

轻型雷达阵面精度控制与保形技术研究

王梅¹, 王平安²

¹中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥

²中国电子科技集团公司第三十八研究所国家级工业设计中心, 安徽 合肥

Email: 9764777@qq.com

收稿日期: 2020年11月5日; 录用日期: 2020年12月16日; 发布日期: 2020年12月24日

摘要

大型相控阵雷达已成为国防、天文、深空探测等领域亟需的大国重器, 具有天线口径大、重达数百吨、高精度等技术特征。因大口径、大负载而导致的精度难以控制问题以及全生命周期保形问题成为大型相控阵雷达研制过程中需要首要解决的重大技术问题。本文介绍了大口径天线轻薄设计评估、全流程精度分配与控制、以及大口径天线测量标定与变形补偿等关键技术, 为大型相控阵雷达精度控制与保形提供了解决方案, 支撑我国系列重大战略装备成功研制。

关键词

雷达阵面, 保形, 精度控制, 机电耦合, 变形测量

Research on Precision Control and Shape Keeping Technology of Light Radar Array

Mei Wang¹, Ping'an Wang²

¹NO.38 Research Institute of CETC, Hefei Anhui

²China National Industrial Design Center of NO. 38 Research Institute of CETC, Hefei Anhui

Email: 9764777@qq.com

Received: Nov. 5th, 2020; accepted: Dec. 16th, 2020; published: Dec. 24th, 2020

Abstract

The large phased array radar has become a great equipment in the fields of national defense, astronomy, deep space exploration and so on. It has the technical characteristics of large antenna diameter, weighing hundreds of tons and high precision. Due to the large aperture and heavy load, the precision is difficult to control and the whole life cycle shape keeping problem becomes major technical problems to be solved in the development of large phased array radar. This paper introduces the key tech-

nologies such as lightweight design evaluation of large aperture antenna, whole process precision distribution and control, measurement calibration and deformation compensation of large aperture antenna, which provides solutions for precision control and shape keeping of large phased array radar, and supports the successful development of a series of major strategic equipment in China.

Keywords

Radar Array, Shape Keeping, Precision Control, Mechatronics, Deformation Measurement

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

大型相控阵雷达是国家导弹防御系统和太空监视系统的核心装备, 担负着守卫国家空天安全的重大使命, 执行导弹预警、轨迹跟踪, 空间碎片监测、真假弹头识别、卫星发射监视等任务[1] [2]。因此, 大型相控阵雷达是世界大国优先发展的国之重器。美国是世界上大型相控阵雷达技术水平最先进的国家, 研制了海基、陆基等多类型大型相控阵雷达, 如图 1 所示铺路爪雷达。图 2 是部署在莫斯科的顿河 2 金字塔式相控阵雷达, 四个面都有一个直径 18 米的有源相控阵天线。



Figure 1. American Paving Claw Radar

图 1. 美国铺路爪雷达



Figure 2. Russian Don River 2 Radar

图 2. 俄罗斯顿河 2 雷达

雷达是典型的以“电”为目标、以“机械”为载体的综合集成装备, 雷达结构与伺服控制性能对其电性能有着决定性的影响, 不论电磁信号的发射、接收, 还是隔离、跟踪、干扰, 都涉及到天线阵面位移场与电磁场的相互耦合关系。大型相控阵雷达具有天线口径大、重达数百吨高精度(面精度 RMS 值达到毫米级)等技术特征。在恶劣使用环境下, 天线阵面通常产生较大的动态变形, 表面形态偏离设计值。如果阵面精度达不到要求, 将直接影响电性能指标, 导致天线增益衰减, 尤其是副瓣抬高, 并最终影响雷达的整体的性能。因此, 如何实现雷达阵面精度指标要求, 以及在恶劣使用环境下保持精度水平, 即保形, 是大型相控阵雷达研制过程中首要任务[3][4][5]。

大型相控阵雷达区别于常规雷达, 研制上提出更高要求, 有几个显著特征:

1) 探测距离远。常规雷达通常看个几百公里, 大型相控阵雷达则要达到数千公里, 甚至上万公里。要看得远, 就意味着天线口径增大, 需要更多的天线单元, 将更大的能量辐射出去, 所以天线口径增大了十倍、百倍, 面积达到了数百平方到上千平方, 重量也从几吨增加到几百吨。

2) 探测精度高。数千公里外要能够跟踪一个高尔夫球大小的目标。对于常规小型雷达而言, 再高的探测精度要求, 机械结构上都能保障, 容易实现。但对于数百平米、数百吨的大型天线而言, 就变得异常困难, 结构的面精度、伺服定位精度就上升为制约因素。

3) 覆盖范围广。现在战争没有前方、后方的概念, 威胁来自四面八方, 过去常规的面向单一方向的固定站雷达不能满足需求, 需要 360°全方位覆盖。美国、俄罗斯大多数采用多面阵方案, 其缺点是成本高昂, 能耗巨大。旋转阵雷达成为未来的发展趋势, 图 3 所示为美国 GBR 雷达, 具有方位、俯仰旋转功能。旋转阵雷达就要求轻量化设计, 严格控制重量, 避免给传动系统带来过大负担。

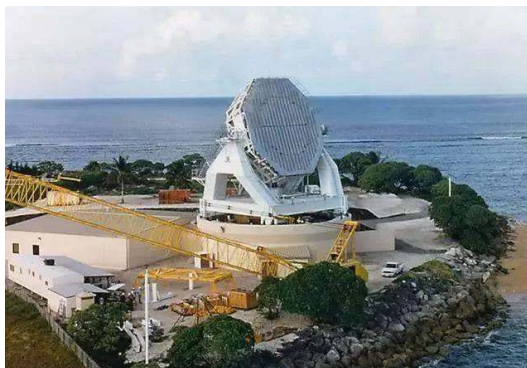


Figure 3. American GBR Radar

图 3. 美国 GBR 雷达

4) 全寿命周期保形。受雷达轻量化设计影响, 系统刚度受损失。在环境载荷作用下, 天线产生较大的结构变形, 导致电性能恶化, 必须对天线变形进行监测和补偿。

综合上述因素, 大型相控阵雷达的研制中, 精度控制与保形是不可逾越的重大技术问题, 必须要突破: 大口径天线轻薄设计评估、全流程精度分配与控制、以及大口径天线测量标定与变形补偿等核心关键技术。

2. 大口径天线轻薄设计评估技术

大型相控阵雷达天线面积达到数百平米, 要求较高的面精度和整体可转动性(方位旋转或者俯仰转动), 天线阵面必须足够轻薄, 刚度与重量矛盾变得异常尖锐。正常情况下, 如果雷达天线面积增大 100 倍, 要保持相同面精度, 单位天线面积的重量也要增加到 2~5 倍, 才能保证相同刚度。在轻薄设计要求下, 单位天线面积的重量必须严格控制。

所以, 大型相控阵雷达天线总体设计思路是: 将常规的钢混天线楼结构改为全钢结构, 从以下几个方面进行轻量化设计。

- 1) 整体构形拓扑优化。以“梯形”天线楼结构为初始设计域,在总体重量、天线厚度等参数约束下,对雷达整体构形进行拓扑优化,获取最佳雷达天线骨架构形。
- 2) 桁架胞元优化设计。桁架胞元是天线骨架基本单元。按照空间杆系结构特点,从天线骨架构型中提取基本结构胞元。在 CAE 仿真环境下,进行参数化建模,采用生死单元技术,对承力节点、加强筋布局 and 材料形状尺寸进行综合优化,控制结构变形,保证强度。
- 3) 电子设备与骨架一体化集成设计。常规雷达电子设备机箱机柜作为负载,安装在骨架上面,不承力。为了轻量化设计,将电子设备的框架与雷达天线骨架一体化集成设计。一方面减少零件数量,降低重量,另一方面,利用电子设备框架增强雷达天线骨架刚度,减少骨架型材负担。
- 4) 抗力学设计与评估。考虑风载、温度、自重、冰雪负载、地震等复杂载荷环境,对大型雷达天线骨架进行整体仿真分析,评估总体结构刚度与强度。

通过上述设计,实现大口径雷达天线轻薄设计,阵面精度达到毫米级,相对钢混天线楼结构重量可以减少 50%左右。

3. 全流程精度分配与控制技术

影响天线阵面结构精度的因素分为随机误差和系统误差,随机误差包括阵面的加工制造误差、单元的安装误差;系统误差包括天线自重、风载荷作用下所引起的阵面变形等,上述误差都会使得阵面平面度和极化方向改变,造成增益下降、副瓣升高以及指向精度变差等问题,严重时更会影响天线的波瓣指向。因此,全流程精度分配与控制是大型相控阵雷达精度控制与保形的关键技术之一。

全流程精度分配通常采用误差流分析技术[6]。误差流是指产品各种质量特性误差以产品本身为载体,随工艺路线转化在各工序进行传递、转化、累积的过程,它反映了产品在制造过程中形态发生变化的过程。天线阵面精度分配须首先按照装配工艺链进行误差源分析和误差传递模型构建,然后优化分配关键零部件及各环节精度指标,最后进行严格的质量控制。

为了保证天线阵面安装精度,工程上通常在天线模块与骨架安装节点之间设计精度调整结构[7] [8] [9]。如图 4 所示,从上到下依次为天线阵面、调整机构、过渡块、过渡板、安装的基建基础。精度调整结构是保证阵面安装精度,消除安装基础变形、地基不均匀沉降等影响的关键环节。它不仅可以实现雷达在使用过程的精度调整,也能够有效地降低对安装基础的精度要求,降低了安装的难度。

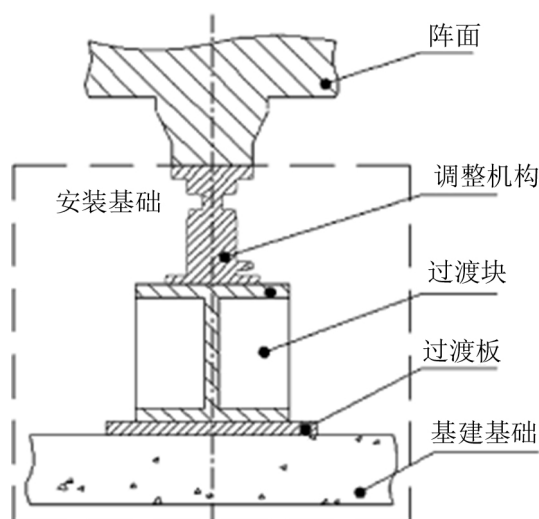


Figure 4. Installation drawing of antenna array

图 4. 天线阵子安装图

4. 大口径天线测量标定与变形补偿

雷达服役过程中, 温差、风载、自重等环境载荷引起的形变, 是雷达探测精度损失的重要因素。为了全寿命周期保形, 要解决测量标定和变形补偿两个难题。

全站仪是当前大型相控阵雷达常见的测量手段[10]。如图 5 所示, 全站仪测量系统组成由计算机、全站仪及测量靶标组成。全站仪发射出的棱形光束照射到高反光片或者棱镜上, 光沿原路返回, 被 CCD 传感器接收, 上传至上位机。由图像处理算法记录此时测量目标点相对测量系统的倾斜距离、水平角和俯仰角, 经过直角坐标系与球坐标系的转换获得目标点的三维坐标值。

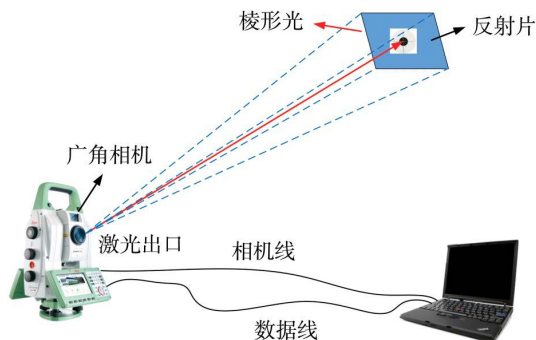


Figure 5. Total station instrument system
图 5. 全站仪测量系统

受环境影响, 现有的测量手段工作量大, 耗时长, 只能用于天线初始装配和特定工况下的测量标定, 不能用于天线阵面变形在线监测。所以基于神经网络的天线阵面变形预测技术成为当前研究热点。以有限工况下变形测量数据为验证集, 修正大口径天线有限元仿真模型关键参数, 提升天线阵面变形仿真精度, 将仿真结果作为训练集, 构建基于神经网络模型的天线阵面变形预测模型, 可以实现随机载荷作用下阵面变形在线预测。

基于神经网络预测模型, 研究风载、温度载荷以及自重等载荷对天线变形的影响, 确定载荷预警阈值, 向雷达电讯系统发出报警和电性能补偿请求。根据变形预测数据进行机电耦合仿真, 制定基于直接调相法的电性能补偿策略, 传给电讯系统进行实时相位补偿, 消除了结构变形对电讯能的影响, 保障了雷达探测精度。

5. 结束语

大型相控阵雷达研制是一项复杂的系统工程, 涉及机械、控制、测量、制造等多个领域, 覆盖方案设计、工艺、制造、检测、使用、维护维修等生命周期的各个阶段, 全寿命周期保形是关键问题。针对该问题, 本文首先介绍了大型相控阵雷达研制特点, 提出了大口径天线轻薄设计评估、全流程精度分配与控制、以及大口径天线测量标定与变形补偿等关键技术, 解决了大型相控阵雷达高精度控制与全寿命周期保形技术难题, 已成功应用于多型雷达的研制。

基金项目

装备预研领域基金项目(JZX7Y20190253042101)。

参考文献

- [1] 查金水, 张根烜, 彭超. 大型相控阵雷达天线骨架外场架设[J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(1): 112-118.

-
- [2] 邵春生. 相控阵雷达研究现状与发展趋势[J]. 现代雷达, 2016, 38(6): 1-12.
 - [3] 赵希芳, 沈文军, 马利华. 大型天线阵面平面度分析与控制[J]. 电子机械工程, 2014, 30(2): 37-39.
 - [4] 苏力争, 李智, 刘继鹏, 白云飞, 徐向阳. 大型相控阵雷达天线阵面结构精度分析及控制[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(2): 75-79.
 - [5] 王从思, 段宝岩, 仇原鹰. 天线表面误差的精确计算方法及电性能分析[J]. 电波科学学报, 2006, 21(3): 403-409.
 - [6] 罗阵璧, 汪劲松. 制造过程加工误差流及其模型的研究[J]. 机械工程学报, 1994, 30(1): 112-118.
 - [7] 梅启元, 等. 一种大型相控阵雷达阵面的安装调整方法[J]. 电子机械工程, 2014, 30(6): 36-39.
 - [8] 杨阵宙, 机动式空馈相控阵测量雷达结构误差的分析[J]. 电子机械工程, 2007, 23(4): 10-13.
 - [9] 徐正. 大型固定式相控阵雷达阵面安装方式研究[J]. 电子机械工程, 2019, 35(2): 54-64.
 - [10] 董琦, 孙昊, 谭凯龙, 宋帆, 王亚非. 基于全站仪的大型雷达阵面重构技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(3): 59-64.