

DOI: 10.3901/JME.2022.17.016

面向波束指向的高频段大口径天线服役性能调控技术*

薛松¹ 王从思¹ 连培园¹ 王艳² 许谦³ 王娜³ 赵武林⁴ 王志海⁵
葛东明⁶ 郑元鹏⁷ 唐宝富⁸ 冷国俊⁹ 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. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院 西安 710055;
3. 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011;
4. 中国电子科技集团第39研究所 西安 710065;
5. 中国电子科技集团第38研究所 合肥 230088;
6. 中国空间技术研究院北京飞行器总体设计部 北京 100081;
7. 中国电子科技集团第54研究所 石家庄 050081;
8. 中国电子科技集团第14研究所 南京 210039;
9. 中国电子科技集团第29研究所 成都 610036)

摘要: 大口径高性能天线的电性能对外界复杂服役环境的干扰更加敏感,除了要保障机、电、热各学科本身的设计与制造水平之外,实现各学科的交叉融合下的服役性能调控也尤为重要。为解决大口径天线服役性能在工程实际中难以保障的难题,分别从大口径天线复杂服役环境下机电热耦合建模、服役环境状态信息传感布局与实时重构、基于多系统协同调控的机械/幅相综合性能补偿方法三个方面入手,综合调控大口径天线服役性能。在研究上述关键技术的基础上,结合工程应用需求,研发了大口径高性能天线状态监测与性能综合调控系统,在反射面天线、相控阵天线等典型工程对象中得到成功应用。工程应用结果表明,所提出的高频段大口径天线服役性能调控技术能够有效提升复杂环境下大口径高性能天线服役性能与可靠性,保障了大口径天线“看得更远、看得更清、看得更准、看得更稳”。

关键词: 大口径天线; 机电热耦合; 形面重构; 综合调控; 性能保障

中图分类号: TN956

Performance Regulation Method of the Large Antenna in Service for Improving the Beam Pointing Accuracy

XUE Song¹ WANG Congsi¹ LIAN Peiyuan¹ WANG Yan² XU Qian³ WANG Na³
ZHAO Wulin⁴ WANG Zhihai⁵ GE Dongming⁶ ZHENG Yuanpeng⁷ TANG Baofu⁸
LENG Guojun⁹ DUAN Baoyan¹

- (1. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Xidian University, Xi'an 710071;
2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055;
3. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011;
4. CETC No.39 Research Institute, Xi'an 710065;
5. CETC No.38 Research Institute, Hefei 230088;
6. China Academy of Space Technology, Beijing 100081;

* 国家自然科学基金资助项目(52005377, 51805399)、国家重点研发计划项目(2021YFC2203600)和陕西高校青年创新团队(201926)资助项目。20210827收到初稿, 20220129收到修改稿

7. CETC No.54 Research Institute, Shijiazhuang 050081;
8. CETC No.14 Research Institute, Nanjing 210039;
9. CETC No.29 Research Institute, Chengdu 610036)

Abstract: With the aperture becomes larger and the working frequency becomes higher, the large antenna turns to be more sensitive to the structural deformation induced by the complex environmental loading. The unclear coupling relationship and mechanism among the electromagnetic field, the structural field and temperature distribution has significantly restricted the development of the high-performance large antenna. Apart from enhancing the design and manufacturing level, it is also important to regulate the antenna performance from the view of electro-mechanical coupling. Therefore, a performance regulation method based on the analysis of the large antenna electro-mechanical coupling, antenna structural sensing and reconstruction, and multi-system compensation method has been proposed to solve the current issue. A large antenna condition monitoring and regulation system has also been developed and applied in reflector antenna and phased array antenna to guarantee its performance. From the engineering application point of view, it is suggested the proposed method can successfully guarantee the detection performance and reliability of the large aperture antenna working in the complex environment.

Key words: large antenna; electro-mechanical coupling; structure reconstruction; regulation method; performance insurance

0 前言

大口径高性能天线是以机械结构为载体的机电装备,能够利用电磁波进行目标探测,主动完成对空间目标的捕获、瞄准与跟踪,被广泛应用于深空探测、载人航天、通信导航、雷达制导、射电天文等领域,产生了巨大的经济与社会效益^[1]。随着天线口径、工作频段、指向精度等指标的不断提高和朝着高集成度、轻量化、快响应的方向发展,天线性能对外部温度/风荷等复杂服役环境的干扰更加敏感,电磁与机械结构、环境载荷之间呈现出强耦合特征,其电性能的保障不仅依赖于机械结构的设计精度,更取决于其服役状态性能的调控。大口径天线属于典型的电子机械装备,其结构设计发展主要经历了机电分离、机电综合与机电耦合三个阶段^[2-3]。特别是 2010 年之后,随着电子装备朝着高频段、高增益,高精度、快响应方向发展,新一代电子装备机电之间呈现出强耦合的特征,例如已运行的“中国天眼”FAST500 m 口径射电望远镜、“探月工程”40 m 口径全可动天线、“火星探测”66 m 口径全可动天线、甚长基线(VLBI)测轨分系统 65 m 口径(上海)和 70 m 口径(天津)射电望远镜、以及建设中的 QTT110 m 口径全可动天线(新疆),其工作频段已从早期的 L、S 频段(1~4 GHz)发展到现在的 X 频段(8~12 GHz)、Ka 频段(27~40 GHz)、甚至 W 频段(80~100 GHz)以上。而根据传统的天线理论,天线反射面的形面精度(RMS)一般要求不超过工作波长的 $1/30$ ^[4]。以建设中的 QTT110 m 口径

射电望远镜为例,要达到 115 GHz 的观测频率,天线的形面精度(RMS)初期要达到 0.3 mm,长期稳定运行时要达到 0.2 mm^[5]。另一方面,电子装备的外部服役环境日趋恶劣,深空、深海、三极等极端环境导致装备的机电耦合更加紧密,这些环境会引起高精度电子装备结构的系统变形,从而降低电子装备工作性能,甚至引发电子装备失效^[6]。如在太空环境中,电子装备工作时的外部温差将达 ± 200 °C;南极环境中,电子装备要长期工作于接近 -100 °C的极低温环境中;临近空间(距地面 20~100 km)的温度也将会低至 -85 °C。在这些恶劣的服役环境中,巨大的温度变化会使电子装备内部功能材料的物性参数发生变化,严重影响装备性能;温度过高或过低都会使电子元器件无法正常工作或性能明显下降;温度变化还会引起结构的非线性变形从而导致电性能变化。因此,在复杂服役环境中,其结构参数与材料参数呈现出动态、难以预测的变化特征,对电性能影响显著,如图 1 所示。DU 等^[7]研究了脉动风压和风荷等对大口径阵列天线指向精度的影响规律。SONG 等^[8]采用激励电流的相位,以天线接收功率最大为目标,实现对天线相位误差的补偿。针对多因素下电性能的变化,西安电子科技大学段宝岩院士团队自 20 世纪 90 年代以来一直致力于研究天线结构位移场、温度场与电磁场之间的耦合影响关系^[9-12]。

大口径高性能天线的电性能对外界复杂环境干扰更加敏感,电磁与结构、热之间呈现出强耦合特征,除了要保障机、电、热各学科本身的设计与制造水平之外,实现各学科的交叉融合和复杂服役环

境下服役性能综合调控尤为重要,其面临的技术挑战主要体现在以下几个方面。

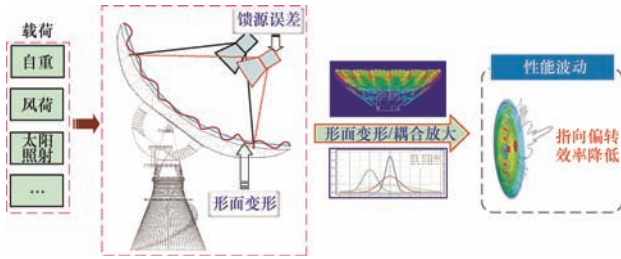


图1 环境载荷对大口径天线电性能的影响

(1) 机电热耦合特征明显,严重制约高性能天线的功能实现,天线结构参数、服役环境、位移场、温度场、电磁场之间相互影响相互制约,亟需厘清天线机电热耦合理论问题,建立完善的机电热耦合理论模型,为大口径高性能天线工程实现奠定理论基础。

(2) 复杂时变环境与结构动态形变的实时精准获取难度极大,阻碍了服役性能综合调控的实施,例如,时变的风/温度环境,亟需研究天线服役状态信息监测感知、环境风场调控、温度实时反演与变形高精度重构,为大口径高性能天线的服役性能综合调控提供数据支撑。

(3) 影响天线性能的因素众多且方式不同,缺乏一套有效的补偿理论,亟需研究通过调整机械形面与阵元激励幅相来实现结构变形、阵元偏转、阵元互耦、电源纹波、器件温漂等影响下天线性能在线补偿,为大口径高性能天线可靠服役提供技术支撑。

本文从大口径天线耦合因素分析与性能调控补偿角度出发,开展了机电热多场耦合建模、服役环境全状态信息传感布局与实时重构和调控、基于机械结构与馈电激励幅相的电性能综合补偿、服役状态监测与性能综合调控软硬件系统平台研制等工作,有效提升了复杂环境下大口径高性能天线服役性能与可靠性,保障了大口径天线“看得更远、看得更清、看得更准、看得更稳”。

1 复杂服役环境下机电热耦合建模

假设某 N 阵元大口径天线,所有阵元任意排列在 S 所包围的区域内(Oxy 平面),如图 2 所示。其中, $I_n \exp(j\varphi_n)\tau_n$ 为阵元上的馈电电流, I_n 为电流幅度, φ_n 为电流相位, τ_n 为第 n 号阵元在远区产生辐射场极化的单位矢量。通过移相器改变阵元馈电电流的相位,使阵列孔径形成新的等相面,改变波束的指

向。令 $f_n(\theta, \phi)$ 为第 n 号阵元在阵列天线中的辐射方向图,第 n 号阵元的位置矢量为 $\mathbf{r}_n = x_n \mathbf{i} + y_n \mathbf{j} + z_n \mathbf{k}$,波常数 $k = 2\pi / \lambda$,则在远场区域观察点 $P(\theta, \phi)$ 方向,大口径天线的场强方向图函数 $E(\theta, \phi)$ 为

$$E(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \Phi_n \cdot f_n(\theta, \phi) \cdot I_n \exp(j\varphi_n) \quad (1)$$

式中, $\Phi_n = \exp(jk\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{r}_0)$ 为第 n 号阵元的空间相位因子; \mathbf{r}_0 为远场区域观察点 $P(\theta, \phi)$ 方向的单位矢量; I_n 为馈电电流的幅度、 φ_n 为馈电电流的相位。

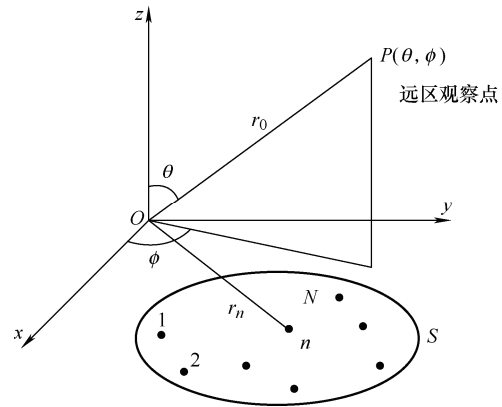


图2 大口径天线空间坐标关系

然而,现实工程中存在着温度场、电磁场等多种物理场,这些物理场之间存在相互影响的耦合作用,将多个学科的物理场或性能参数互相叠加的问题称为多场耦合问题。大口径天线作为雷达装备的“眼睛”,普遍存在着电磁场、结构位移场、温度场及服役环境之间的机电热多场耦合作用与影响(图 3)。

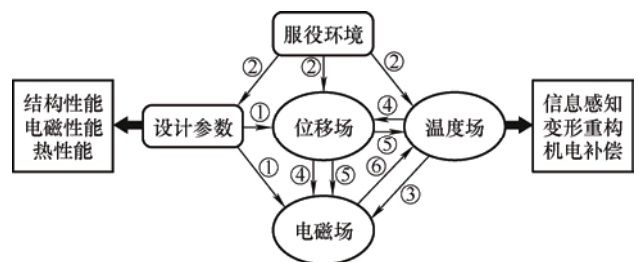


图3 大口径天线机电热耦合关系

(1) 天线结构设计参数的变化影响结构位移场与电磁场。

(2) 服役环境影响位移场、温度场,制约着设计参数的优选。

(3) 温度场变化直接影响器件性能及电磁场。

(4) 温度场变化影响位移场,进而影响电磁场。

(5) 位移场作为边界条件,其变化直接影响温

度场与电磁场。

(6) 高功率电磁场会影响温度场。

上述各个因素综合作用都将影响天线的观测性能。具体来说, 大口径天线馈电网络误差、辐射阵元失效、热敏电子器件性能温漂、天线阵元互耦、阵面二次电源等都会引起馈电电流的幅相误差, 导致天线电磁性能恶化; 大口径天线服役中振动、冲击、热功耗等导致阵面变形, 引起辐射阵元位置偏移和指向偏转, 天线阵面电磁幅相分布发生变化, 导致发射波束畸变, 致使天线电性能受到严重影响; 大口径天线在不同占空比工作模式下, 其天线阵面电磁幅相分布会进行相应调整, 导致热功耗随之变化, 从而引起温度分布发生变化, 进而影响天线阵面的结构热变形。

针对动态时变随机载荷作用下大口径天线同时发生整体转动变形和局部扭转变形, 本文从天线结构位移场、电磁场与温度场的机电热多场耦合角度出发, 将多源因素的影响嵌入到大口径天线的场强方向图函数表达式(1)中, 建立了复杂服役环境下天线指向偏转、天线型面特征、阵元互耦效应、阵面电源纹波的大口径天线结构位移场、电磁场与温度场的机电热多场耦合理论模型^[13]

$$E(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \left[\sum_{m=1}^M C_{nm,pq}(\delta) I_{nm}(T, V) \exp(j\varphi_{nmI}(T, V)) \cdot A_{nm} f'_{nm}(\theta - \xi_{\theta nm}(\delta), \phi - \xi_{\phi nm}(\delta), S'_{nm,pq}(\delta)) \cdot I'_{nm}(\delta, T) \cdot \exp(j(\Delta\varphi'_{nm}(\delta) + \varphi_{nmB}(T))) \right] \quad (2)$$

式中, $E(\theta, \phi)$ 为天线远区电场方向图; δ 为风场环境载荷及温度场 T 作用下的位移场, I_{nm} 、 φ_{nmI} 为电源和 T/R 组件提供的第 n 个阵元电流幅度和相位, V 是阵面二次电源纹波, $C_{nm,pq}$ 为阵元 pq 对阵元 nm 的互耦系数; A_{nm} 为激励加权项, $\xi_{\theta nm}(\delta)$ 、 $\xi_{\phi nm}(\delta)$ 是阵元指向偏角, $S'_{nm,pq}(\delta)$ 是阵元 pq 对阵元 nm 的散射参数, f'_{nm} 为阵元阵中方向图; $\Delta\varphi'_{nm}$ 为变形引起的口面空间相位差, φ_{nmB} 为受温度影响的激励相位差, I'_{nm} 为受结构变形和温度影响的口面幅度。该机电热耦合理论模型有效解决了电磁设计与热设计、结构设计无法建立定量联系的科学问题, 为天线“看得远、看得清”提供了重要理论基础。

2 天线状态信息在线感知与快速重构

在建立大口径天线机电热耦合模型的基础上, 针对大口径天线性能受制于环境随机时变和自身状

态信息不清等难题, 利用信息熵理论描述不同结构区域对天线指向稳定性的贡献度, 构建天线结构模态状态空间方程, 综合应用应变、位移、加速度等多类型传感器, 利用多类型传感器测量多类型物理量, 采用更少的监测信息来反映天线模型特征, 提高形面重构精度, 同时通过卡尔曼滤波理论对噪声进行处理, 使重构结果更加准确, 将为后续工程上高性能天线电性能补偿奠定基础。在工程实际中, 大口径天线所受的外部激励往往是未知的, 对于激励未知的情况, 传统卡尔曼滤波响应重构方法将不再适用。因此, 针对存在天线外部激励未知情况下的线性系统, 提出了一种改进的卡尔曼滤波响应重构方法, 其原理在于利用加权最小二乘的思想对结构激励进行最小无偏估计从而识别出激励, 然后通过卡尔曼滤波方法对结构状态进行连续识别, 从而完成在含误差且激励未知情况下的有源相控阵天线阵面响应重构。大口径天线形面重构技术流程图如图 4 所示。

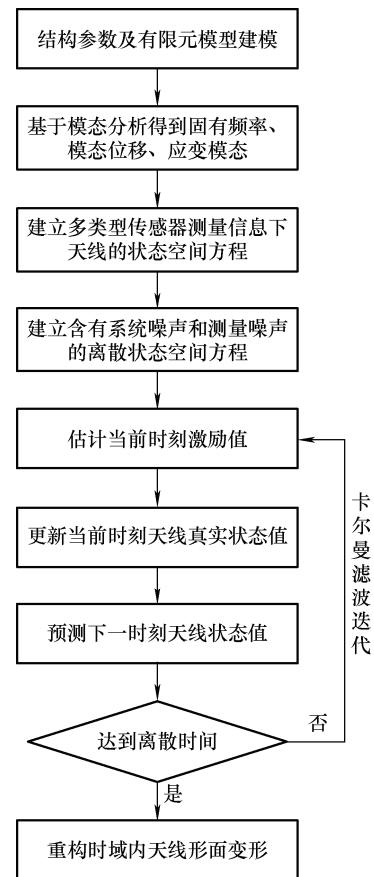


图 4 大口径天线形面重构技术流程图

基于传统卡尔曼滤波响应重构法, 由于激励未知, 在时间更新, 状态更新的基础上再加一步激励识别, 分别为

$$\mathbf{x}_{k|k-1} = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}_d \hat{\mathbf{u}}_{k-1} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_k = \mathbf{M}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_d \mathbf{x}_{k|k-1}) \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_{k|k} = \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_d \mathbf{x}_{k|k-1} - \mathbf{D}_d \hat{\mathbf{u}}_k) \quad (5)$$

式中, 迭代过程矩阵 \mathbf{M}_k 、 \mathbf{K}_k 的求解是关键, 即如何求解 \mathbf{M}_k 、 \mathbf{K}_k 使估计量 $\mathbf{x}_{k|k}$ 和 $\hat{\mathbf{u}}_k$ 是真实状态 \mathbf{x}_k 和激励 \mathbf{u}_k 的最优无偏估计。式(3)、(4)、(5)分别称为: 时间更新、激励估计、状态更新。

首先考虑时间更新, 假定在 $k-1$ 时刻, $\mathbf{x}_{k-1|k-1}$ 和 $\hat{\mathbf{u}}_{k-1}$ 是 \mathbf{x}_{k-1} 和 \mathbf{u}_{k-1} 的最优无偏估计, 依据式(3)可得预测状态 $\mathbf{x}_{k|k-1}$, 其相关估计误差

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k|k-1} \equiv \mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k|k-1} = \mathbf{A}_d \tilde{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}_d \tilde{\mathbf{u}}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (6)$$

$\mathbf{x}_{k-1|k-1}$ 的协方差矩阵可以写成

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k|k-1}^x &\equiv E(\tilde{\mathbf{x}}_{k|k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k|k-1}^T) \\ &= [\mathbf{A}_d \quad \mathbf{B}_d] \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{k-1|k-1}^x & \mathbf{P}_{k-1}^{xu} \\ \mathbf{P}_{k-1}^{ux} & \mathbf{P}_{k-1}^u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d^T \\ \mathbf{B}_d^T \end{bmatrix} + \mathbf{G}_{k-1} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, 方差矩阵系数可以分别计算, 相关表达式表示为

$$\mathbf{P}_{k-1|k-1}^x \equiv E(\tilde{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^T) \quad \mathbf{P}_{k-1}^u \equiv E(\tilde{\mathbf{u}}_{k-1} \tilde{\mathbf{u}}_{k-1}^T)$$

$$\mathbf{P}_{k-1}^{xu} = (\mathbf{P}_{k-1}^{ux})^T \equiv E(\tilde{\mathbf{u}}_{k-1} \tilde{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}^T)$$

其次考虑激励估计, 定义 $\tilde{\mathbf{y}}_k \equiv \mathbf{y}_k - \mathbf{C}_d \mathbf{x}_{k|k-1}$ 结合状态空间方程可得

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{D}_d \mathbf{u}_k + \mathbf{C}_d \tilde{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{v}_k = \mathbf{D}_d \mathbf{u}_k + \mathbf{e}_k \quad (8)$$

式中, $\mathbf{e}_k = \mathbf{C}_d \tilde{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{v}_k$ 。因为 $\mathbf{x}_{k|k-1}$ 是无偏估计, 所以 \mathbf{u}_k 的最小无偏估计可以依据 $\tilde{\mathbf{y}}_k$ 采用最小二乘法给出。由于 \mathbf{e}_k 的存在, 导致上式存在异方差, 所以需进行加权最小二乘处理, 定义加权项为

$$\tilde{\mathbf{R}}_k^{-1} \equiv E(\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T) = (\mathbf{C}_d \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}_d^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (9)$$

由加权最小二乘法结合式(7)可得

$$\mathbf{u}_k = (\mathbf{D}_d^T \tilde{\mathbf{R}}_k^{-1} \mathbf{D}_d)^{-1} \mathbf{D}_d^T \tilde{\mathbf{R}}_k^{-1} \tilde{\mathbf{y}}_k \quad (10)$$

所以矩阵 \mathbf{M}_k 的具体表达式如下

$$\mathbf{M}_k = (\mathbf{D}_d^T \tilde{\mathbf{R}}_k^{-1} \mathbf{D}_d)^{-1} \mathbf{D}_d^T \tilde{\mathbf{R}}_k^{-1} \quad (11)$$

此时加权最小二乘的方差, 即激励估计的方差为

$$\mathbf{P}_k^u = (\mathbf{D}_d^T \tilde{\mathbf{R}}_k^{-1} \mathbf{D}_d)^{-1} \quad (12)$$

为方便计算状态与激励的协方差矩阵 \mathbf{P}_k^{xu} , 将式(8)代入式(4)可得

$$\hat{\mathbf{u}}_k = \mathbf{M}_k \mathbf{D}_d \mathbf{u}_k + \mathbf{M}_k \mathbf{e}_k \quad (13)$$

可以看出, 要使 $\hat{\mathbf{u}}_k$ 是 \mathbf{u}_k 的最小无偏估计, 则 $\mathbf{M}_k \mathbf{D}_d = \mathbf{I}$, 激励估计的误差为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{u}}_k &= \mathbf{u}_k - \hat{\mathbf{u}}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{M}_k \mathbf{D}_d) \mathbf{u}_k - \mathbf{M}_k \mathbf{e}_k \\ &= -\mathbf{M}_k \mathbf{e}_k \end{aligned} \quad (14)$$

最后对测量更新进行推导, 也就是对结构状态的最优无偏估计进行推导, 将式(4)代入式(5)可得

$$\mathbf{x}_{k|k} = \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{I} - \mathbf{D}_d \mathbf{M}_k) (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_d \mathbf{x}_{k|k-1}) \quad (15)$$

式中, 令 $\mathbf{L}_k = \mathbf{K}_k (\mathbf{I} - \mathbf{D}_d \mathbf{M}_k)$, 式(15)可以写成

$$\mathbf{x}_{k|k} = \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{L}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_d \mathbf{x}_{k|k-1}) \quad (16)$$

再根据式(16)和式(8)可以得出误差

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_{k|k} &= \mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{L}_k \mathbf{C}_d) \tilde{\mathbf{x}}_{k|k-1} - \\ &\quad \mathbf{L}_k \mathbf{D}_d \mathbf{u}_k - \mathbf{L}_k \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (17)$$

因为 $\mathbf{x}_{k|k}$ 对于所有激励 \mathbf{u}_k 都是最优无偏估计, 所以必须 $\mathbf{L}_k \mathbf{D}_d = 0$ 。因此可以得出 \mathbf{x}_k 的方差 $\mathbf{P}_{k|k}^x$, 如下式

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k|k}^x &\equiv E(\tilde{\mathbf{x}}_{k|k} \tilde{\mathbf{x}}_{k|k}^T) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}_k \mathbf{C}_d) \mathbf{P}_{k|k-1}^x (\mathbf{I} - \mathbf{L}_k \mathbf{C}_d)^T + \\ &\quad \mathbf{L}_k \mathbf{R}_k \mathbf{L}_k^T \end{aligned} \quad (18)$$

要使结构状态 $\mathbf{x}_{k|k}$ 为最优无偏估计, 那么方差应取最小, 此问题转为在约束条件下 \mathbf{L}_k 如何取值式(17)可取到最小值的问题, 因此可采用 Lagrange 算法对其进行求解, 为使矩阵 $\mathbf{P}_{k|k}^x$ 最小, 可使其矩阵的迹最下, 因此可得

$$\begin{aligned} \min \text{trace} \left\{ \left[(\mathbf{I} - \mathbf{L}_k \mathbf{C}_d) \mathbf{P}_{k|k-1}^x (\mathbf{I} - \mathbf{L}_k \mathbf{C}_d)^T + \right. \right. \\ \left. \left[\mathbf{L}_k \mathbf{R}_k \mathbf{L}_k^T \right] - 2 \text{trace} \left[\mathbf{L}_k \mathbf{D}_d \Lambda_k^T \right] \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

式中, Λ_k 表示 Lagrange 乘子。因为上式矩阵为正定形式, 所以可在其倒数为零处取到最小值, 对上式 \mathbf{L}_k 求导可得并使其为零可得

$$\tilde{\mathbf{R}}_k \mathbf{L}_k^T - \mathbf{P}_{k|k-1}^x \mathbf{C}_d^T - \mathbf{D}_d \Lambda_k^T = 0 \quad (20)$$

对上式两边同乘上 $\mathbf{D}_d^T \tilde{\mathbf{R}}^{-1}$, 再加上约束条件, 可得 Λ_k

$$\Lambda_k = -(\mathbf{D}_d^T \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{D}_d)^{-1} \mathbf{D}_d^T \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{C}_d \mathbf{P}_{k|k-1}^x \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)可得 \mathbf{L}_k

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}^x \mathbf{C}_d^T \tilde{\mathbf{R}}^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{D}_d \mathbf{M}_k) \quad (22)$$

可得卡尔曼增益为

$$K_k = P_{k|k-1}^x C_d^T \tilde{R}_k^{-1} \quad (23)$$

将式(23)代入式(18)中, 可得方差 $P_{k|k}^x$ 为

$$P_{k|k}^x = P_{k|k-1}^x - K_k (\tilde{R}_k - D_d^T P_k^u D_d) K_k^T \quad (24)$$

结合式(14)和式(17)可得状态与激励的协方差 P_k^{xu} 为

$$P_k^{xu} = -P_{k|k-1}^x C_d^T M_K^T = -K_k D_d P_k^u \quad (25)$$

接下来是结构响应重构, 通过上述激励未知的卡尔曼滤波响应重构方法, 通过测量信息可连续识别出结构的激励 u_k 和结构的状态 $x_{k|k}$, 如下式

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A_d x_k + B_d u_k + w_k \\ y_k^m &= C_d^m x_k + D_d^m u_k + v_k \end{aligned} \quad (26)$$

式中, y_k^m 表示 k 时刻测量信息, 上标 m 表示测量位置。式(26)表示激励未知的卡尔曼滤波过程的两个方程, 利用上述未知激励卡尔曼滤波过程识别出结构的激励 u_k 和系统状态 $x_{k|k}$, 然后利用下列式重构其他未测位置响应信息

$$y_k^r = C_d^r x_{k|k} + D_d^r u_k \quad (27)$$

式中, y_k^r 表示 k 时刻需要重构的信息, 上标 r 表示未测量位置(需重构位置)。

由于不同服役环境导致天线结构不同部位发生形变的机理不同, 例如在机翼与机身连接处可能存在大应变小位移的情况, 在机翼末端可能存在大位移小应变的情况; 对于高频动态载荷(海浪、高频风载荷、高频振动载荷)和高速惯性载荷导致的变形, 一方面可能存在小应变大加速的情况, 另一方面应变传感器很难快速准确的采集到实时高频信息。针对上述情况单独采用一种传感器进行信息采样的话, 很难利用少数点测样信息来准确重构, 因此提出了多类型传感器进行测量的理论, 对于不同机理导致的形变, 采用敏感类型的传感器进行信息的测量, 提高后续重构精度。针对服役环境中的大口径天线, 测量时可选用位移、应变、加速度等传感器进行测量。在传感器测量过程中, 不同测量信息只会导致状态方程中观测方程中 C 和 D 矩阵的形式不同。因此, 当测量信息为位移时

$$C_d^m = [\Phi \ 0], \ D_d^m = [0] \quad (28)$$

式中, Φ 只表示测量位置处的位移模态。

当测量信息为应变时

$$C_d^m = [\Psi \ 0], \ D_d^m = [0] \quad (29)$$

式中, Ψ 表示应变模态。

当测量信息为加速度时

$$C_d^m = [-\Phi A \ -\Phi \Gamma], \ D_d^m = [\Phi \Phi^T B_u] \quad (30)$$

式中, $A = \text{diag}(w_i^2)$, $\Gamma = \text{diag}(2\zeta_i w_i)$, w_i 表示结构的第 i 阶无阻尼特征频率, ζ_i 表示结构第 i 阶阻尼率。当测量信息同时包含位移 d , 应变 ε , 加速度 a 三种测量信息时, C_d^m 和 D_d^m 的形式如下

$$y_k^m = \begin{bmatrix} d \\ \varepsilon \\ a \end{bmatrix} \quad C_d^m = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ \Psi & 0 \\ -\Phi A & \Phi \Gamma \end{bmatrix} \quad D_d^m = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Phi \Phi^T B_u \end{bmatrix} \quad (31)$$

将上述变形后的矩阵代入未知激励下卡尔曼滤波响应重构后, 就将单一类型测量信息推广到多类型测量信息。

以某研究所的有源相控阵天线实验平台为对象, 利用 9 个安装在天线阵面背部的调整机构产生了弯曲变形, 通过摄影方式采集面板上测点靶标的位移信息, 作为阵面的真实位移信息。分别采用卡尔曼滤波法和传统模态法对天线阵面变形进行重构, 采集天线阵面法向位移信息, 其重构效果如图 5 所示。与摄影法重构结构相比, 传统模态法重构误差约为 6.72%, 而卡尔曼滤波重构法的误差量约为 3.46%。综上相比而言, 卡尔曼重构法明显优于模态法重构, 能够显著地提高天线阵面结构变形的重构精度, 验证其在实际工程中的有效性。

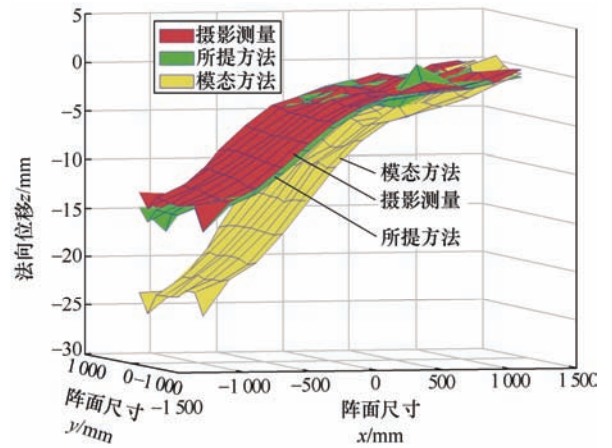


图 5 大口径天线阵面重构方法对比

3 基于多系统协同的机电耦合调控

大口天线服役过程中, 由于环境的复杂性与多样性, 其变形也多种多样, 例如天线的整体偏转、天线阵面的扭转变形、阵元位置的改变以及阵元的扭转变形等。在多传感器的监测信息对大口径天线形面重构的基础上, 根据重构信息将大口径天线形

面变形分解为大尺度变形和小尺度变形。采用“分而治之”的思想,从机械补偿和电性能补偿两个方面出发,天线阵面大尺度变形采用机械补偿方式,天线阵面小尺度变形采用电补偿方式,具体技术路线如图 6 所示。大口径机械补偿方式主要采用天线伺服调整机构完成对天线指向精度的调整。针对大尺度机械补偿方式,基于状态监测和信息重构,得到关键节点的重构信息,将关键节点的重构信息与数据库进行匹配,若满足一定的匹配率及匹配精度,认为天线目前状态与数据库该组数据对应的状态类似,将相应机械调整量提取出来,送至天线控制单元实现机械补偿,同时重启监测系统开启下一轮的机械补偿。需要注意的是,当监测信息是温度时,补偿数据库存储的是关键节点的温度数据,当监测信息是应变时,补偿数据库存储的是应变数据。当匹配不成功时,无法从数据库提取一组近似状态,故需要转至机械调整量计算模块,基于监测信息的结果计算形面变形,进而得到机械调整量,同时将该组机械调整量和监测信息对应起来存入补偿

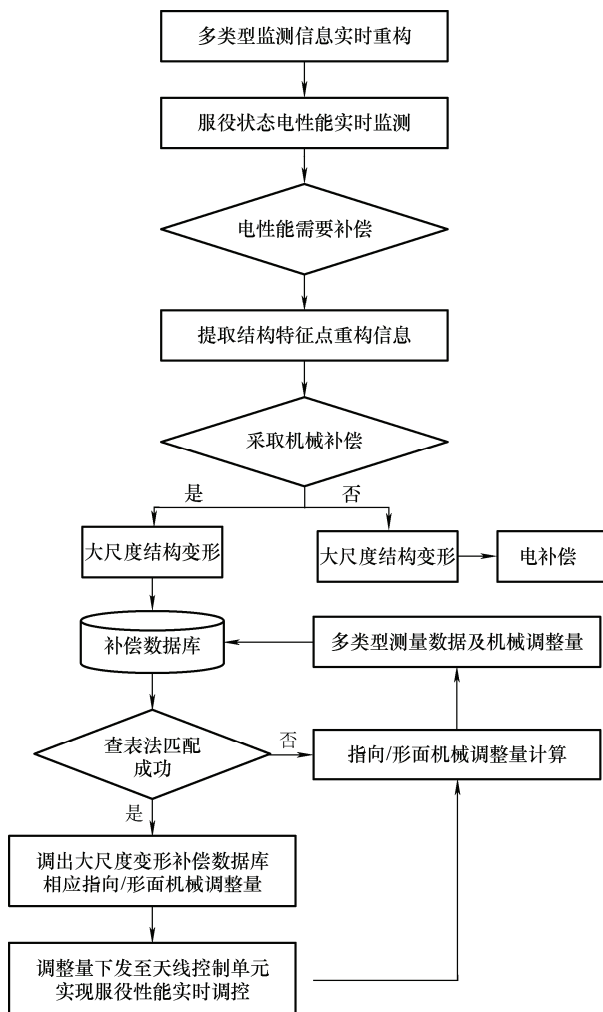


图 6 机械式电性能补偿流程图

数据库,若监测信息是时缓变载荷,比如温度,可将计算结果同时发送至天线控制单元以实现机械补偿。随着该补偿系统应用时间的推移,补偿数据库将逐渐自我完善,最终仅利用查表法即可实现机械式补偿,计算调整量模块功能将逐渐消退,完成大口天线的机械式电性能补偿。

天线形面小尺度结构变形将主要导致高频段天线电性能恶化,而电补偿方法针对结构误差的补偿能力有限(通常补偿结构误差为 $\lambda/5$ 以下, λ 为波长)。因此,小尺度结构变形可采用电补偿方式予以补偿,主要包含相位修正、激励电流相位或幅相优化和构造方向图修正系数等方法。当天线受到风荷等快速变化的环境载荷影响时,如何快速获取的激励电流幅相补偿量,对这一类环境载荷的影响进行补偿,成为电补偿方法的技术难点之一。因此,本文将激励电流相位和幅相相结合,提出了一种基于快速傅里叶变换的天线电性能实时补偿方法,可快速确定出结构变形对应的激励幅相调整量,保障天线可靠服役性能,其补偿流程如图 7 所示。

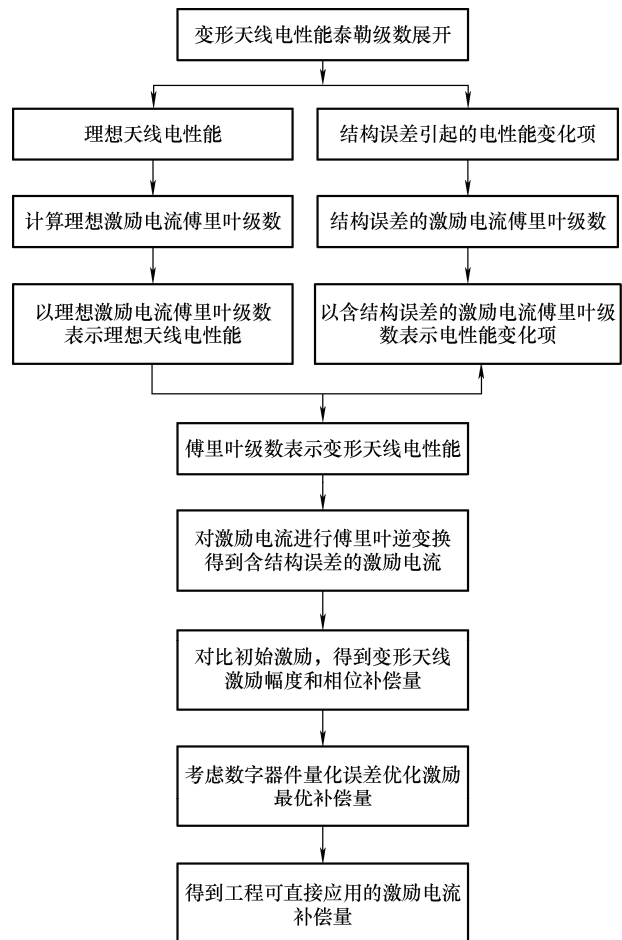


图 7 小尺度误差电补偿流程图

以平面有源相控阵天线为对象进行研究, 假设平面有源相控阵天线共有 $M \times N$ 个天线阵元按等间距矩形栅格阵排列, 天线沿 x, y 轴的间距分别为 d_x 和 d_y , 如图 8 所示。

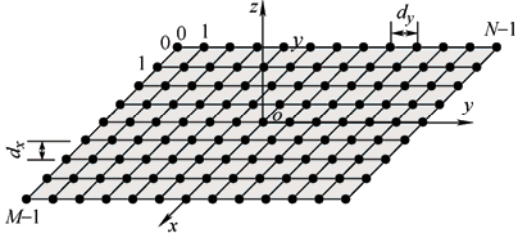


图 8 平面有源相控阵天线的阵元排列示意图

基于重构信息的分解得到的天线阵面小尺度误差, 因其小尺度特点, 可将变形天线电性能式(2)进行一阶泰勒级数展开, 将其分解为理想项和误差项, 并进行一阶泰勒级数展开并近似为

$$E(u, v) \approx \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{mn} \left\{ 1 + jk \left[(\Delta x_{mn} - \Delta x_{0,0})u + (\Delta y_{mn} - \Delta y_{0,0})v + (\Delta z_{mn} - \Delta z_{0,0})\sqrt{1-u^2-v^2} \right] \right\} \exp \left[jk (md_x u + nd_y v) \right] \quad (32)$$

分别对式中的理想激励电流以及与包含 x, y, z 方向结构误差的激励电流进行二维快速傅里叶变换, 得到各激励电流的傅里叶级数, 分别将各激励电流项的傅里叶级数代入理想项和误差项, 得到以傅里叶级数形式表示的变形天线电性能。对变形天线电性能中激励电流项在全视角范围内离散并进行二维快速傅里叶逆变换, 可得到包含结构误差影响的激励电流 I_{mn}^s 表达式

$$I_{mn}^s = \frac{1}{MN} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{mn} \left[1 + jk (\Delta x_{mn} - \Delta x_{0,0})u_p + jk (\Delta y_{mn} - \Delta y_{0,0})v_q + jk (\Delta z_{mn} - \Delta z_{0,0})\sqrt{1-u_p^2-v_q^2} \right] \exp \left[-j2\pi \left(\frac{mp}{M} + \frac{nq}{N} \right) \right] \right\} \exp \left[j2\pi \left(\frac{mp}{M} + \frac{nq}{N} \right) \right] \quad (33)$$

提取式(33)中等效激励电流的实部和虚部, 能得到变形面阵天线阵元激励电流的幅度和相位, 将其分别与天线阵元理想激励电流的幅度 I_{mn} 和相位 φ_{mn} 进行对比, 可得如下变形面阵天线阵元激励电

流幅度和相位补偿量计算模型。该流程在获取天线形面重构信息时, 可快速计算出相应激励电流的补偿量, 补偿结构变形对天线电性能的影响。

4 高频段大口径天线综合调控平台

结合工程应用需求, 研制了高频段大口径天线综合调控平台, 突破了天线多源异构数据融合、子系统调控能力评估与权重计算、在线自适应补偿策略等关键技术, 包含数据采集、信息重构、性能分析和综合调控等功能, 涉及多类型数据采集模块、温度反演模块、变形重构模块、辐射性能耦合评估模块、机械与电子综合调整量计算模块、载荷与调整量数据库存储模块、数据查询匹配模块、天线单元调整控制模块等功能模块, 可应用于面天线、阵列天线等典型工程对象的服役性能综合调控, 如图 9 所示。以反射面天线热变形机械式补偿为例:

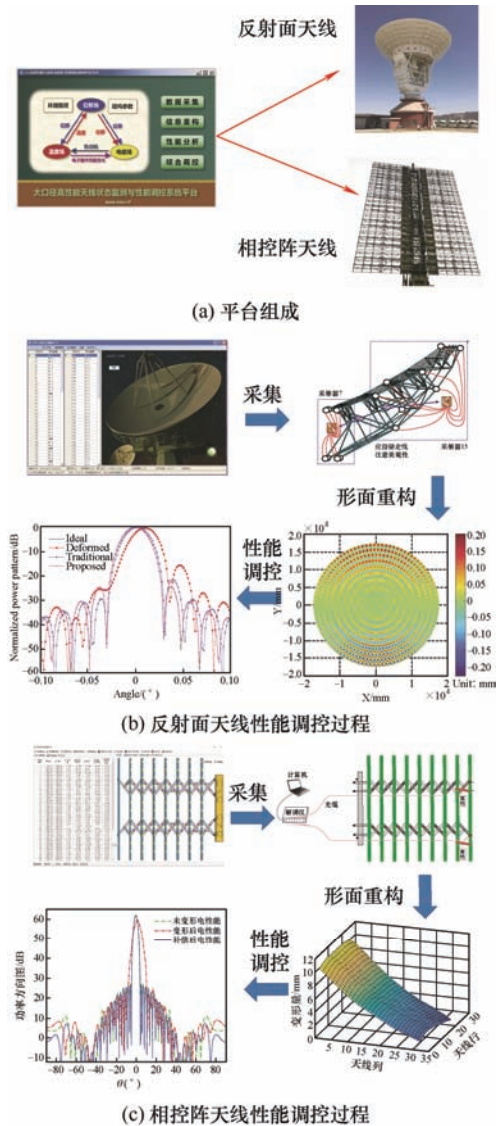


图 9 高频段大口径天线综合调控平台

① 开启数据采集模块采集温度；② 温度特征计算与数据查询匹配；③ 匹配成功则提取相应调整量，转至天线单元调整控制模块，利用天线伺服系统开启天线服役性能调控补偿，最后重新启动温度数据采集；④ 匹配不成功则转至辐射性能耦合评估模块计算当前性能，进而进入调整量计算模块，将载荷与计算所得调整量存入数据库，实现数据库自我更新，最后重新启动温度数据采集。以相控阵天线电性能调控为例：① 根据应用对象确定典型工况并测试应变数据，建立修正矩阵；② 开启数据采集模块采集应变；③ 进入基于应变及修正矩阵的变形重构模块重构阵面变形；④ 进入辐射性能耦合评估模块计算当前性能；⑤ 辐射性能变化小于给定阈值则重新启动数据采集模块采集应变；⑥ 辐射性能变化大于给定阈值，转至电子协同调整量计算模块计算调整量，转至天线单元调整控制模块，开启天线服役性能调控补偿，最后重新启动数据采集模块采集应变。上述工作方式能够实现天线服役状态信息实时监测与性能自适应调控，该软件系统已成功应用于现有多部大口径天线服役性能调控中，取得了良好的应用效果。

5 结论

本文针对大口径高性能天线复杂服役环境下服役性能综合调控所面临的技术挑战，从大口径天线复杂服役环境下机电热耦合建模、服役环境状态信息传感布局与实时重构、基于多系统协同调控的机械/幅相综合性能补偿方法三个方面进行了相关研究，并研发了大口径高性能天线状态监测与性能综合调控系统，在反射面天线、相控阵天线等典型工程对象中得到成功应用。

(1) 厘清了大口径天线多个学科物理场的相互耦合作用和影响机理，建立了建立了复杂服役环境下天线机电热多场耦合理论模型。

(2) 利用多类型传感器测量大口径天线的监测信息，建立了激励未知情况下的卡尔曼滤波响应重构方法，提高了天线阵面结构变形的重构精度。

(3) 将大口径天线形面变形分解为大尺度变形和小尺度变形，提出了大尺度变形采用机械补偿，小尺度变形采用电补偿的多系统协同调控方案。

参 考 文 献

- [1] 段宝岩. 电子装备机电耦合理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 王国彪, 段宝岩, 黎明, 等. 高精度电子装备机电耦合研究进展[J]. 中国科学基金, 2014, 28(4): 241-250.
- [3] 段宝岩. 电子装备机电耦合研究的现状与发展[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(3): 299-312.
- [4] SAMII Y R. An efficient computational method for characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1983, 31(1): 92-98.
- [5] 王娜. 新疆奇台 110 米射电望远镜[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44(8): 783-794.
- [6] 常可可, 王立平, 薛群基. 极端工况下机械表面界面损伤与防护研究进展[J]. 中国机械工程, 2020, 31(2): 206-220.
- [7] DU Q, DU P G. Computation of fluctuating wind pressure and wind loads on phased-array antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(1): 66-75.
- [8] SONG G, KELLY B, AGRAWAL B N. Active position control of a shape memory alloy wire actuated composite beam[J]. Smart Materials and Structures, 2000, 9(5): 711-716.
- [9] 胡乃岗, 保宏, 连培园, 等. 大型相控阵天线结构与调整机构一体化设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 196-202.
- [10] 王从思, 韩如冰, 王伟, 等. 星载可展开有源相控阵天线结构的研究进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 107-123.

- WANG Congsi, HAN Rubing, WANG Wei, et al. Development of spaceborne deployable active phased array antennas[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 107-123.
- [11] 王艳, 王从思, 雷婷, 等. 通信天线信道容量机电耦合建模及阵元位置灵敏度分析[J]. 电子学报, 2020, 48(9): 1804-1813.
- WANG Yan, WANG Congsi, LEI Ting, et. al. Electromechanical coupling modeling of channel capacity and sensitivity analysis of element position for communication antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(9): 1804-1813.
- [12] 王从思. 有源相控阵天线机电热耦合分析、设计与补偿[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- WANG Congsi. Active phased array antenna electromechanical coupling analysis, design and compensation[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [13] 康明魁. 有源相控阵天线机电热耦合建模、误差分析与优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- KANG Mingkui. Coupled structural electromagnetic thermal modelling, error analysis and optimization design of active phased array antennas[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
-
- 作者简介: 薛松, 男, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为大口径天线健康监测与性能调控。
E-mail: sxue@xidian.edu.cn
- 王从思(通信作者), 男, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电子装备机电耦合理论设计与性能保障方法。
E-mail: congsi wang@163.cn
- 连培园, 男, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为雷达天线结构-电磁-热多学科分析设计。
E-mail: pylan@xidian.edu.cn
- 王艳, 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为天线机电热耦合分析。
E-mail: wangyan5169@163.com
- 许谦, 男, 教授级高级工程师, 博士研究生导师。主要研究方向为天线结构测量技术。
E-mail: xuqian@xao.ac.cn
- 王娜, 女, 教授级高级工程师, 博士研究生导师。主要研究方向为射电天文、大口径射电望远镜相关技术。
E-mail: na.wang@xao.ac.cn