

低副瓣机载天线阵设计与实现

张万玉¹,伍 滨¹,张 刚²

(1.总装北京军代局驻石家庄地区军代室,河北 石家庄 050081;

2.上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室,上海 200240)

摘要:针对目前飞机系统中已有机载天线阵的副瓣性能指标无法满足系统电磁兼容特性,详细介绍了一种低副瓣 C 波段圆极化天线阵的结构设计和调试过程,提出一种全新消减天线单元间互耦的散射体设计方法和一种全新结构的三路功分器,通过构建相应的系统模型、仿真实验以及实物测试,验证了该设计的优越性,机载天线阵第一副瓣相对主瓣增益小-20 dB,有效提升了机载天线的电磁兼容特性。

关键词:电磁兼容;散射体设计;低副瓣天线;三路功分器

中图分类号: TN827+.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-3114(2014)04-60-4

Design and Realization of Low Sidelobe Airborne Antenna Array

ZHANG Wan-yu¹, WU Bin¹, ZHANG Zhao²

(1. Military Representative Office of Beijing Military Representative Bureau of PLA General Armament

Department Stationed in Shijiazhuang Region, Shijiazhuang Hebei 050081, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The sidelobe performance of current airborne antenna array in the aircraft systems cannot meet the electromagnetic compatibility characteristics. The structural design and debugging process of a low sidelobe C-band circularly polarized antenna array are introduced in detail. A new design method of scatterer to abate the mutual coupling between the antenna elements and a new structure of three-way splitters are proposed. The superiority of this design is verified by constructing the appropriate system model, simulation experiment and physical test. The first sidelobe gain is -20dB smaller than the main lobe. The electromagnetic compatibility characteristics of airborne antenna is effectively improved.

Key words: electromagnetic compatibility; scatterer design; low sidelobe antenna; three-way splitter

0 引言

随着电子信息技术的发展,作战区域的电磁环境越来越复杂,电子干扰威胁越来越严重。双方对电磁控制权的争夺,可以导致无线电电子设备不能正常工作、通信指挥失灵、雷达迷盲和电子制导失控等。随着技术的发展,要求机载雷达系统能够拥有更强的抗电子干扰、抗反辐射导弹、抗雷达探测、抗高速反舰导弹的低空和超低空打击的能力。阵列天线是解决上述问题的有效手段之一。为了有效对抗目标,提高雷达抗干扰的能力,都对雷达天线提出了低或超低副瓣阵的要求。目前,极低副瓣天线已

经成为高性能电子系统的一个重要组成部分,特别是雷达在有严重地物和电子干扰环境中有效地工作,必须采用副瓣尽可能低的天线。

以典型的中等规模 C 波段圆极化天线阵为例,选取 C 波段圆极化天线阵指标要求为工作中央频点 5.815 GHz、工作频段 5.715~5.915 GHz (VSWR<2.0),天线阵设计增益不小于 18 dBi, 主波束指向交叉极化抑制超过 15 dB, 低副瓣设计指标为第一副瓣相对主瓣增益小于-20 dB, 接下来详细介绍 C 波段圆极化天线阵的设计和调试过程、仿真分析结果以及实物测试结果。

1 天线阵结构设计

实现低副瓣天线阵的关键技术分别是性能良好的馈电网络和控制阵元间的互耦,参考类似天线阵馈电网络设计,发现绝大多数天线阵采用基本的 T 型枝节实现功分的功能,在设计馈电网络时采用馈电网络

收稿日期:2014-02-12

作者简介:张万玉(1988—),男,助理工程师。主要研究方向:改口设计与工程、雷达等。伍 滨(1978—),男,工程师。主要研究方向:雷达。张 刚(1988—),硕士。主要研究方向:飞行器设计与工程、机械振动等。

与天线阵元在金属地面的同一侧，并且网络分布于天线阵之中的布局方式，同时考虑到馈电网络关于x轴和y轴都成线对称，所以一般将馈电网络分成4个4×2单元小馈电网络分别设计，图1是初步设计结果，图中右侧虚线框所示均为功分枝节结构。

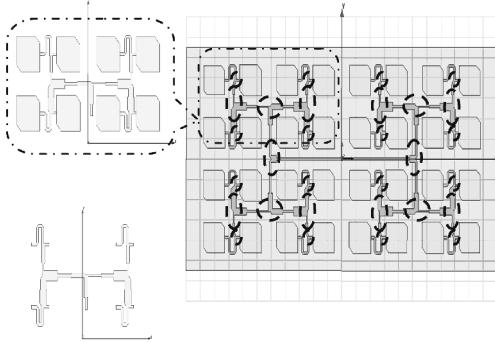


图1 常规天线阵馈电网络设计结果

在工程试验过程中经常发现该种设计的单元间距稍显局促，天线单元之间存在一定程度的互耦，而且馈电网络的可用空间太小，造成馈电网络和单元之间较强的互耦影响。同时为实现低副瓣指标，天线阵4个顶角的天线单元激励幅度应当非常微弱，然而实际上由于来自相邻单元和馈电网络的能量耦合，这4个单元的激励幅度大于理论值而且难以消减。为避免这种情况，本文尝试采用缺元阵的形式，即去掉四角的4个单元。在上述常规天线阵基础上去掉四角的4个单元后，由阵元方向图与阵因子相乘得到的阵方向图可见，低副瓣特性得到一定程度的改善，最重要的是消除了副瓣升高的隐患。

考虑到上述2个改进需求，在保留基本对称性的基础上，确定采用“6×4-4”单元天线阵结构，即在6×4单元结构基础上去掉四角的4个单元，单元间距取约 $3/4\lambda$ 。

2 新型功分器设计

在功分器的选择问题上，考虑到6×4单元天线阵若仅采用一分二功分器馈电网络结构将变得非常复杂，故在设计过程中开发了一款性能良好的一分三功分器。

目前广泛采用的三功分器有如下几类：①采用2个或2个以上二功分器级联构成三功分器；②采用与Wilkinson结构原理相近似的平面对称三功分器结构，通过合理设计隔离电阻值、采用宽度渐变微带线和采用耦合微带线等手段，抑制三路间的不平

衡，获得良好的功率等分性能和隔离性能；③采用扇形微带枝节和辐射状放置的电阻构成宽带多路功分结构；④由不同特征阻抗的微带线构成多端口网络，实现各端口良好的匹配和端口间的隔离，并由指定的端口完成三功分器的功能。

其中，第1类功分器能够较好产生所需比例的功率输出，实现各端口的匹配和输出端口间的隔离，但电路占用空间较多，微带线路路径较长，参数结果使用软件优化得到，且为提高隔离度而使用集总参数滤波器；第2、3类功分器匹配和隔离指标具佳，占用空间中等，通常用作等分输出，但外形较为复杂、所加电阻数目较多，通常参数较多且某些参数与设计指标间无显式的表达式，需通过数值计算和优化完成设计；第4类功分器各项指标较好，外形简单，参数较少且易于设计和优化，能够实现任意比例的功率输出，但占用空间稍大，约需要 $0.5\lambda \times 0.5\lambda$ 的空间，这在通常的天线阵馈电电路中是不能被接受的。

提出一种基于支线定向耦合器的新型微带线三分支功率分配器结构，该新型功分器由2个对称放置的支线定向耦合器组合而成；采用奇偶模激励方法结合传输线理论对该新型功分器的传输特性进行建模和分析，并据此给出该新型功分器主要参数的设计方法。通过与实物测试结果比较，可实现各端口的完全匹配以及端口间的高隔离度，结构简单紧凑，占用空间小，易于集成在微波电路系统和天线阵馈电系统之中。其结构立体效果图如图2所示，该结构可以看做由2个分支线定向耦合器组合而成。

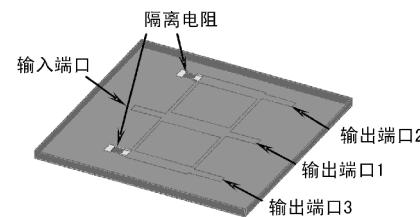


图2 新型一分三功分器结构立体效果图

当新型三路功分器设计成等功分器情况下各端口功分比例平均，该功分器匹配特性和端口隔离特性满足指标要求如图3所示。

新型三路功分器的应用较好解决了馈电网络的布局问题，明显简化的网络结构，避免出现馈电网络围绕某些单元旋转一周的强耦合结构，同时保证了馈电网络各端口良好的匹配和端口间的隔离性能，最大程度减弱由馈电网络引起反射和端口间的串

扰。通过调整馈电网络各端口的幅度和相位分布,最终得到了应用 Wilkinson 功分器、平行线耦合器和新型三功分器的初步馈电网络设计结果。

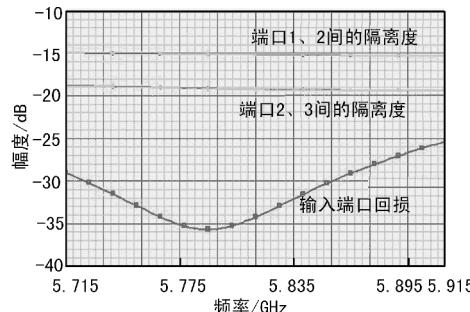


图 3 新型三路功分器匹配特性和端口隔离特性仿真曲线

3 消减互耦的散射体设计

采用在天线单元附近增加金属散射结构体的方法,改变天线单元周围的边界条件,并通过在散射体上设计接地电阻将耦合能量主动吸收,即金属散射体结合接地电阻,利用有耗的散射结构接收并消耗耦合能量。其中散射体不是通过金属过孔直接与地面相连,而是通过接地电阻与地面相连(也可以将散射体理解为一个微带天线,端口接有匹配负载吸收能量),同时金属散射体结构并不是近距离包围天线单元,而是仅在天线单元距离馈电网络较近的地方放置,该方法利用接匹配负载的散射体良好控制了天线单元与馈电网络间的互耦,在其他条件均相同的情况下,能够使天线阵的第一副瓣电平下降约 2 dB,而且不会破坏其辐射特性。

最终设计结果如图 4 所示,通过调试整个天线阵所有单元边长 15.2 mm,除中心四个单元切角边长为 2.4 mm 外,其余 16 个单元切角边长均为 2.6 mm。有一点需要注意,因原馈电网络中第一级圆形 Wilkinson 功分器占用空间太大导致距离天线单元过近,故采用圆滑的葫芦形替代。

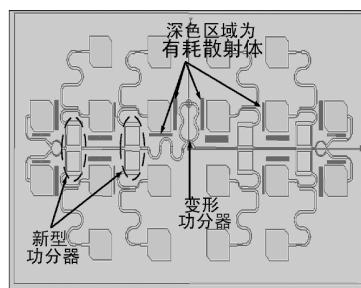


图 4 应用新型功分器和有耗散射体抑制互耦的天线阵设计结果示意图

4 仿真分析和实测结果

4.1 天线阵设计仿真结果

采用 Ansoft HFSS v10.0 对 C 波段圆极化天线阵进行建模,通过对天线阵的输入阻抗特性进行仿真分析可以看出天线阵在整个工作频段满足 $VSWR < 1.5$ 的指标,大部分工作频段满足 $VSWR < 1.35$ 。同时在天线阵中央频点处的辐射特性仿真结果中可以看出天线阵在最大辐射方向交叉极化抑制超过 16 dB,基本保持了天线单元的良好特性,在 $\varphi = 0^\circ$ 切面相对副瓣电平均低于 -24.5 dB,在 $\varphi = 90^\circ$ 切面主极化分量的相对副瓣电平均低于 -19.5 dB,较好实现预期设计指标,部分指标超额满足要求。美中不足的是 $\varphi = 90^\circ$ 切面第一副瓣处交叉极化分量较大,该问题虽不影响使用但值得进一步深入研究。在以上结果的基础上,本文分别仿真分析了 $\varphi = 0^\circ$ 切面二维直角坐标方向图、 $\varphi = 90^\circ$ 切面二维直角坐标方向图、 $\varphi = 0^\circ$ 切面二维极坐标方向图、 $\varphi = 90^\circ$ 切面二维极坐标方向图,证明了该天线阵方向性稳定,在整个工作频段起伏很小,完全满足指标要求。

4.2 天线阵实物测试结果

本方案选择国产双面覆铜微波板材(介电常数 2.55、板材厚度 1.8 mm、铜箔厚度 35 um)作为基材,采用 PCB 工艺加工制作,表面采用镀锡金(水金)工艺以提高导电率、减弱因金属趋肤效应引起的损耗。

天线阵采用同轴连接器背面馈电,通过同轴线接 SMA-F 型接口。通过对该低副瓣天线阵的阻抗特性实物测试,可以看出其 VSWR 特性与仿真设计结果稍有偏差,天线的谐振点(VSWR 最小的频点)在 5.715 GHz,稍低于设计指标中心频率约 100 MHz,相对偏差约 1.72%,在 5.715 GHz 处 $VSWR = 1.104$,5.815 GHz 处 $VSWR = 1.786$,在 5.915 GHz 处 $VSWR = 2.403$ 。如果不考虑中心频点的偏差,阻抗特性的绝对带宽($VSWR < 2.0$)约为 180 MHz,相对带宽为 3.15%。

阻抗特性测试值与设计值存在一定程度偏差,通常情况下主要是由于板材实际介电常数与标称值有一定差异导致的,这种误差可以通过几次“加工-测试-修正”的环节解决。

图 5 与图 6 为该低副瓣微带天线阵方向性的测试结果。从测试结果可以看出,该微带天线阵的辐射特性与计算仿真结果相当吻合,仅是在后瓣附近

与仿真结果稍有出入,应该是用于固定天线的测试软件对结果产生一定的影响。

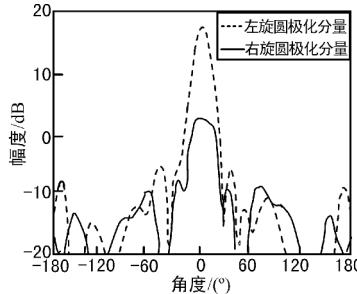


图 5 中央频点处 $\varphi=0^\circ$ 切面主极化与交叉极化分量方向图

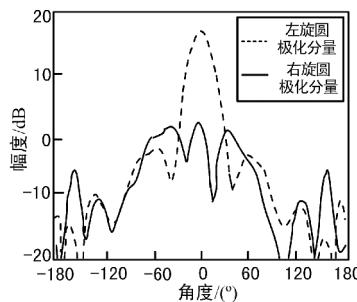


图 6 中央频点处 $\varphi=90^\circ$ 切面主极化与交叉极化分量方向图

在 $\varphi=0^\circ$ 切面,左旋圆极化分量的第一副瓣电平相对主瓣约为 -23 dB ;主瓣方向交叉极化抑制达 15 dB ;在 $\varphi=90^\circ$ 切面,左旋圆极化分量的第一副瓣电平相对主瓣约为 -18 dB 。

该低副瓣微带天线阵在 $\varphi=90^\circ$ 切面比 $\varphi=0^\circ$ 切面副瓣电平指标稍差,主要是由于天线阵在该方向仅有 4 个阵元,对波束控制能力有限造成的;而且外层天线单元都是由平行耦合线定向耦合器耦合出的能量馈电,该结构定向耦合器的耦合系数与板材参数密切相关,联系到之前 VSWR 测试结果分析,故可能是因为板材参数稍有偏差导致耦合系数与仿真

结果不一致,导致副瓣电平升高。

5 结束语

该新型低副瓣微带天线阵实现了预期的设计指标,研究成果能够应用于几乎所有频段的微带天线阵,低副瓣技术能够有效降低天线间的耦合,减少无意辐射造成电磁干扰的可能,增强机载天线间的电磁兼容性。除此以外,该技术对于微波电路和低副瓣天线阵、相控阵领域也具有较高的借鉴价值和参考价值。

参 考 文 献

- [1] 林泽祥,兰强.天线的电磁兼容技术[J].电波科学学报,2007(1):170-173.
- [2] 袁旭猛,王浩.机载天线电磁兼容技术分析[J].无线电通信技术,2011(4):40-42.
- [3] 程敏锋,刘学观.微带型 Wilkinson 功分器设计与实现[J].现代电子技术,2006(20):25-26.
- [4] 杨峰峰.微带功分器设计[J].舰船电子对抗,2012(4):69-72.
- [5] 张翼周,阮颖铮.低副瓣天线及多层天线罩一体化仿真[J].重庆邮电大学学报,2004(2):57-59.
- [6] 崔景波.一种宽带低剖面微带天线的设计仿真[J].通信对抗,2009(1):62-64.
- [7] 段鹏辉,郑会利.阵列天线的切比雪夫方向图综合[J].电子科技,2009(1):1-4,12.
- [8] 杨则南,江树刚,宴璎.机载微带天线阵列的辐射特性分析[J].微波学报,2012(S2):28-30.
- [9] 周旭冉,伍捍东,高宝建.C 波段定向共形微带天线的设计[J].微波学报,2012(S2):46-49.
- [10] 安兆卫,王明皓,雷虹.机载天线隔离度的分析计算与仿真[J].飞机设计,2009(6):32-34,43.
- [11] 刘玲玲,孙向珍,郭恒.C 频段双线极化高隔离度微带天线设计[J].遥控遥测,2011(3):47-50,54.
- [12] KATZENBEISSER S ,PETITCOLAS F A P.信息隐藏技术-隐写术与数字水印 [M].北京:人民邮电出版社,2001.
- [13] 盛承光.基于 HVS 的图像隐写术的应用与研究[D].武汉:武汉理工大学,2007:33-37.

(上接第 55 页)

- [8] 鲁国鹏,叶学义,汪云路,等.一种基于量化表修改的 F5 隐写方法[J].计算机工程,2012,38(24):123-127.
- [9] LIU Chiang-lung, LIAO Shiang-rong. High-performance JPEG Steganography Using Complementary Embedding Strategy [J]. Pattern Recognition, 2008, 41 (9): 2945-2955.
- [10] YANG Ching-nung, CHEN Tse-shih, KUN Hsuan yu, et al.Improvements of Image Sharing with Steganography and Authentication [J]. The Journal of Systems & Software,

2006,80(7):1070-1076.

- [11] 郑国伟,王小铭.一种基于 DCT 的图像信息隐藏策略 [J].华南师范大学学报(自然科学版),2008(3):53-59.
- [12] KATZENBEISSER S ,PETITCOLAS F A P.信息隐藏技术-隐写术与数字水印 [M].北京:人民邮电出版社,2001.
- [13] 盛承光.基于 HVS 的图像隐写术的应用与研究[D].武汉:武汉理工大学,2007:33-37.

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>