

一种宽带双极化磁电偶极子相控阵设计

崔静一¹ 陈 星¹

CUI Jingyi CHEN Xing

摘 要

采用磁电偶极子天线作为阵列单元,设计了一种兼具双极化、高增益、大功率和宽带特性的相控扫描阵列。磁电偶极子天线为全金属结构,可以承受大功率;两对菱形电偶极子和弯折磁偶极子呈十字交叉排列,实现正交双极化;电偶极子末端与金属腔壁上倒L形弯折片之间由于容性耦合形成等效LC电路,能够改善天线低频的阻抗匹配。加工制作了一只 8×8 相控阵天线样品,仿真和测试表明,阵列有源驻波小于2的阻抗带宽达到44.4%(2.1~3.3 GHz);在整个工作频段内阵列有良好的高增益定向辐射性能,以及大角度波束扫描性能,在重点工作频点2.3 GHz的法向增益最大值为23.4 dBi,45°扫描角下的阵列增益仅下降了1.9 dBi。

关键词

宽带;双极化;高增益;磁电偶极子天线;相控阵

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.03.017

0 引言

相控阵的研究起点可以追溯到19世纪30年代,因军事需要,各国开展了对相控阵天线的研究,第一部实用型的舰载相控阵雷达问世。随着电磁技术的发展,相控阵天线在雷达、通信、电子对抗、无人驾驶和遥测遥感等领域受到了广泛应用^[1-2]。普通阵列天线由于辐射特性固定不能满足多功能的需求,而相控阵天线由于在每个天线单元后面连接了移相器件,可以改变每个天线单元的相位,所以能实现波束扫描、多波束赋型等功能^[3]。与传统机械伺服天线相比,相控阵天线具有扫描速度快、波束指向精度高、辐射功率大等优点^[4]。相控阵天线的辐射特性由阵列单元和组阵方式共同决定^[5],常用的单元有磁电偶极子天线、Vivaldi天线、微带天线等,组阵形式一般分为一维线阵、二维面阵、三维立体阵^[6]等。

相控阵对天线单元的要求往往不局限于某个性能的突出表现,而是需要具备较为均衡的良好特性。由于电偶极子在其E面和H面分别具有数字8形状和字母O形状的辐射方向图,而磁偶极子恰恰相反,所以将电偶极子和磁偶极子通过适当的组合方式连接在一起组成磁电偶极子天线,对该结构馈电会使两种偶极子以适当的振幅和相位同时被激发,二者方向图在极化面内叠加,因其互补性而能够得到较为一致的心字形E面和H面辐射图。根据该理论,磁电偶极子天线

结构得到了广泛研究和快速发展。2006年,Kwai Man Luk等学者在Clavin提出的由电偶极子和磁偶极子组成互补天线想法^[7]的基础上,设计了一款新型磁电偶极子天线,该天线的电偶极子和磁偶极子分别由二分之一波长的水平矩形贴片和四分之一波长的垂直短路贴片实现^[8]。以Vivaldi天线为单元的相控阵往往具有很高的电尺寸,对应用场景的多样性限制较大,同时也会导致较差的交叉极化^[9]。微带天线相控阵虽具有较大角度的扫描能力,但工作带宽较窄,且在扫描过程中增益会下降4~5 dBi^[10]。磁电偶极子天线因具有宽带、较低剖面、高增益定向辐射性能、结构简单且易于双极化、可做成金属结构实现大功率等优异性能,非常适宜应用于相控阵的设计。

某工程应用要求工作频段为2.2~3 GHz,且在重点工作频点2.3 GHz能够实现45°的扫描特性,在全频段内具有高增益定向辐射性能。针对该工程项目的指标要求,本文首先设计了一款双极化磁电偶极子天线,然后以该磁电偶极子为阵元,设计了一款规模为 8×8 ,工作频段在2.1~3.3 GHz的宽带双极化高增益相控阵。天线阵列采用全金属结构,可以承受较大的功率。阵元以较窄的间距紧密排列,所得全阵结构紧凑,尺寸较小。

1 天线单元及阵列结构

1.1 天线单元设计

图1为双极化磁电偶极子天线的结构图。该磁电偶极子天线主要包括水平方向上菱形阵子形式的电偶极子部分、垂直方向上折叠短路贴片充当的磁偶极子部分、阶梯形馈电结

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610064

[基金项目] 中国电波传播研究所稳定支持科研经费资助项目 (No. WBC2312008)

构以及充当反射板的矩形反射腔。

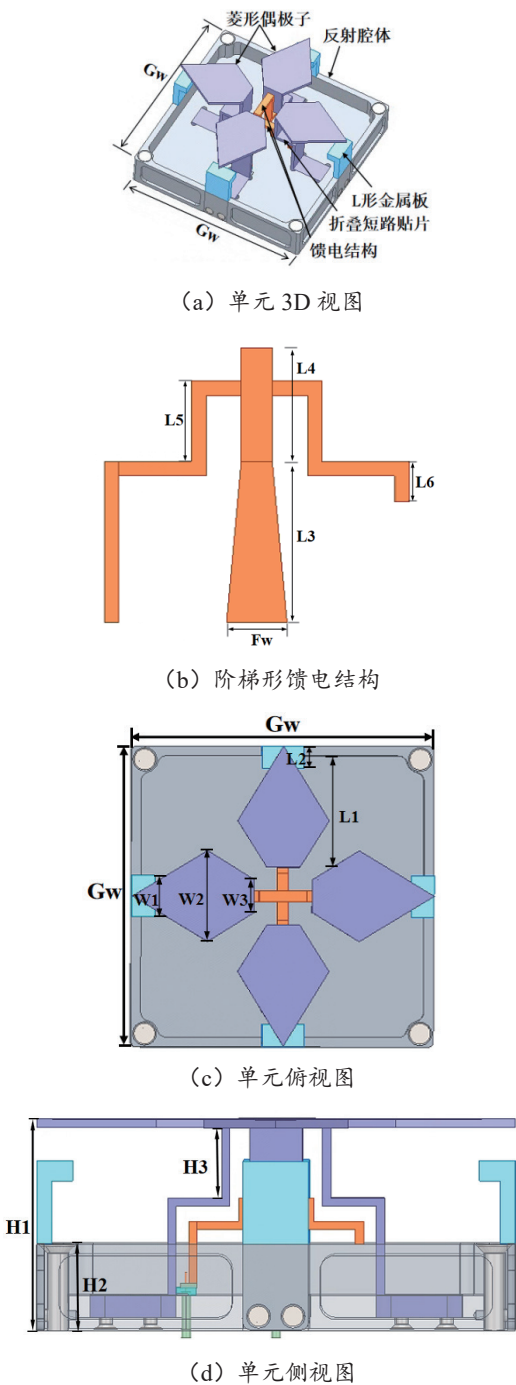


图 1 天线单元结构及阶梯形馈电结构示意图

充当磁偶极子的折叠短路贴片的顶部与菱形电偶极子相连，构成完整的磁电偶极子部分，两只磁电偶极子在互相垂直的方向上交叉布局，使天线具备了双极化特性。采用的阶梯形馈电结构包含传输线、耦合结构和阻抗调节结构三部分。馈电结构与垂直方向上的折叠短路贴片之间保持固定间隙，形成以空气为介质的微带传输线，并且末端与馈电同轴相连接，将能量通过微带传输线传输至耦合结构。水平方向上的耦合结构起到激励天线辐射单元的作用，垂直的阻抗调节部

分以其可调节长度的阶梯弯曲结构，实现了调整天线的阻抗匹配的功能。同时，在两个阶梯形馈电结构之间设置了高度差来避免相互重叠。此外，采用矩形反射腔取代传统的平面反射板，不仅减小了天线尺寸，也实现了更加稳定的定向辐射性。经过仿真优化后，天线具体结构参数见表 1。

表 1 天线结构参数 /mm

Gw	W1	W2	W3	L1	L2	L3
64	8.8	19.4	7	23.8	4.8	12.3
L4	L5	L6	H1	H2	H3	Fw
8.8	6.2	3.1	28.2	11.5	5.4	4.6

1.2 8×8 阵列设计

为了使天线具备大角度的扫描特性，且能够满足高增益定向辐射特性的需要，将上述磁电偶极子天线进行 8×8 即 64 个阵元规模的有限元组阵。阵元以适当间距排列，组成整个方形平板阵列。在阵列背部加一个与全阵尺寸相同的金属背板，不仅可以起到固定阵元的作用，还可以反射阵列的后向辐射，模拟了实际工程应用情况。整体的结构如图 2 所示。

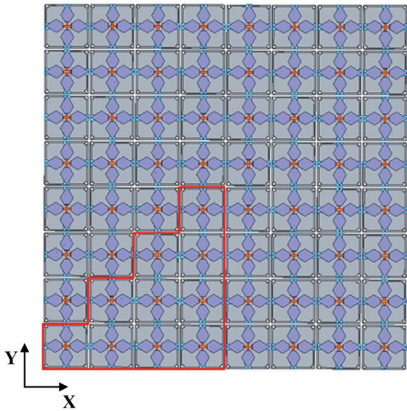


图 2 天线阵列结构图

2 天线及阵列仿真分析

2.1 单元仿真分析

通过仿真对比了天线在金属腔加载倒 L 形弯折片结构前后的驻波比结果，如图 3 所示。

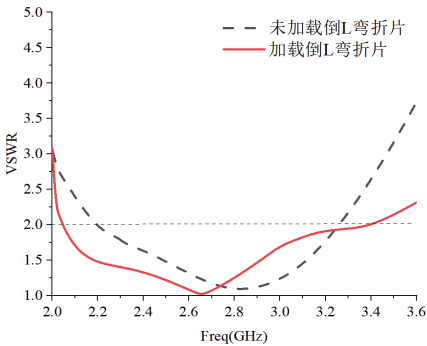
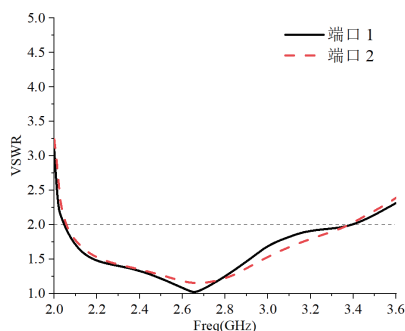


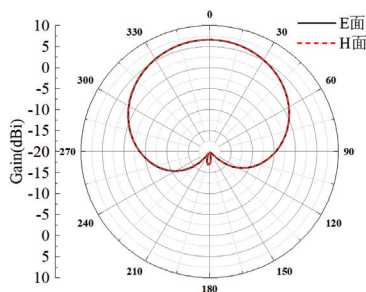
图 3 加载 L 形弯折片前后天线的驻波比仿真结果

对比两条驻波比曲线可以明显看出,低频截止频率由 2.2 GHz 降至 2.05 GHz,验证了在电偶极子末端与金属腔壁加载 Γ 形弯折片,确实能够起到改善天线低频阻抗匹配的效果。

最终,所得到的天线单元驻波比以及方向图的仿真结果如图 4 所示。天线单元的工作频段为 2.05 ~ 3.3 GHz, E 面和 H 面具有一致的方向图,定向性良好。



(a) 电压驻波比



(b) 方向图

图 4 天线单元仿真结果

2.2 相控阵仿真分析

在 x 、 y 方向上进行单元数扩展,进而得到 8×8 平板阵列,对其进行仿真分析。选择阵列中 10 个典型位置的阵元,如图 2 中圈红部分所示,便可代表阵列中所有位置的阵元,足以表示整个阵列的有源驻波结果。通过仿真得到不扫描情况下阵列的有源驻波,如图 5 所示。可以看出,该平板阵列 Active VSWR < 2 阻抗带宽为 44.4% (2.1 ~ 3.3 GHz)。

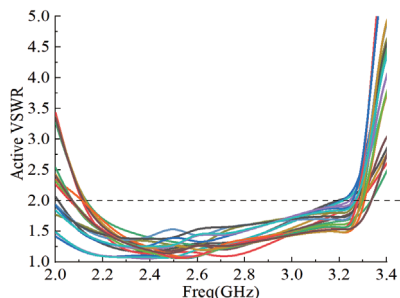
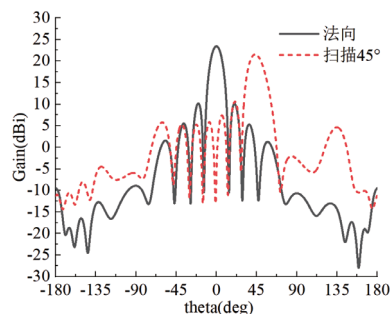


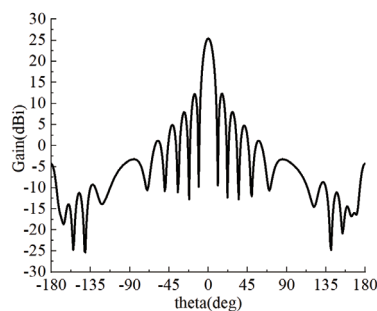
图 5 阵列中所选 10 个代表性单元端口的有源驻波比仿真结果

图 6 展示了阵列在重点工作频点 2.3 GHz 处 E 面不扫描和扫描 45° 的增益方向图,以及频段内 3 GHz 的 E 面增益方

向图,由于单元以及组阵形式保持了严格的对称结构,所以 H 面与 E 面方向图具有一致性。从图 6 中可以看出,阵列的定向辐射性良好,在 2.3 GHz 处全阵法向的最大增益值达到了 23.4 dBi,扫描 45° 的最大增益为 21.5 dBi,相较于不扫描仅下降了 1.9 dBi;在 3 GHz 处法向增益达到了 25.4 dBi。仿真结果表明,该阵列在重点工作频点能够实现大角度波束扫描,辐射性能可以保持较高的稳定性,且在频段内具有较高的增益值。



(a) 2.3 GHz 法向与扫描 45°



(b) 3 GHz 法向

图 6 全阵增益方向图

3 天线加工测试

天线阵列实物模型如图 7 所示,采用全金属结构,在阵子与反射腔体之间加了泡沫作为支撑材料,保持了相控阵在实际应用场景中的结构稳定性。阵列中各个阵元的端口通过馈电缆与背部的功分器相连,通过连接不同长度的馈线来改变对应端口的相位,实现端口间的相位差,进而实现相控阵的波束扫描功能。为了验证实物的工程应用可行性,对加工的天线模型进行了实测。

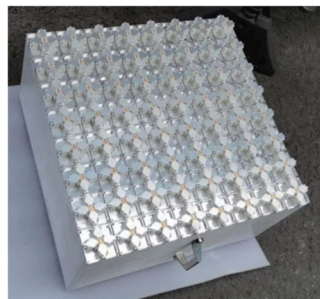


图 7 平板阵列实物图

考虑到阵列中阵元之间的耦合效应,处于中心位置的单元比较能够代表全阵的有源驻波比结果。中心单元的驻波比测试过程是先安捷伦矢量网络分析仪测出中心单元一个端口的回波损耗($|S_{11}|$)以及其他端口与该端口的传输系数($|S_{12}|$ 、 $|S_{13}|$...),然后将这组数据导入特定程序计算得到最终结果。图8给出了驻波比仿真与实测的对比结果图,可以看出仿真与测试驻波比吻合度较为良好。

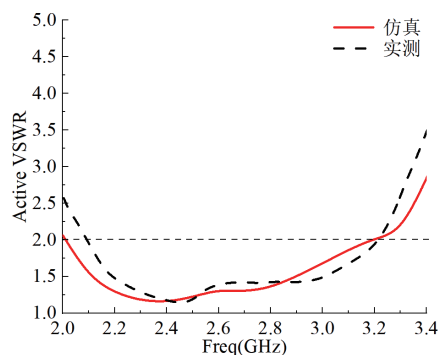


图8 阵列中心单元驻波比仿真与测试对比

图9显示了重点工作频点2.3 GHz处阵列E面不扫描和扫描45°的方向图,以及高频2.7 GHz、3 GHz处的E面不扫描方向图。可以看出仿真与测试方向图吻合度较高。不扫描情况下测试结果显示,在2.3 GHz处阵列的增益为23.3 dBi,与仿真值仅相差0.1 dBi,且具有很好的定向性。对比扫描45°时的仿真与测试方向图,在150°附近的误差应该是因为阵列背后所加挡板以及功分器对该方向的电磁波有一定的遮挡,但整体吻合度较为良好。2.7 GHz、3 GHz处增益最大值分别达到24.6 dBi、25.3 dBi,与仿真值相差均在0.2 dBi以内。

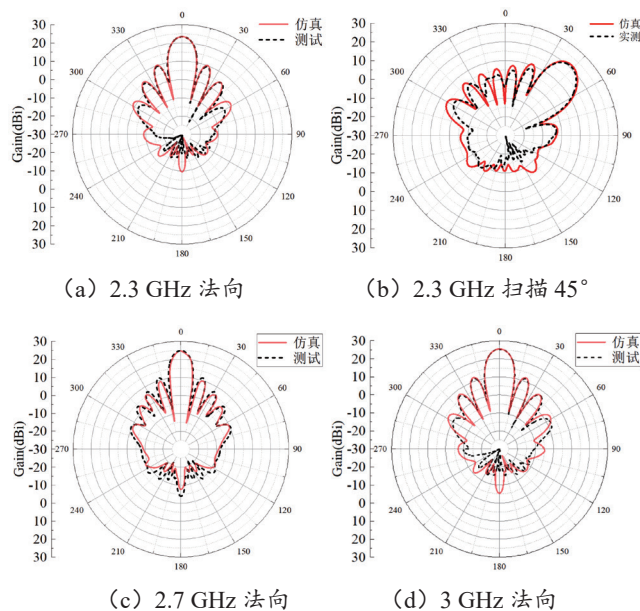


图9 阵列方向图仿真与测试对比

4 结论

本文设计了一款应用于S波段的平板相控阵列天线。该阵列采用兼具宽带、双极化等优势的磁电偶极子天线作为阵元,具备较大角度的波束扫描能力,且能够保持稳定的辐射特性。测试表明,该阵列各项指标与仿真结果都较为吻合,不扫描时Active VSWR<2 阻抗带宽为44.4%(2.1~3.3 GHz)。在重点工作频点2.3 GHz的增益可达到23.3 dBi,扫描45°最大增益下降值在2 dBi以内,具备良好的扫描特性;在高频2.7 GHz、3 GHz处最大增益分别达到了24.6 dBi、25.3 dBi,具有良好的定向辐射方向图。

参考文献:

- [1] 李贵栋. 一种低剖面宽带宽角扫描相控阵天线设计[J]. 舰船电子对抗, 2023,46(3):104-107.
- [2] 孙兆鑫. 低剖面的宽带大角度扫描紧耦合相控阵关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [3] YANG G, ZHANG Y, ZHANG S. Wide-band and wide-angle scanning phased array antenna for mobile communication system[J]. IEEE open journal of antennas and propagation, 2021(2): 203-212.
- [4] 徐龙. 卫通卫导一体化天线[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [5] 张中伟. 相控阵天线关键技术的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [6] 朱旗, 王义春, 陈艳丽, 等. 圆柱体圆锥体共形相控阵设计[J]. 电波科学学报, 2010,25(3):428-435.
- [7] CHLAVIN A. A new antenna feed having equal E-and H-plane patterns[J]. Transactions of the IRE professional group on antennas and propagation, 1954, 2(3): 113-119.
- [8] LUK K M, WONG H. A new wideband unidirectional antenna element[J]. Int. j. microw. opt. technol, 2006, 1(1):35-44.
- [9] KINDT R W, PICKLES W R. Ultrawideband all-metal flared-notch array radiator[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2010, 58(11): 3568-3575.
- [10] LAMMINEN A E I, SAILY J, VIMPARI A R. 60-GHz patch antennas and arrays on LTCC with embedded-cavity substrates[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2008, 56(9): 2865-2874.

【作者简介】

崔静一(1997—), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 研究方向: 天线设计。

陈星(1970—), 男, 四川巴中人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电磁场理论与微波工程。

(收稿日期: 2024-01-15)