

· 天馈技术 ·

中图分类号: TN821

文献标识码: A

文章编号: 1004-7859(2009)10-0075-04

一种高增益低旁瓣双贴片微带天线阵

史丽¹, 金荣洪¹, 耿军平¹, 叶声¹, 杨光¹, 郑咏松²

(1. 上海交通大学电子工程系, 上海 200240; 2. 杭州文化广播电视台集团, 杭州 310004)

摘要:设计了一种可工作于 Ku 波段的高增益、低剖面的准空气微带阵列。天线阵列整体采用分层的准空气微带结构, 每个天线单元采用双贴片单元结构以提高天线增益、抑制交叉极化, 最终提高了组阵的效率和增益。在阵列天线中采用台阶式分块馈电, 有效地抑制了旁瓣电平。最后通过仿真计算设计并实际制作了 64 单元阵列天线, 实验结果和仿真结果吻合良好, 阻抗带宽达到 17.54%, 中心频率 14.25 GHz 时增益达到 24.5 dB, E 面旁瓣低于 -18 dB, H 面旁瓣低于 -12 dB。

关键词:阵列天线; 双贴片微带天线; 准空气微带天线

A High Gain Dual-patch Microstrip Antenna Array with Low Sidelobes

SHI Li¹, JIN Rong-hong¹, GENG Jun-ping¹, YE Sheng¹, YANG Guang¹, ZHENG Yong-song²

(1. Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. Hangzhou Culture Radio Television Group, Hangzhou 310004, China)

Abstract: The design of a Ku-band antenna array with high gain and low profile is presented in this paper. The array structure is based on quasi air microstrip structure, with dual-patch elements to increase its gain and suppress the cross polarization, which results in a great enhancement of the total efficiency and gain. To reduce the sidelobe level, a reasonable power distribution is used. By simulation, a 64 element array is designed and manufactured. The measured impedance bandwidth is 17.54%, the gain at centre frequency 14.25 GHz is 24.5 dB, and the side lobe level is -18 dB in E-plane and -12 dB in H-plane respectively, which agrees well with the simulated results.

Key words: antenna array; microstrip dual-patch antenna; quasi air microstrip antenna

0 引言

在常用的微波天线中, 微带天线以其体积小、重量轻、制造简单、低剖面、易与载体共形等优点, 从 20 世纪 70 年代开始得到广泛应用。由于雷达的机动性要求越来越高, 传统的反射面天线的尺寸、风荷等致命缺陷制约了其应用, 采用微带天线等低剖面结构是业界持续追求的一个热点。另一方面, 以微带贴片等平面结构为单元构成的相控阵天线或者基于数字波束形成技术的阵列天线能实现波束大空域快速扫描, 具有多目标检测、跟踪、自适应、天线波束控制灵活等优点, 已越来越多地被雷达所采用。

目前已有许多文献对微带天线阵进行了研究, 例如通过开槽扩展带宽, 设计特殊馈电结构达到性能要求等^[1-4]。文献[1]提出一个典型的 Ku 波段的天线结构, 但增益较低, 尺寸比较大, 还有很大的提高空间; 文献[2]中天线和馈电网络共面, 虽然效率很高, 但较高的旁瓣在卫星通信中可能给通信链路造成一定干

扰, 无法满足 ITU 的入网要求。在雷达等应用场合则可能造成虚警、干扰, 尤其不利于雷达的低截获要求; 文献[3]给出了一个高性能天线阵, 但其极化方式限于圆极化。综合上述天线结构的优缺点, 本文从实用的角度出发, 设计了一种基于准空气微带的双贴片天线单元, 并用其组成平面天线阵。该平面阵剖面低、增益高、旁瓣低, 可用作 Ku 波段(14.0 GHz ~ 14.5 GHz) 线极化发射天线, 设计思想对雷达中的平面阵列天线也有参考价值。和现有的微带天线阵相比, 阵列结构简单易于制作, 性能稳定。

1 双贴片空气微带天线阵元的设计

双贴片空气微带天线单元结构如图 1 所示, 天线由 2 层介质板组成, 2 层介质板中间夹着 1 层空气, 空气层的引入, 减小了天线的等效介电常数, 降低了微带天线的 Q 值, 从而达到了增加带宽的目的^[5]。辐射贴片蚀刻在上层介质板的顶部, 接地板和组阵后的馈电网络分别位于下层介质板的上下 2 面。辐射贴片通过探针和组阵后的馈线相连。2 层介质板都是介电常数为 2.55 的 Arlon AD255 材料, 其中上层介质板厚度为 1.524 mm, 下层介质板厚度为 0.762 mm, 上层采用较

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(F010402/60501016)

通信作者: 史丽 Email: lilyshi@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2009-06-25 修订日期: 2009-10-10

厚的介质板提高了天线的机械强度,下层采用薄板使得组阵后的馈线较细,减小了后向辐射强度,介质板之间的空气层厚度为 0.6 mm。仿真时设置的天线单元面积为 18 mm × 18 mm,覆铜厚度为 0.035 mm。

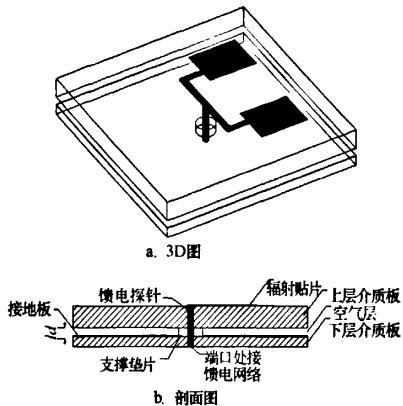


图 1 单元天线结构图

辐射贴片采用如图 2 所示的双贴片结构,2 个矩形贴片用微带线连接,连接点位置对称,单元馈电点在微带线中间。这种对称结构使得辐射贴片上与水平方向垂直的电流互相抵消,进而降低交叉极化。同时 2 个矩形贴片的结构使得整个单元相当于一个二元阵,增益得到提高。但是对于整个阵列来说,它又是一个独立的阵元,只需要组阵后的馈电网络提供一个馈电点,有利于简化组阵后的馈电网络。

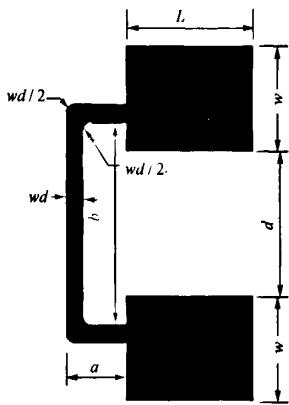


图 2 辐射贴片

贴片尺寸首先按照微带天线传输线模型给出初始值,再用全波仿真软件 CST MWS 仿真计算并进行尺寸扫描、优化。由传输线模型,对于介质基片厚度为 h ,相对介电常数为 ϵ_r ,工作频率为 f_r 的单个矩形辐射贴片^[6]

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta l \quad (2)$$

其中

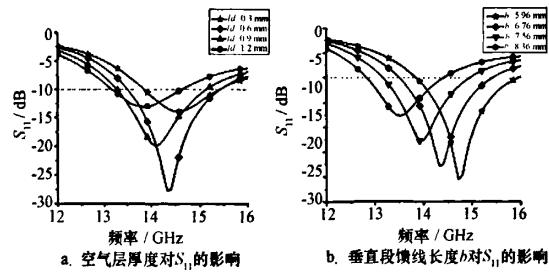
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{W} \right)^{-1/2} \quad (3)$$

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_r + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_r - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (4)$$

计算得到 $f_r = 14.25$ GHz, $\epsilon_r = 2.55$, $h = 1.524$ mm 时, $W = 7.9$ mm, $L = 5.585$ mm。由于空气层的加入,天线的等效介电常数和介质层厚度都发生了变化,双贴片结构更将单点底馈的方式转化为微带线双馈,因此天线尺寸需要进行进一步调整。用 CST 进行参数扫描,图 3a 给出空气层厚度 ld 从 0.3 mm ~ 1.2 mm 时对应 S_{11} 的变化,结果表明 $ld = 0.6$ mm 时能获得更好的阻抗匹配。在双贴片结构中,与双贴片垂直的馈线上流过的电流方向相反,互相抵消,不会产生辐射,但这段长度的变化会引起阻抗变化,并使贴片上的馈电位置发生移动,从而使谐振点发生偏移,如图 3b 所示。仿真计算中还发现,双贴片间的间距对单个天线单元的辐射特性影响不大,但为了减小 2 个贴片之间的耦合,并考虑组阵后的整体性能,最终选定合适距离 d 。通过 CST 优化设计,得到双贴片结构中各参数尺寸如表 1 所示。

表 1 天线优化后各参数尺寸 mm

参数	L	W	wd	a	b	d	ld
尺寸	4.5	3.5	0.6	2.14	6.76	4.86	0.6

图 3 双贴片尺寸参数对 S_{11} 的影响

仿真得到天线单元的回波损耗在 13.49 GHz ~ 15.42 GHz 的范围内小于 -10 dB,增益在 14.0 GHz ~ 14.5 GHz 频带内为 8.3 dB ~ 8.5 dB,而矩形贴片单元增益仿真值在此频段内约 6.7 dB。从天线单元的辐射贴片尺寸来看,每个元贴片都远小于根据式(1)~

式(4)计算所得的尺寸,整个双贴片结构尺寸虽然比单个 $7.9 \text{ mm} \times 5.585 \text{ mm}$ 的矩形贴片略大,但增益提高了 1.8 dB 。同时,考虑到减小耦合和抑制旁瓣的因素,阵列天线单元间距一般都略大于半个波长,因此组阵后的天线阵列面积并没有增加,在同样的单元间距和阵列尺寸下,采用双贴片空气微带阵元的结构增益要比传统矩形贴片微带天线阵高,也就意味着口面效率得到了提高。

2 平面阵列结构

从性能和结构 2 个方面分析,本文设计的双贴片空气微带天线非常适合组阵以获得更高的增益,因此将其组成 4×16 的 64 单元平面阵进行仿真,并制作了实验模型。如图 4 所示,馈电网络印刷在下层介质板的下底面,采用探针微带混合的馈电方式对天线单元进行馈电。接地板位于辐射单元和馈电网络之间,仅光蚀出让探针通过的小孔,这种设计可以有效地降低微带馈线产生的寄生辐射,地板背面的微带馈线也更容易进行功率分配和阻抗匹配,给组阵带来了很多方便。为了降低旁瓣,本文采用台阶式分块馈电,使得从左到右 4 块 16 单元子阵功率分配比为 $1:2:2:1$,阵列两侧部分的馈电电流幅度略小于中间部分。由于接地板的隔离作用,天线阵列的频带特性主要取决于阵元的排列分布,增益也随阵元间距的变化而变化。

根据以上设计,对 64 单元阵列进行仿真优化,最终得到的平面阵长 281.6 mm ,宽 70.4 mm ,阵元间距为 17.6 mm (约 0.8 个波长)。由于采用的是准空气微带结构,天线性能比较稳定,空气层厚度允许有 0.1 mm 的误差,这一点通过仿真进行了验证,实际上降低了加工难度。

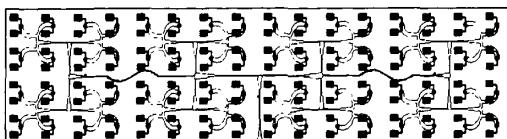


图 4 64 单元阵列结构

3 测试结果

使用 Agilent 8722ES 网络分析仪对天线阵的 S 参数进行了测试。实测和仿真的结果如图 5 所示,在整个频带($12 \text{ GHz} \sim 16 \text{ GHz}$)内基本一致,部分频率偏移是由微波板材存在的误差和有限的加工精度引起的。实测 S_{11} 整体比仿真结果低 $1 \text{ dB} \sim 2 \text{ dB}$,这是由 SMA 接头引起的插入损耗带来的。测试的结果表明,从

$13.08 \text{ GHz} \sim 15.5 \text{ GHz}$ 的范围内, $S_{11} < -10 \text{ dB}$, 阻抗带宽为 17.54% (相对于中心频率 14.25 GHz),即使考虑接头的插损,将实测 S_{11} 整体提高 2 dB ,天线仍有接近 2 GHz 的带宽,可见该天线阵在 Ku 波段具有较宽的工作频带。

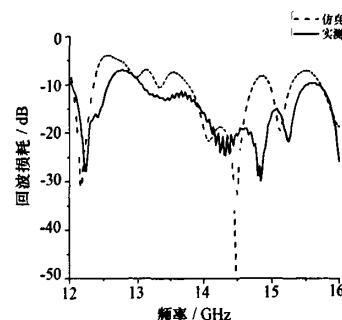


图 5 仿真和实测的回波损耗

最后,在半开放空间对天线阵的增益和方向图进行测试,仿真和实测增益如表 2 所示,实测增益比仿真结果低 1 dB 左右,其中一部分原因是接头的插入损耗,如果考虑 SMA 接头和焊接引入的插损约为 0.5 dB ,实测增益将非常接近仿真值。

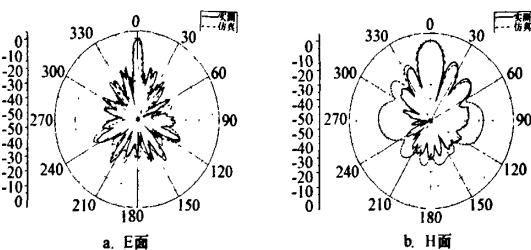
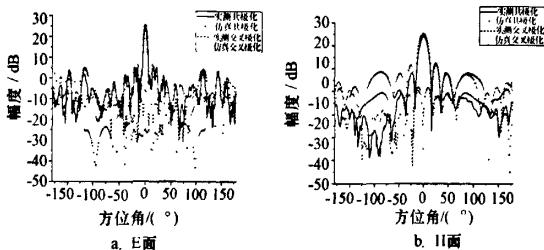
表 2 天线阵的仿真和实测增益

频率/GHz	仿真增益/dB	实测增益/dB
14.00	25.1	23.9
14.25	25.3	24.5
14.50	25.1	24.0

图 6 给出天线阵在 14.25 GHz 的 E 面和 H 面的远场方向图,主瓣方向为法线方向,E 面主瓣宽度为 4.2° ,H 面主瓣宽度为 15.3° ,第一旁瓣分别低于 -18 dB 和 -12 dB 。E 面的交叉极化低于 -30 dB ,H 面的交叉极化低于 -35 dB ,如图 7 所示。E 面方向图实测值和仿真值基本吻合,而 H 面方向图在 $240^\circ \sim 300^\circ$ 之间存在凹陷,这是因为天线阵是侧馈的,测 H 面的远场方向图时,SMA 接头、连接的同轴线和天线一起对着信号源,对方向图产生了影响。同轴线的影响在测 E 面的交叉极化也有体现,由于馈线与 E 面垂直,使得交叉极化电平升高,实测值高于仿真值。根据以上的实验经验,以后的设计中可以将天线结构的侧馈方式改为底馈,这样天线的辐射性能可能更好。由于是在室外开阔场地进行测试,环境条件也有一定的影响,使得测试结果和仿真结果有一定的误差。但从实测结果来看,该天线阵列在 Ku 频带能够正常工作,辐射特性良好。

4 结束语

本文设计了一种工作于 Ku 波段的准空气微带结

图 6 天线远场方向图($f=14.25\text{ GHz}$)图 7 交叉极化和共极化($f=14.25\text{ GHz}$)

构的双贴片天线单元, 单元增益高达 8.4 dB, 同时由于空气层的加入, 天线带宽也得到了拓展。用这种天线单元扩展组阵实现了 64 单元平面天线阵, 该阵列在 Ku 波段阻抗带宽达到了 17.54% (相对于中心频率 14.25 GHz), 实测的最大增益为 24.5 dB, 方向图主瓣宽度 E 面为 4.2°, H 面为 15.3°, 第 1 旁瓣分别低于 -18 dB 和 -12 dB, 交叉极化分别在 -30 dB 和 -35 dB 以下。这种高增益低旁瓣的微带天线阵同时具有体积小、重量轻、结构简单等特点, 为今后卫星通信以及雷达天线的设计提供了有价值的参考。

参 考 文 献

- [1] Walcher D A, Lee R Q, Lee K F. Ku band microstrip patch antenna receiving array [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1996, 13(4): 213–216.
- (上接第 74 页)
- [5] Chen Bo, Liu Hongwei, Bao Zheng. An efficient kernel optimization method for radar high-resolution range profile recognition [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007, (1): 1–10.
- [6] Duda R O, Hart P E, Stork D G. 模式分类 [M]2 版. 李宏东, 姚天翔,译. 北京: 机械工业出版社, 2003: 389–390.
Duda R O, Hart P E, Stork D G. Pattern classification [M] 2nd edit. Li Hongdong, Yao Tianxiang, trans. Beijing: China Machine Press, 2003: 389–390.
- [7] Wang Lei, Chan Kapluk, Xue Ping, et al. A kernel-induced space selection approach to model selection in KLDA [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2008, 19(12): 2116–2131.
- [8] Mika S, Ratsch G, Weston J, et al. Fisher discriminant analysis with kernels [C] // *Neural Networks for Signal Processing IX*. Madison, WI, USA: [s. n.], 1999: 41–48.
- [9] Heiden R V, Groen F C A. The box-cox metric for nearest neighbor classification improvement [J]. *Pattern Recognition*, 1997, 30(2): 273–297.

- [2] Byungje Lee, Gi-Cho Kang, Sung-Hyun Yang. Broadband high-efficiency microstrip antenna array with corporate-series-feed [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, 43(3): 181–183.
- [3] Lu Ko-Han, Chang The-Nan. Circularly polarized array antenna with corporate-feed network and series-feed elements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(10): 3288–3292.
- [4] Wang H, Huang X B, Fang D G, et al. A microstrip antenna array formed by microstrip line fed tooth-like-slot patches [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(4): 1210–1214.
- [5] Girish Kumar, Ray K P. Broadband microstrip antennas [M]. Norwood: Artech House, 2003: 143–145.
- [6] 张 钧. 微带天线理论与工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
Zhang Jun. Microstrip antenna theory and engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 1988.

史丽女, 1984 年生, 硕士研究生。研究方向为微带天线及其组阵技术。

金荣洪 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师。研究方向为现代通信天线理论和设计、数字波束形成技术、多波束天线、电磁场的数值方法等。

耿军平 男, 1972 年生, 副教授。研究方向为智能天线和电磁兼容等。

叶声 男, 1983 年生, 硕士研究生。研究方向为微带阵列天线。

杨光 男, 1984 年生, 硕士研究生。研究方向为微带天线设计、阵列信号处理。

郑咏松 男, 1971 年生, 高级工程师。研究方向为数字电视、信道特性。

朱劫昊 男, 1983 年生, 博士研究生。研究方向为雷达自动目标识别和雷达目标特性分析。

周建江 男, 1962 年生, 博士, 教授。研究方向为雷达信号处理和雷达目标特性分析。

汪飞 男, 1976 年生, 博士, 副教授。研究方向为雷达信号处理和谱分析。

吴杰 女, 1977 年生, 博士研究生。研究方向为雷达自动目标识别和信号处理。

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>