境扰动不敏感，是一项具有挑战性的工作，对于未来更大口径、更高精度、更高频段的反射面天线的发展至关重要。文献[5]公开报道了一些新的天线结构概念方案，通过设计穹顶罩子来减小风荷对天线的影 响，通过类似“摇椅”的结构设计来减小天线的重力变形，同时，可采用碳纤维背架结构并配置

闭环主动反射面系统和倾角传感系统等。

随着大口径反射面天线朝着更大口径、更高频率、更高增益、更高指向精度的方向发展,由于复杂环境因素对天线电性能的影响不可避免,导致天线服役性能的提升空间越来越小。因此,研究复杂环境下如何确保天线出色和稳健的服役性能,已成为该领域重要的研究方向,给该领域的研究人员带来了机遇和挑战。本文基于现有的研究,围绕提升天线服役性能目标,概况了九个关键的研究方向,希望读者能够借此在未来研究过程中激发新的研究思想。随着我国嫦娥工程、天问工程、射电天文观测等进一步实施,深空测控网将面临着更遥远的通信距离和更高的深空导航精度等新的挑战,对大口径天线的性能要求将会越来越高。因此,亟需开展上述九个方向的研究工作,为改善现有天线的服役性能和建造未来大口径高精度天线提供技术支撑,将有效提升我国深空测控网的通信能力。

## 致谢

我们感谢所有相关研究人员在大型反射天线方面的工作。本研究由国家自然科学基金项目(51805399, 51975447, 52005377)、陕西高校青年创新团队项目(201926)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(JB210404, JB210403)资助。

## References

- [1] Wu W, Li H, Li Z, Wang G, Tang Y. Status and prospect of China's deep space TT&C network. *Sci Sin Inform* 2020;50(1):87-108. Chinese.
- [2] Rahmat-Samii Y, Densmore A. A history of reflector antennas development: past, present and future. In: *Proceedings of 2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*; 2009 Nov 3-6; Belem, Brazil; 2009.
- [3] Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope. *Sci Sin Phys Mech Astron* 2014; 44(8):783-94. Chinese.
- [4] Baars JWM, Kärcher HJ. Radio telescope reflectors—historical development of design and construction. Cham: Springer; 2018.
- [5] Kärcher HJ, Baars JWM. Ideas for future large single dish radio telescopes. In: *Proceedings of SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*; 2014 Jun 24-27; Montreal, QC, Canada; 2014.
- [6] Duan B, Wang C. Reflector antenna distortion analysis using MEFCM. *IEEE Trans Antennas Propag* 2009;57(10):3409-13.
- [7] Greve A, Bremer M. Thermal design and thermal behaviour of radio telescopes and their enclosures. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2010.
- [8] Woody D, Padin S, Chauvin E, Clavel B, Cortes G, Kissil A, et al. CFRP truss for the CCAT 25 m diameter submillimeter-wave telescope. In: *Proceedings of SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*; 2010 Jun 27; San Diego, CA, USA; 2010.
- [9] Lian P, Wang C, Xu Q, Xiang B, Shi Y, Jia Y, et al. Real-time temperature estimation method for electromagnetic performance improvement of a large axisymmetric radio telescope under solar radiation. *IET Microw Antennas Propag* 2020;14(13):1635-42.
- [10] Wang C, Wang X, Xu Q, Wang N, Zheng Y, Du B, et al. Preliminary study of regulation technology of wind field distribution on QTT site based on test of equivalent wind field. *Sci Sin Phys Mech Astron* 2019;49(9):126-32. Chinese.
- [11] Zhang J, Huang J, Zhou J, Wang C, Zhu Y. A compensator for large antennas based on pointing error estimation under a wind load. *IEEE Trans Antennas Propag* 2017;25(5):1912-20.
- [12] Wang C, Li J, Zhu M, Wang W, Li H, Kang M, et al. Review of surface deformation compensation methods for large reflector antennas. *ElectroMech Eng* 2013;29(2): 5-10. Chinese.
- [13] Rocca P, Anselmi N, Massa A. Interval arithmetic for pattern tolerance analysis of parabolic reflectors. *IEEE Trans Antennas Propag* 2014, 62(10):4952-60.
- [14] Lian P, Wang C, Xue S, Xu Q, Shi Y, Jia Y, et al. Surface adjustment strategy for a large radio telescope with adjustable dual reflectors. *IET Microw Antennas Propag* 2019;13(15):2669-77.
- [15] Wang C, Lei T, Yan Y, Xu Q, Wang N, Zheng Y, et al. Real-time position calculation method for large-diameter radio telescope panel using angle sensor. *Sci Sin Phys Mech Astron* 2019;49(9):099506. Chinese.