

· 天馈伺系统 ·

中图分类号: TN82

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2011)04-0070-04

一种高集成机载有源相控阵天线系统

夏琛海,牛宝君

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:未来先进战机需要配装多功能有源相控阵雷达已是业界共识,研究解决机载环境下有源相控阵天线的工程技术难题是工程师的共同愿望。从机载应用环境对装机天线体积、重量等方面苛刻要求出发,介绍了一种简捷可行的有源相控阵天线系统技术构型方案,重点对线阵架构以及由此引入的对天线性能的影响因素进行了理论分析,提出了解决方法。研制出一套具有 1152 个 T/R 通道的试验天线系统,试验结果证明了该设计方案的可行性和理论分析的正确性。

关键词:高集成度;有源相控阵;天线架构;线阵

A Kind of Active Phased Array System with High Density Architecture

XIA Chen-hai, NIU Bao-jun

(Nanjing Research Institute of Electronics and Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: The future needs of the advanced fighters equipped with multi-function phased array radar is an industry consensus, study and solve the active phased array antenna engineering problems with airborne environment, is the common aspiration of the industry engineers. A simple and feasible active phased array antenna system of technical configuration is described, and analyzed for airborne applications installed antennas on the size, weight, power consumption and stringent reliability requirements and other aspects, focusing on the “linear sub-array” layout. Designed and built an 1152 T/R channel testing antenna system, test it individual and test it with flying radar, results fully demonstrate the engineering feasibility of the design.

Key words: high-density; active phased array; antenna architecture design; linear sub-array

0 引言

自 20 世纪 70 年代初,美国休斯公司成功研制出第一部机载脉冲多普勒火控雷达 AWG-9 并装备于 F-14 飞机开始,机载火控雷达经过了数十年的发展,对机载作战平台充分发挥作战效能的独特作用和无可替代的重要地位已为业界广泛认知,机载火控雷达已经成为先进战机的核心传感器。有源相控阵雷达是未来先进战机最重要的射频传感器,担负着战场态势感知以夺取信息优势,对空、对地、对海侦察和目标数据测量,配合武器实施空中拦截和空地、空海精确打击等任务,是其作战能力的倍增器^[1]。

自 20 世纪 90 年代始,随着有源相控阵天线技术的快速发展,其高功率、高效率的本质特征为大幅度提升雷达作用距离提供了最有效的技术途径,为远程空空导弹的跟踪制导提供了可能,实现了探测与打击的能力匹配。由于采用有源相控阵体制,使得天线系统在可靠性、隐身性、抗干扰能力和多目标攻击能力等方面有大幅度提升。另外,由于高集成设计方式,使得天

线系统在提供强大的输出功率的情况下,也能够实现小型化、轻量化,满足战机头部狭小的安装空间和苛刻的重量要求。因此,多功能有源相控阵天线系统为未来先进战机达到高性能作战使命提供了重要技术保障。当然,研制用于先进战机的多功能有源相控阵天线绝非易事,必须依赖国家基础工业,尤其是电子工业和先进制造业的技术进步^[2]。

放眼国际,美国无疑是这场竞争的领跑者。目前,美国已成功研制并装备了多个型号的有源相控阵雷达,如 APG-77 雷达(搭载于 F-22)、APG-81 雷达(搭载于 F-35)、APG-79 雷达(搭载于 F/A-18E/F)等。欧洲和俄罗斯也紧随其后,先后研制出了多种版本的有源相控阵雷达系统。这些雷达系统采用的先进有源相控阵天线,采用的技术路径不尽相同,各有千秋。不同国家由于技术基础不同,采用的雷达构型也不同。因此,作为有源雷达标志性特征的有源相控阵天线,其构型自然也不会相同。

本文将介绍一种简捷可行的机载有源相控阵天线系统的技术构型方案,该方案以线阵为主要特征,对于天线如何减轻重量,缩减体积,同时保持性能的最优进行了研究。最后,根据该方案架构研制出一套试验

天线系统,试验结果证明了该方案的可行性。

1 设计思路

1.1 约束条件分析

现代战机机头放置的雷达天线的位置直径为1 m左右的梯形圆台,可利用的空间并不大。作为机载设备,重量的减轻是重要的追求目标。对有源相控阵来说,其热流密度高,能耗大,设计中必须要充分考虑飞机自身的能量供给能力和散热能力。再者,机头内部工作环境恶劣,震动、温度变化和气压变化等条件相当严格,对天线的可靠性要求比地面雷达高。

除此以外,天线采用的技术还须先进、成熟、合理。先进,才能够满足一个较长时期内的作战需求;成熟,才能保证雷达天线的大批量可生产性;合理,才能在各种约束条件的基础上具有最佳的可行性。种种因素迫使设计中必须电性能、热设计、结构一体化并行设计,采用系统工程方法,不断优化直至得到最佳方案。

为了追求最大作用距离,在考虑雷达波的大气衰减和尽可能大的天线增益的情况下,机头雷达天线通常工作在X波段(8 GHz~12 GHz),并要求很宽的扫描范围(圆锥120°角)。根据阵列天线的理论,扫描不出现栅瓣则必须满足单元间距: $d \leq \lambda / (1 + \sin\theta)$ 。因此,单元间距只有大约 $0.53 \lambda_b$,其中 λ_b 代表天线工作的最大波长。按此间距,试验天线系统在零点几平方米内排列1152个天线单元,每个单元对应着一组有源收发电路,所有组件满功率工作时能耗可达10 kW。

要将大量这样的器件适当的安装在狭小的空间内同时还要能够正常工作并完成多种功能,无疑是一个复杂的问题。以下2点始终是设计中的重要原则:

1)从整体的角度,要对各个组成部件进行高集成度的一体化设计;

2)从组成部件的设计角度来看,要使各个部件自身尽可能重量轻、小型化、高可靠。

有源天线阵主要有“砖块式”和“瓦片式”2种排列结构。“砖块式”结构的组件电路垂直于口径面;“瓦片式”结构的组件电路平行于口径面。目前技术在如此小的单个通道面积内还无法做出成熟可靠的产品来。所以,试验阵只能选择“砖块式”结构。

1.2 T/R 组件体积和重量的缩减

T/R组件是天线核心器件,且数量多、占体积比例大。因此,必须实现小型化,选择集成化程度高的元器件并进行高密度的微电路封装,与器件性能和制造工艺水平密切相关。T/R组件中除了收放放大器件外还有移相器、衰减器以及其控制器件。放大器、移相器、

衰减器等微波器件采用GaAs制造的集成度高的MMIC器件,控制器采用专用ASIC芯片,尽量缩减体积。依据现有的LTCC技术和器件制造出的组件,其单个通道尺寸几乎已达到极限^[3]。

为了进一步缩减其体积重量,考虑把多个通道合为一体,就可以节省封装壳体侧壁金属的厚度和重量,例如2个通道合并就可以减少2块侧壁,图1为不同数量通道合并后每个通道平均重量缩减率曲线。

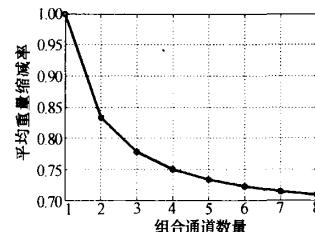


图1 多联组件通道数与重量缩减率

选取4个通道做成一个模块,就可将每个通道的平均重量压缩到单个模块的75%,再增加模块合并通道数,曲线虽然还会继续下降但效果不再明显。

1.3 线阵架构

在各排“砖块”状排列的组件之间放置热交换器并使之紧贴组件,传导出T/R组件工作时产生的大量热量,使得器件始终在额定的环境中工作。冷板内部含有液体冷却通道,采用强迫液体冷却满足高热流密度热能的转移需求,从而提高天线的可靠性^[4]。考虑到天线单元是垂直放置的。因此,综合种种因素,天线系统采取如下方案。

在冷板的两面贴装4联T/R组件,再加上射频、控制和电源网络,形成线阵;由若干这样的线阵构成整个阵面。线阵组成如图2所示。

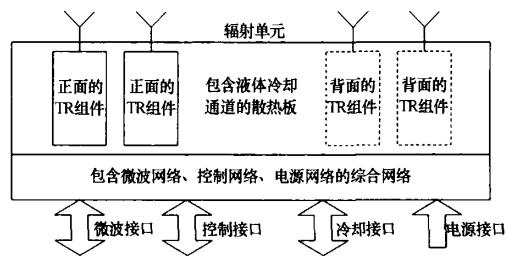


图2 有源相控阵天线基本架构(线阵的组成)

对于圆形的天线口径面,线阵可分为不同的几个品种,应在保证天线性能的基础上尽量减少线阵的品种。每个品种除了长度不同,包含的组件数量有区别之外,其它无区别,避免重复设计。每条线阵是一个相对独立的模块,可以单独进行调试,最后组装为整个天

线。如果出现故障,也可以方便地拆卸任一线阵进行测试和维护,实现部件级的外场可更换维修。

采用不同长度的线阵,可以方便地根据不同的飞机的装机要求组合形成新阵面,满足不同尺寸的天线设计需求,设计可重构性、可测试性和可维护性与传统天线比优势明显,如图3所示。

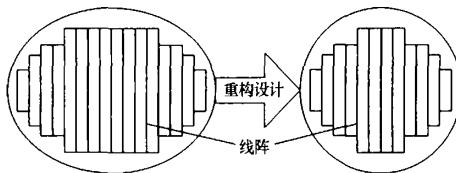


图3 有源相控阵天线可裁减设计重构
(天线阵面前视,以不同规模的线阵为基础形成不同的阵面)

2 天线性能分析

到目前为止,基于体积重量、可重构、可测试性和

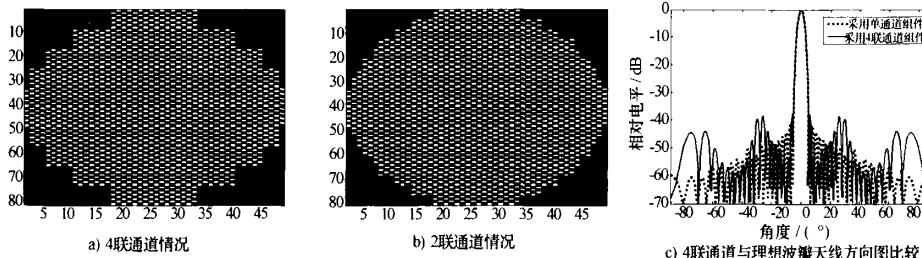


图4 边缘切角及由此引入的量化瓣

仿真发现,俯仰面有比较大的副瓣抬起,这是由于俯仰面周围的切角都是以4联单元的长度为周期的,形成了切角量化瓣,主要在主切面出现,影响天线阵面低副瓣性能,而且只要采用多通道组件就会出现这样的现象。

对比采用4联组件的分布、采用2联组件的分布和单通道组件的分布,仿真计算得到如下的结果,见表1。

表1 采用不同通道模块的副瓣性能分析

采用组件	最大副瓣(dB)	平均副瓣(dB)
单通道	-41.49	-60.09
2联	-43.76	-59.61
4联	-37.9	-58.92
8联	-30.29	-57.55

从表1可以看到,如果采用2联通道就可以将边缘切角量化的问题基本解决,从图1可见,2联组件重量减轻只有17%左右,综合考虑以上因素,可以主要采用4联组件,在边缘位置采用若干2联组件补上较大的切角,就可以获得性能和减重的最佳平衡。而作为对比的8联通道则会带来比较大的副瓣抬高,这也从另一个角度证明主要选取4联组件是合适的。

可维护性等设计原则基本确定了天线的架构。对这种新的架构引入的天线性能影响及优化设计进行阐述。

根据阵列天线理论,对天线方向图的仿真分析采用如下公式^[5]

$$E(\theta, \varphi) = f_c(\theta, \varphi) F_a(\theta, \varphi) \quad (1)$$

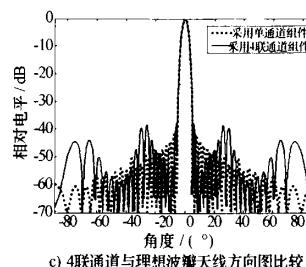
式中: $f_c(\theta, \varphi)$ 代表天线辐射单元方向图; $F_a(\theta, \varphi)$ 代表阵因子。

$$F(\theta, \varphi) = \sum_m \sum_n I_{mn} \exp[jk(m d_x \cos\varphi + n d_y \sin\varphi) \sin\theta - j\varphi_{mn}] \quad (2)$$

式中: I_{mn} 代表电流分布; d_x, d_y 代表单元间距。其中,式(1)是规则排列的天线阵列方向图计算公式;式(2)是阵因子的计算公式。

2.1 边缘切角量化瓣现象及补偿

由于采用4联通道的T/R组件,在天线口径面分布不得不对圆形的阵面采取较大的切角,如图4所示。



2.2 列-列间距误差控制

1条线阵包含2列天线单元,在同一条线阵内,其间距往往可以控制得很好,而不同线阵之间是通过整体框架的精度来保证的,如果这时误差控制得不好,天线单元的列间距就会出现整体误差。这种位置精度的差别可以归结为列间的相位差,对于天线性能尤其是扫描状态下的天线波瓣有影响。

考虑一种极端的情况,每条线阵都具有固定的安装误差,则在扫描的情况下将出现方位面扫描栅瓣,以扫描-45°为例,通过计算可知,要把扫描45°的副瓣控制在-30 dB以下,控制安装误差要力争达到±0.1 mm。当误差是一个随机量时,其控制要求可望宽松一些,见表2。

表2 扫描-45°时安装误差对副瓣影响分析

安装误差(mm)	扫描栅瓣(dB)	扫描栅瓣位置(°)
0.1	-35.18	16.68
0.2	-29.23	16.92
0.3	-25.13	16.92
0.4	-23.22	16.92
0.5	-20.63	16.92

2.3 列馈网络之间的不一致性控制

线阵组成的阵面采用先列馈后行馈的波束形成网络,即:线阵垂直放置,在线阵中用列馈连接各T/R组件总口,在所有线阵后面用行馈连接各列馈,形成4个象限的总接口,再连接一套和差形成网络,从而形成发射波束以及接收的和、差波束。组成圆阵的线阵必然有不同的长度,为了保证每个通道信号等电长度需要进行补偿,在这一过程中可能带来误差。误差主要有3种:

1)不同长度的列馈之间在设计和加工中产生的固定误差。由于阵面左右完全对称,各个品种线阵数量一样,因此不会影响差波瓣零深,但对未修正的和波束副瓣会有影响,将使得主瓣附近的副瓣与主瓣融合起来并抬高副瓣,如图5a所示;

2)列馈和行馈连接时,个别连接电缆长度出现偏差造成该列相位误差。考虑某一条列馈连接时出现了误差,则会破坏阵面的对称性,对方位面主平面的波束产生比较大的影响:和波束副瓣区域的零点被填平,差波束两峰不等,波束不对称。而且,靠口径面中心距离越近的影响越大,如图5b所示;

3)随机误差。

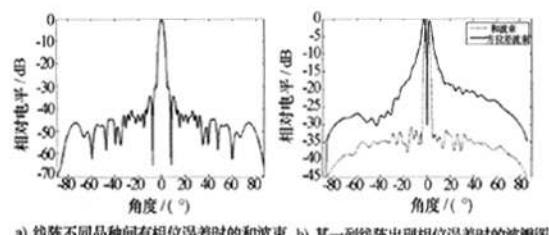


图5 列馈网络之间的不一致对波瓣的影响

为了避免出现上述情况,对列馈的相位误差进行了严格控制。同时,在全阵完成装配后进行了统一的修正,利用组件的初相对这一误差进行了补偿^[6]。

3 试验结果

经过校准后试验天线的副瓣电平达到优于-30dB的水平,各项功能和性能指标满足雷达的装机和使用要求。校准前后的测试结果波瓣图,如图6所示。

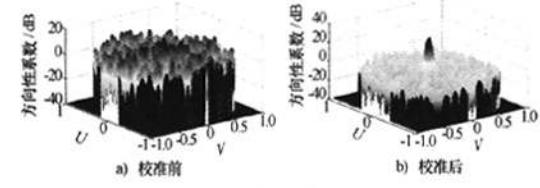


图6 校准前后的方向图比较

4 结语

在机载有源相控阵天线设计过程中,通过对各种约束条件、当前技术水平、当前器件和工艺制造水平的分析,提出了线阵为基础的基本体系架构,通过理论分析解决了由此引入的天线性能影响因素。研制成功工程实现性良好的试验天线阵,测试结果证明了方案的可行性和理论分析的正确性。

这种基于线阵的天线架构,体积重量比原单通道组件构成的天线大大缩减,可以方便地裁减或扩展,形成系列化天线产品,适应不同任务需求,而且便于测试维护,非常适合机载有源相控阵天线的快速设计。

高密度机载有源相控阵天线的设计方案随着应用的需求牵引正不断快速发展,诸如大瞬时宽带、天线阵面数字化、共形天线等技术的应用,新的材料和工艺制造技术的发展,新的器件的不断产生,后续工作将大有可为。

参 考 文 献

- [1] Feldle H P. State of the active phased array technology [C]// 2007 2nd International ITG Conference on Antennas, Munich: IEEE Press, 2007.
- [2] 刘华翔,朱荣昌. F-22 机载火控雷达系统研究[J]. 飞机设计, 2003, 23(1): 42~46, 52.
Liu Huaxiang, Zhu Rongchang. An analysis study on F-22 airborne fire control radar system [J]. Aircraft Design, 2003, 23(1): 42~46, 52.
- [3] Chio T H, Schaubert D H. Parameter study and design of wide-band widescan dual-polarized tapered slot antenna arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(6): 879~886.
- [4] 平丽浩. 雷达热控技术现状及发展方向[J]. 现代雷达, 2009, 31(5): 1~6.
Ping Lihao. Current status and development trends of thermal control technology for phased array radar system [J]. Modern Radar, 2009, 31(5): 1~6.
- [5] 王查散,朱瑞平,张宇驰. 宽带相控阵雷达的波控系统设计[J]. 现代雷达, 2009, 31(11): 17~19, 24.
Wang Chasan, Zhu Ruiping, Zhang Yuchi. Design of beam-steering system for wideband phased array radar [J]. Modern Radar, 2009, 31(11): 17~19, 24.
- [6] 夏琛海. 利用雷达自身设备实现有源相控阵天线监测与校准[D]. 南京:南京理工大学, 2008.
Xia Chenhai. Active phased array antenna calibration & monitoring using devices of radar [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.

夏琛海 男,1978年生,工程师。研究方向为有源相控阵天线系统。

牛宝君 男,1965年生,研究员。研究方向为有源相控阵天线系统,先后发表论文十余篇,曾获国防科学技术进步一等奖。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>