

doi: 10. 11823/j. issn. 1674 - 5795. 2015. 06. 05

基于光子技术的相控阵雷达天线现场校准技术

盛永鑫, 田晓光

(中国电子科技集团公司第 38 研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 为了保证相控阵雷达的性能, 它的天线现场校准越来越受到重视。本文首先介绍相控阵雷达天线现场校准的现状, 提出目前存在的问题。然后分析光学电磁场探测技术优势, 阐述基于光子技术的相控阵雷达天线现场校准实现的可行性, 建立了现场校准装置。通过实验验证, 该技术能实现对相控阵雷达天线现场校准, 具有高精度, 对天线的辐射场的影响较小, 能满足相控阵雷达天线现场校准要求。

关键词: 光子技术; 相控阵雷达天线; 现场校准

中图分类号: TB97; TN95

文献标识码: A

文章编号: 1674 - 5795(2015)06 - 0020 - 04

On-site Calibration of Phased Array Radar Antennas Based on Optical Technology

SHENG Yongxin, TIAN Xiaoguang

(CETC No. 38 Research Institute, Hefei 230031, China)

Abstract: The on-site calibration of antennas is getting much more attention now because it can greatly impact the performance of the phased array radar. This paper introduces the current situation of on-site calibration of antennas and puts forward some existent problems. It focuses on analysing the advantages of optical-electromagnetic field detect technique and proving on-site calibration of phased array radar antennas based on optical technology is entirely feasible, by building the on-site calibration device and doing some experiments. With this technology, parameters of phased array radar antennas can be calibrated accurately with less impact on radiation field of antennas. It can meet the requirements of the on-site calibration of phased array radar antennas.

Key words: optical technology; phased array radar antenna; on-site calibration

0 引言

相控阵雷达摆脱了传统雷达机械伺服控制系统机械惯性大、精度差、速度慢等问题, 将雷达的搜索跟踪反应时间提高了数万倍, 因此相控阵雷达代表了雷达的发展趋势并在许多军事领域扮演着关键的角色。我国的相控阵雷达技术日益成熟, 但随着雷达的功能越来越强大, 结构变得更加复杂, 天线阵元的数量也成倍地增加, 相控阵雷达天线整体的性能强烈依赖于天线各阵元的性能, 特别是天线阵元的幅相特性及各阵元之间的一致性; 因此对天线各阵元进行幅相校准是保证相控阵雷达性能的重要环节, 开展相应的校准技术研究及校准装置研制具有重要的科学意义和现实需求性。

1 相控阵雷达天线校准现状

通常相控阵雷达天线在设计生产完成后需要在微

波暗室中进行测量, 但一方面, 微波暗室室内检测与天线实际使用环境存在较大差异, 因此在雷达的工作环境中对雷达天线进行现场测量与校准对掌握雷达的实际性能参数是十分必要的; 另一方面, 相控阵雷达天线在实际使用中不可避免地会面临雷达快速拆撤、转移场地后进行快速布设, 必须进行现场校准的情况; 此外, 服役状态的天线在长期工作后将产生器件老化、热变形以及机械形变等问题, 引起天线的幅相误差, 因此在天线的整个服役生命周期中, 都需要对天线进行定期的现场测量与校准。利用微波暗室方法是不现实的, 因此非常需要一种更为精确的可溯源的现场标定校准装置来对相控阵雷达天线进行现场校准, 这就需要用到近场测量校准技术。在近场测量中, 接收天线作为探测器被放在被测天线阵的近场区域, 并对被测天线进行校准。通常使用的近场接收天线有开口波导、偶极子、喇叭天线等。然而在近场使用这些金属结构的天线会带来限制^[1-2]。

金属天线在被测天线阵近场的出现会引起许多不希望有的效应。金属天线会干扰天线阵的正常近场分布,

收稿日期: 2015 - 09 - 29; 修回日期: 2015 - 10 - 12

作者简介: 盛永鑫(1979 -), 男, 主要从事雷达测试与计量保障技术研究。

对被测场的幅度和相位分布产生扭曲,为了减小因为金属结构的出现所带来的副作用,测量天线需要被经过精心设计的吸波材料所包围,还需要被放在至少离被测天线阵几个波长远的地方,并且通过多次测试进行修正以消除影响。

当使用从单个天线的校准技术发展而来的方法时,天线阵通常被当作一个大天线来进行校准,而天线阵中各个阵元的工作细节是探测不到的。这一方面是因为测量天线的空间分辨力有限,另一方面是因为无法把测量天线放到离天线阵口径场足够近的地方而不对被测场造成任何影响。作为结果,从天线阵近场测量中得到的信息被局限于对天线阵的一个整体的轮廓式的描述,但是却不能发现天线阵内任何阵元单独的行为以及阵元间的相互耦合,而这些信息对正确地校准和优化相控阵天线却又极具价值,因为在相控阵天线中,雷达波的发射和接收行为归根到底是由组成天线阵的每个阵元的发射和接收行为来决定的。

金属天线及信号电缆易受外界电磁干扰,而且对天线阵的近场测量需要较大的空间和相当重的设备,所以不适于对相控阵天线进行现场校准。

为了对复杂、大尺寸的相控阵雷达天线进行准确的校准和性能评估,一种灵活轻便的、能够看清楚天线阵细节特征,甚至是能够分辨单个阵元幅相信息的校准方法是高度期望的。如此以来,就能够评估由每个单独的天线阵元的行为累积起来所体现的整个阵列的性能。采用这种途径,人们不仅能够对整个阵列的性能进行评估,而且能够研究对天线阵的整体性能做出贡献的每一个因素及每一个细节。得到了这些细节,就可以对每个天线阵元的诸如相位等参数进行单独的调节,从而纠正相位偏移等问题^[3]。

2 基于光子技术的相控阵雷达天线现场校准

一种适合近场天线阵校准并且能够替代传统金属天线的技术是光学电磁场探测技术。与传统的基于金属天线的近场测量不同的是,光学探测方法利用了激光光束的光学属性的改变来探测被测天线的近场幅度和相位信息。把电磁场信息转换成光学信息的传感探头是由微型的电介质晶体材料粘附在一根单模光纤的底部而构成的。

光学电磁场探测技术用于相控阵雷达天线系统的校准有着诸多的优点:

1)对被测场的干扰小。因为光学电磁场探针由非金属、低介电常数、小物理尺寸的晶体材料构成,对微波和毫米波基本上是透明的,所以能够被放在离待测的相控阵天线非常近的位置而不会对被测场造成干扰。

2)空间分辨力高。光学方法的空间分辨力由激光光束和被测电磁场在光学探针里的相互作用区域的尺寸来决定,通常是直径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的一个圆形区域。这一空间分辨力可以轻易地区分从每一个单独的天线阵元发出的信号,从而得到每一阵元的幅度和相位信息。

3)不受外界环境的电磁干扰。从光学探针传递回来的信号是以光的形式通过光纤来传输,所以信号传输通道本身完全不受来自被测天线的任何电磁干扰。而控制系统可以被放在离被测场很远的地方并通过光纤与光学探针相连,也不会受到电磁干扰的影响,从而保证了测量的准确性。

4)光学探针的物理尺寸小于 1 mm 。多个探针可以轻易地组成探针阵列,且体积小,重量轻,使得校准可以在非常小的空间范围内进行,具有很高的机械灵活性。

5)工作带宽大。电磁场与光的相互作用是一个极快的物理现象,理论上它能够对高于太赫兹的频率做出响应。同一根光学探针就可以覆盖从直流到超过 100 GHz 的频率测量范围。因此一套基于光学的校准系统能够同时满足各种不同频段的相控阵雷达天线的校准需求^[4]。

这些优点决定了光学电磁场探测探针非常适合于对相控阵雷达天线进行校准。光学电磁场探针阵列与后端连接的光学校准主系统一起便构成了一个完整的相控阵雷达天线的校准装置。这一新型的基于光子技术的校准装置充分利用了光学电磁场探针对被测场的干扰小、测量精度高、空间分辨力高、体积小等特点,通过对相控阵天线的近场幅度和相位的精确测量,实现对相控阵天线工作模式下的校准和功效评估。

目前,美国、日本、韩国和法国也在开展类似的工作。我国在光学电磁场测量领域的研究较少,报道中还没有出现这一技术用于相控阵天线的校准测量。

3 基于光电技术的相控阵雷达天线现场校准原理

基于光电技术的相控阵雷达天线现场校准系统原

理图如图 1 所示, 其主要包括校准装置主系统、光学探针阵列、系统主机与系统控制软件。其中校准装置主系统是整套设备的信息传输、处理以及控制中心; 光学探针阵列是装置的电磁场接收感应前端; 而系统主机与控制软件负责人机交互的界面和通信连接以及后台的数据处理计算。

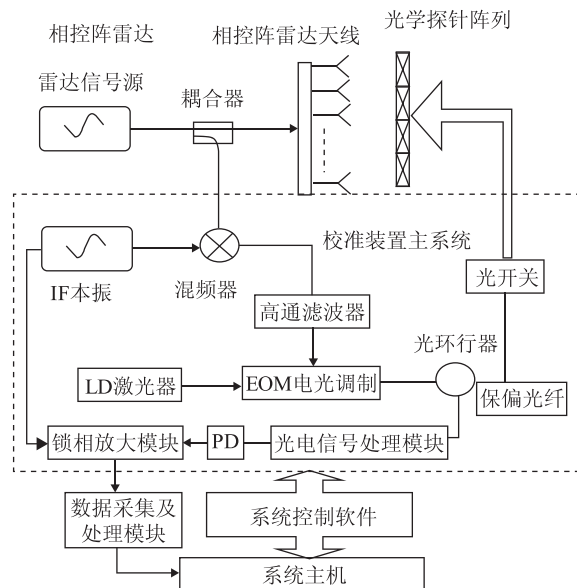


图 1 基于光电技术的相控阵雷达天线校准系统原理框图

校准装置主系统具体可提供光传输链路、偏振态控制、光电变换、外差检测、信号处理以及光路选择等功能。如图 1 所示, 雷达信号源发出的微波信号通过功分器分出部分能量进入校准装置主系统, 并与低相噪振荡器产生的低频信号 IF 进行混频, 混频器选择工作在 X 波段的单边带低噪声系数混频器, 混频后的信号经过一个高通滤波器后滤掉 IF 信号, 再经过放大器放大后进入电光调制器加载到光路上。另外, IF 信号的一部分被分出并导入锁相放大器的参考通道作为参考信号。在光学链路中, 激光器输出的激光经过高速的电光调制器, 加载了雷达射频信号与 IF 信号的混频信号 ($RF + IF$)。经过电光调制器的激光光束经过一个光学光环行器后被导入光开关, 在系统软件的控制下, 光开关进行快速切换将光束导入到与之相连的光学电磁场接收探针阵列中的任一探针单元。在光学接收探针里, 电光晶体将感应到的天线辐射近场信号 RF 加载到已经被调制了的激光光束上 ($RF + IF$), 即在电光晶体中产生混频作用, 产生的差频信号 IF 正好等于低噪信号源提供的 IF 信号频率。可以看出, 光学接收探针在这里扮演了两个角色, 一是电磁场的接收天线, 二是混频器。从光学接

收探针端面返回的光束经过同样的路径再回到光学主系统中, 然后经由光电信号处理模块进行偏振解调, 再经过 PD 转变为电信号后被导入锁相放大模块的信号通道。在锁相放大器模块中, 从光学系统传回的 IF 信号与振荡器提供的参考信号进行比相和放大, 最后给出被测电磁场的相对幅度和相对相位信息数据, 这些数据由数据采集及处理模块提取处理并送入主机系统进行进一步的数据处理^[5-6]。

4 基于光电技术的相控阵雷达天线现场校准实验验证

国内 X 波段的相控雷达广泛使用在预警探测、目标监视、微波成像、大气海洋环境探测、通信卫星等领域, 为了验证基于光电技术的相控阵雷达天线现场校准可行性, 设计了 X 波段 4×4 光学探针阵列的校准系统。

采用探针阵列的方式可以避免现场校准中的扫描过程, 但为了精确定位各个探针的位置以抑制探针位置差异引入的各天线单元辐射相对相位误差, 必须设计精确的安装架, 为了达到快速现场校准的目的, 我们设计可固化在相控阵天线上的安装架(如图 2 所示)。安装支架由绝缘材料构成, 两端可以固定在雷达天线上, 从支架上伸出固定臂, 利用卡扣将光学探针固定在雷达天线阵元上方。安装支架一体成型, 具有很高的定位精度, 并且可以保证各探针之间的位置一致性和高度一致性。固定架结构简单且由绝缘介质材料构成, 可固定安装在相控阵雷达天线上, 易于探针的快速安装定位, 保证现场快速校准的要求。

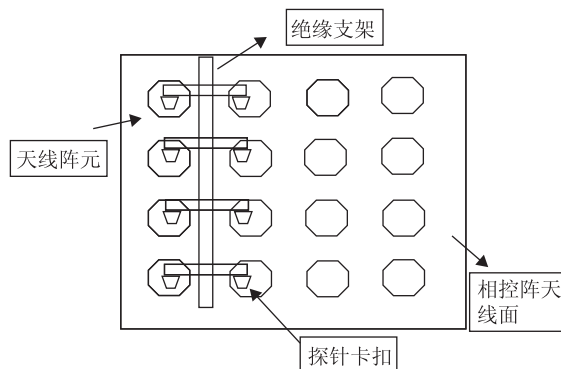


图 2 探针阵列安装示意图

通过本系统校准 X 波段相控阵雷达天线, 天线单元的幅度和相位校准精度优于传统的校准方法。通过实验验证, 幅度测量准确度为 0.35 dB, 相位测量准确度为 2.0° 。具体数据如表 1 和表 2 所示。

表 1 幅度测量准确度验证数据

频率/GHz	标称值/dB	实测值/dB	误差/dB
9.5	1	0.90	0.10
	4	3.85	0.15
	8	7.82	0.18
	16	15.74	0.26
	31.5	31.15	0.35

表 2 相位测量准确度验证数据

频率/GHz	标称值/(°)	实测值/(°)	误差/(°)
9.5	11.25	9.71	1.54
	22.5	21.03	1.47
	45.0	43.27	1.73
	90.0	88.14	1.86
	180.0	178.03	1.97

本系统已应用到机载成像雷达天线系统校准。通过安装在天线上，快速直接测量每个阵列单元的幅相信息，进行幅相校准标定修正。通过本方法校准天线系统后，大幅提升了雷达的指向精度和副瓣电平等重要指标。

5 结 论

针对相控阵雷达天线的现场校准需求，开展基于

光子技术的相控阵雷达天线现场校准方法的研究，利用光学电磁场探针对被测场的干扰小、测量精度高、空间分辨力高、体积小等优点，建立基于光子技术的相控阵雷达天线现场校准装置，通过对相控阵天线的近场幅度和相位的精确测量，实现对相控阵天线工作模式下的校准和功效评估，满足相控阵雷达天线现场校准的需要。

参 考 文 献

[1] 李宏，薛冰．相控阵天线的测试技术[J]．中国测试技术，2003(9)：10－11.
[2] 张云．相控阵天线近场幅相校准[J]．中国电子科学研究院学报，2007(9)：611－612.
[3] 楼世平，薛正辉，杨什明，等．天线时域平面近场测试实验系统的研究[J]．微波学报，2006(6)：48－49.
[4] 王奇峰．光纤磁场传感器换能器及系统研究[D]．成都：电子科技大学，2005.
[5] 黄春阳．三维电场矢量微波光子检测器集成天线的设计与优化[D]．成都：电子科技大学，2011.
[6] 田晓光．基于飞秒激光激励半导体材料的太赫兹源与探测技术[D]．武汉：华中科技大学，2011.



《宇航计测技术》2015 年第 6 期目次

级间开缝间隙传感器动态测试方法研究
特高压线路干扰下无线电罗盘测角误差分析
一种双冗余 LVDT 式位移传感器设计
导航星座自主运行平行系统的轨道计算方法
基于激光测距的飞艇净重在线计算方法研究
关于角度量列为基本量的探讨
轨姿控发动机动态推力与推力矢量测试系统研制
直管和弯管比较下的疲劳试验台稳定性的研究
基于双力源的叠加式多维力传感器校准装置研究
称重法低温介质流量校验系统方案研究
改进小波阈值去噪法在管道泄漏检测中的应用
砵码校准能力验证方案的设计
压力传感器单电源调理电路技术研究
卫星扩频信号抗窄带干扰性能限研究
装备时延校准及监控技术研究
无人直升机舰上自主起降设计及实现
伺服系统用反馈电位计故障分析及对策
一种多通道电子负载器的设计

PSO 神经网络在光电探测设备故障诊断中的应用

新书《聚焦超级核能》锁定核辐射及其计量

本刊讯：2011 年 3 月 11 日，日本大地震、海啸引发的核泄漏事件吸引了全世界对核安全的关注，人们不得不再次对核能的研发和利用进行全面的思考。为了让更多的读者了解核方面的知识和发展现状，了解核辐射的来源、特点、危害和防护，作者容超凡（国防科技工业电离辐射一级计量站原副站长）历时两年编著了《聚焦超级核能》一书，现已由北京出版社出版，全国新华书店经销。此书是北京市科技协会组织编写的系列科普丛书“科学家在做什么”中的一个分册，全书共 4 章，其中第 3 章详细介绍了核辐射的准确测量问题，从核辐射测量什么、核辐射与物质的相互作用、测量所用设备、测量仪器的检定和校准、测量结果的准确表述等方面做了通俗易懂的讲解，阅读这本书，对于从事计量测试技术的科研人员定能有所收获。