

基于新型耦合器的紧耦合阵列天线研究

杨 龙¹, 周文涛¹, 王 娜¹, 张志亚²

(1. 中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036;

2. 西安电子科技大学 天线与微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 紧耦合阵列天线具备超宽带性能, 可广泛应用于雷达、通信、情报侦察等领域。提出了一种采用新型电容耦合器的宽带紧耦合阵列天线, 获得了宽带性能。该电容耦合器通过将两条部分重叠的传输线沿阿基米德螺旋曲线缠绕而获得, 可以得到阵元间的强电容耦合, 同时为了增加相邻天线单元间的电容, 耦合器采用了双层印刷结构。此外, 采用集成的宽带巴伦和电介质覆层, 进一步提高了天线的宽带匹配性能。仿真结果表明, 所设计的紧耦合阵列天线阵列在 1.2~6.2 GHz 范围内有源驻波小于 3, 同时所有平面中扫描角达到 45°。制造并测试了天线样机, 测量结果表明所设计的天线在有源驻波小于 3 时阻抗带宽达到 5.2:1。

关键词: 紧耦合阵列天线; 超宽带; 耦合器

中图分类号: TN821

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201817

中文引用格式: 杨龙, 周文涛, 王娜, 等. 基于新型耦合器的紧耦合阵列天线研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(8): 123-127, 132.

英文引用格式: Yang Long, Zhou Wentao, Wang Na, et al. Design of tightly coupled dipole array with novel capacitive coupler[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(8): 123-127, 132.

Design of tightly coupled dipole array with novel capacitive coupler

Yang Long¹, Zhou Wentao¹, Wang Na¹, Zhang Zhiya²

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;

2. National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The tightly coupled array antenna has ultra-wideband performance and can be widely used in radar, communications, intelligence reconnaissance and other fields. In this paper, a wideband tightly coupled array antenna (TCA) adopts a novel capacitive coupler is proposed. The proposed capacitive coupler, called Archimedes capacitive coupler, is based on two partially overlapping transmission lines obtained by winding them followed the Archimedes spiral. In addition, in order to further increase the capacitance between the two adjacent elements, the coupler uses a double-layer printed structure. Meanwhile, an integrated Marchand balun and a dielectric superstrate are adopted for further improving the matching performance of the designed antenna. The simulated results show that the final array maintains an active VSWR<3 from 1.2~6.2 GHz while scanning up to 45° in all planes. A prototype is manufactured and measured to validate the method. The measured results are provided for broadside and it shows that the proposed antenna delivers minimum 5.2:1 bandwidth for active VSWR<3.

Key words: tightly coupled array antenna; ultra-wideband; coupler

0 引言

近年来, 紧耦合理论被应用到超宽带阵列天线的设计中, 它通过有效利用天线单元之间的天线耦合效应来满足阵列天线宽带化和低剖面的要求^[1-4]。紧耦合阵列天线(Tightly Coupled Array Antenna, TCA)的起源可以追溯到 1965 年提出的连续电流片阵列的理想天线模型^[5]。但直到 2003 年学者偶然发现天线之间的强耦合效应可以用来拓宽天线带宽^[6]。从那时起, 紧耦合阵列天线的研究备受关注^[7-9]。为了获得紧耦合阵列天线的宽带性能, 最初始和最重要的步骤是在两个相邻阵元之间设计耦合器以获得强电容互耦。目前主要有两种耦合器形式来

实现阵元间的耦合。一种称为交叠耦合器, 它通过在基板的两侧分别印刷相邻天线单元的两个辐射臂, 两辐射臂彼此交叠而构成, 此时阵元间的电容为平板电容^[9-11]。另一种耦合器称为交指耦合器, 它是通过在基板的同一侧印刷相邻阵元的两辐射臂并使它们的边缘交织成手指状而构成, 此时阵元间的电容为交指电容^[12-13]。在紧耦合阵列天线设计中, 阵元间的电容耦合主要通过这两种方式来实现。

本文提出了一种新型的电容耦合器, 称为阿基米德电容耦合器, 来获得阵元间的强电容耦合。同时, 为进一步增加相邻阵元间的电容耦合, 耦合器设计为双层并联

结构。最后,通过集成宽带巴伦和介质覆层的使用,设计的紧耦合阵列天线获得了宽阻抗带宽和宽角扫描能力。

1 紧耦合阵列单元设计

印刷偶极子天线结构紧凑,加工容易,辐射性能稳定,因此本文选择蝶形印刷偶极子作为紧耦合阵列天线的基本单元。阵元间采用新型电容耦合器,即阿基米德电容耦合器可以获得阵元间强互耦,其演化过程如图1所示。该电容耦合器以图1(a)所示的两根平行的传统传输线为设计原型,将两根传输线在平面内按阿基米德螺旋线相互缠绕,便得到了如图1(b)所示的阿基米德电容耦合器。由传输线方程可知,这种形式的耦合器不仅能提供较大的电容还能提供电感分量,这样可以更好地对天线的输入阻抗进行调节。紧耦合阵列天线单元晶胞的结构如图2所示,单元晶胞由宽角匹配层、紧耦合振子和地板组成。将阿基米德电容耦合器放置在两个相邻的蝶形印刷偶极子的连接处,如图2(b)所示。为了进一步增大电容,利用金属柱将双层印刷的电容耦合器连接以实现两个耦合器的并联,从而使电容增加一倍,这样做的好处是增加耦合电容的同时可减少螺旋臂的槽宽,降低实现难度,如图2(c)所示。

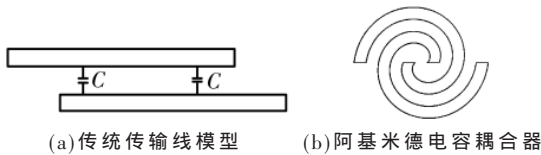


图1 新型电容耦合器的演化过程

通过合理优化螺旋臂宽度、螺旋线的增长率、螺旋臂的间距等参数,可以获得合适的电容值。

根据文献[11],阵列天线在E面和H面的辐射阻抗与 d_E/d_H 成正比,其中 d_E 和 d_H 分别为E面方向和H面方向的阵元间距。当 $d_E=d_H$ 时,如图3(a)所示,阵元的辐射电阻接近 $377\ \Omega$,则紧耦合阵列天线的输入阻抗接近 $200\ \Omega$ 。此时在有限的空间内,设计相应的宽带阻抗变换网络难度很大。通过更改 d_E 和 d_H 的比可以避免使用复杂的阻抗转换网络。当 $d_E=d_H/2$ 时,如图3(b)所示,E面阵元间距的尺寸减半,阵列的输入阻抗减小至 $100\ \Omega$ 。这样,原来的方形阵元就变成了两个小阵元,每个小阵元都有一个辐射偶极子和巴伦,然后两个小阵元并联,形成一个 $50\ \Omega$ 的馈电输入。这样,在有效阵元的数量和阵元的尺寸保持不变的情况下,不需要额外的阻抗转换器,避免了 $200\ \Omega$ 到 $50\ \Omega$ 阻抗转换的带宽限制。但是,这种方法也有其不可避免的缺点,即每个单元需要两个巴伦,从而降低了巴伦的可用尺寸,因此有必要设计一个体积小、工作带宽宽的巴伦来保证阵列性能的实现。

紧耦合阵列天线单元的设计结构如图4所示。蝶形偶极子印刷在垂直放置基板的同一侧,基板材质为

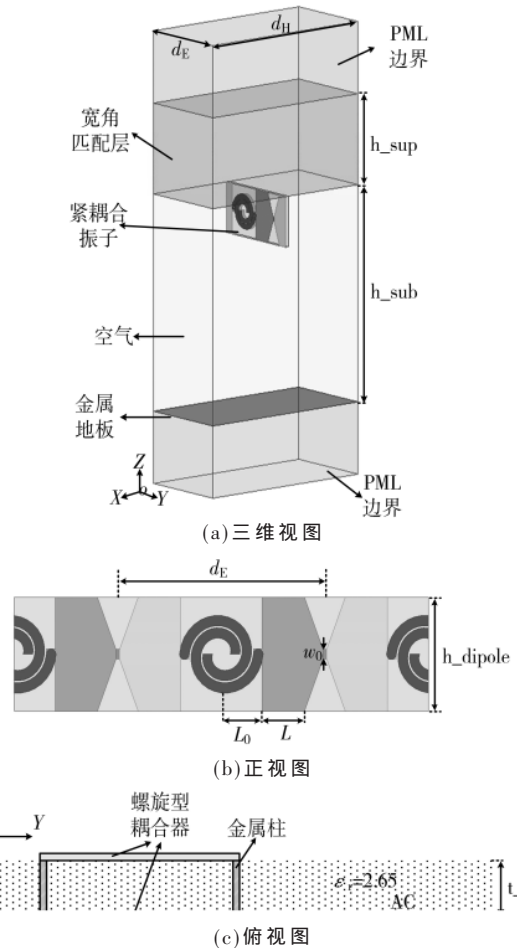


图2 紧耦合阵列天线单元晶胞的基本结构

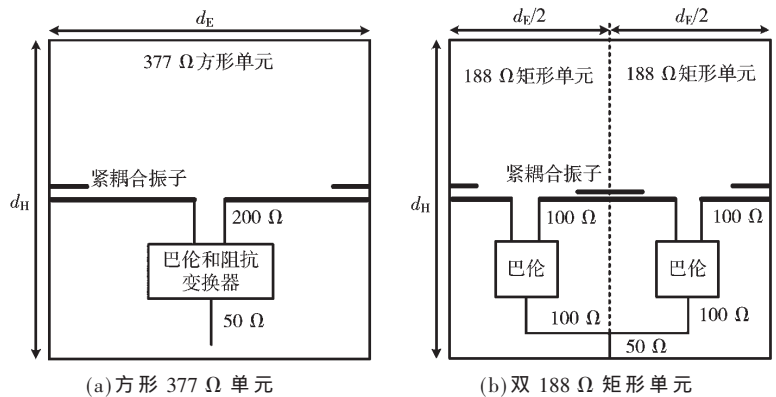


图3 不同阵元间距的单元阻抗分析图

F4B,介电常数为2.65,厚度为 $t_{pcb}=0.5\text{ mm}$ 。使用紧凑的马春德巴伦(Marchand Balun, MB)印刷在F4B基板的另一侧,如图4所示。在紧耦合阵列天线的顶部增加了具有特殊介电常数的介质覆层,称为广角匹配层,以消除阵列天线在宽角扫描中电纳的变化,从而扩展其工作带宽。因此,在仿真模型中,选用介电常数为2.1、厚度为 h_{sub} 的Teflon电介质,单元与厚度为 h_{sub} 的金属地板之间采用空气基板。广角匹配层连接到阻抗为 $Z_0=377\ \Omega$ 的自由空间层。空气层终止于金属地板,相当于

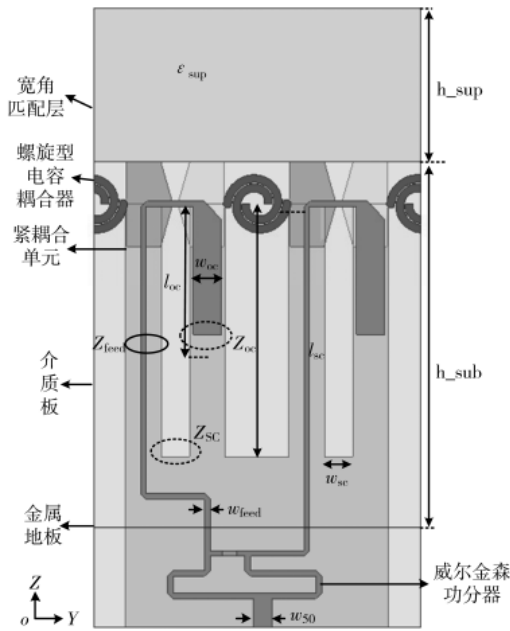


图4 紧耦合阵列天线单元的结构

一条短路的传输线。

图4为无限周期紧耦合阵列天线单元的结构,该单元通过威尔金森功率分配器将两个小矩形单元并联连接形成馈电端口,功率分配器印刷在金属地板下方以避免影响天线辐射。天线阵列扫描时,将在两个单元之间产生环形谐振。谐振可以通过匹配的威尔金森功率分配器来抑制,因为该分配器隔离了两个并联的分支。紧耦合阵列天线的结构参数如表1所示。

表1 紧耦合阵列天线结构参数

(mm)			
参数	数值	参数	数值
d_E	11.75	w_{oc}	2.3
d_H	23.5	l_{oc}	10
h_{dipole}	5	w_{sc}	2.0
h_{sup}	11.5	l_{sc}	16
h_{sub}	23.5	l_m	25

图5为无限周期紧耦合阵列天线的全波仿真结果。经过分析和优化,设计的紧耦合阵列天线在所有平面扫描时有源驻波比小于3的带宽为6.26:1。然而,当使用功率分配器时,有源驻波在某些频带恶化,造成这种现象的原因可能是一级隔离网络不能充分抑制环形谐振。

2 紧耦合阵列设计及性能

以上分析均是基于无限大的周期阵列来进行分析的,鉴于实际情况的条件限制,常取有限的阵列模拟无限大的阵列工作。这时必须考虑有限阵列的边缘截断效应。为减轻有限阵列边缘截断效应以提高带宽,对边缘阵元可引入不同的加载技术,例如电阻加载、短路加载和开路加载^[14]。电阻加载可以实现最低的有源驻波,

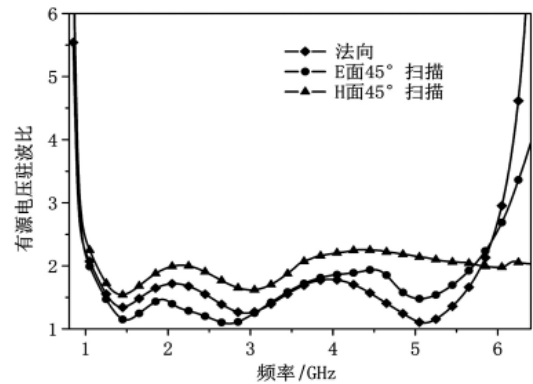


图5 无限周期紧耦合阵列天线的有源驻波比仿真结果

但它也带来损失和低效率的缺点。与短路终端相比,开路加载更容易实现,这里使用将边缘单元开路加载的方法。将图4所示的单元沿Y轴排列形成一个8元线阵,然后将这个8元线阵沿X方向排列形成一个3×8的线极化偶极子阵列,如图6所示。天线单元按照其所在位置进行编号,如X方向第2排Y方向第4个单元记为 (x_2, y_4) 。

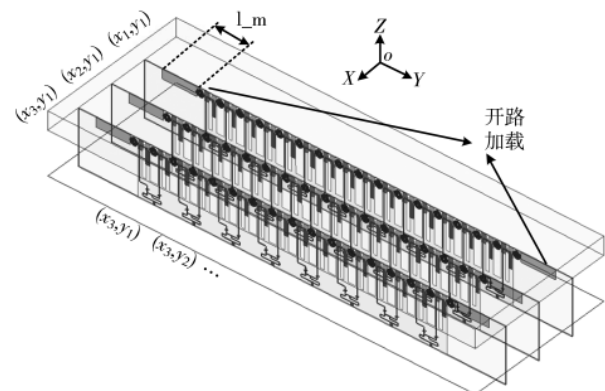


图6 带开路匹配枝节的3×8线极化偶极子阵列示意图

将此阵列放在HFSS软件中进行全波仿真,图7给出了各单元的有源驻波比的曲线。需要说明的是,当阵列不扫描时,X方向第一行和第三行对应单元所处的耦合环境一样,其有源电压驻波比具有一致性,因此图中仅给出第一行和第二行单元的有源电压驻波比曲线。

为了更好地理解开路终端法对阻抗带宽的影响,计算了具有不同开路终端长度($l_m=0.25$ mm)的每个单元的有源驻波。需要注意的是, $l_m=0$ mm时的曲线代表了没有考虑边缘截断效应的每个单元的匹配特性。此时为方便起见,仅呈现X方向第二列单元的有源驻波曲线,如图7所示。从图中可以看出,阵列边缘单元的匹配情况较中心单元差,且其低频段的匹配急剧恶化,其原因是阵列截断引起电流不连续,引起较大的电流反射,而中心单元受截断影响较小,有源电压驻波比在1.2~6.2 GHz频带内基本在3以下。此外由于阵列的对称性,Y方向的一行对应位置单元因耦合环境一致具有基本相同的电压驻波比,如单元 (x_1, y_1) 和 (x_1, y_8) , (x_1, y_3) 和 (x_1, y_6) 等。

图 8 给出了 3×8 有限紧耦合阵列在不同扫描面的归一化辐射方向图。图 8(a)、8(b)、8(c)分别为 1.4 GHz、

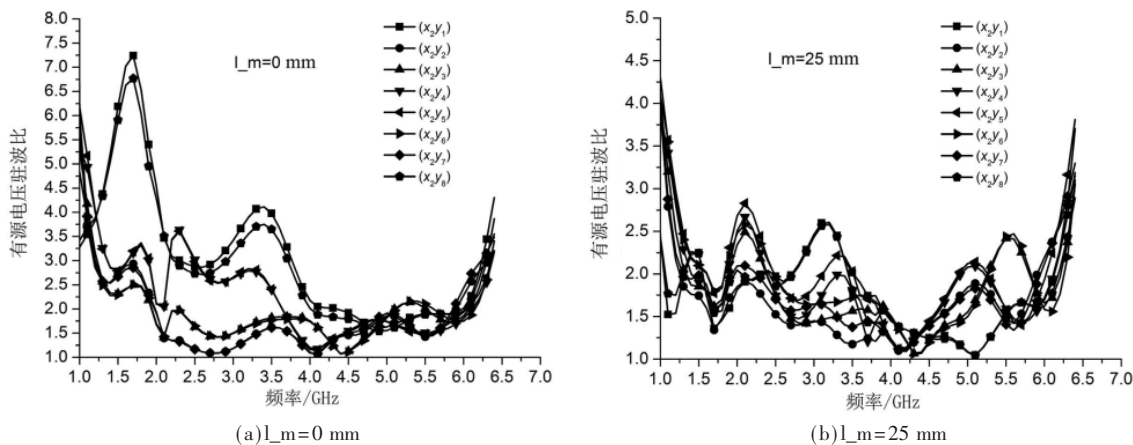


图 7 具有不同长度的开路加载的中间列阵元的有源驻波

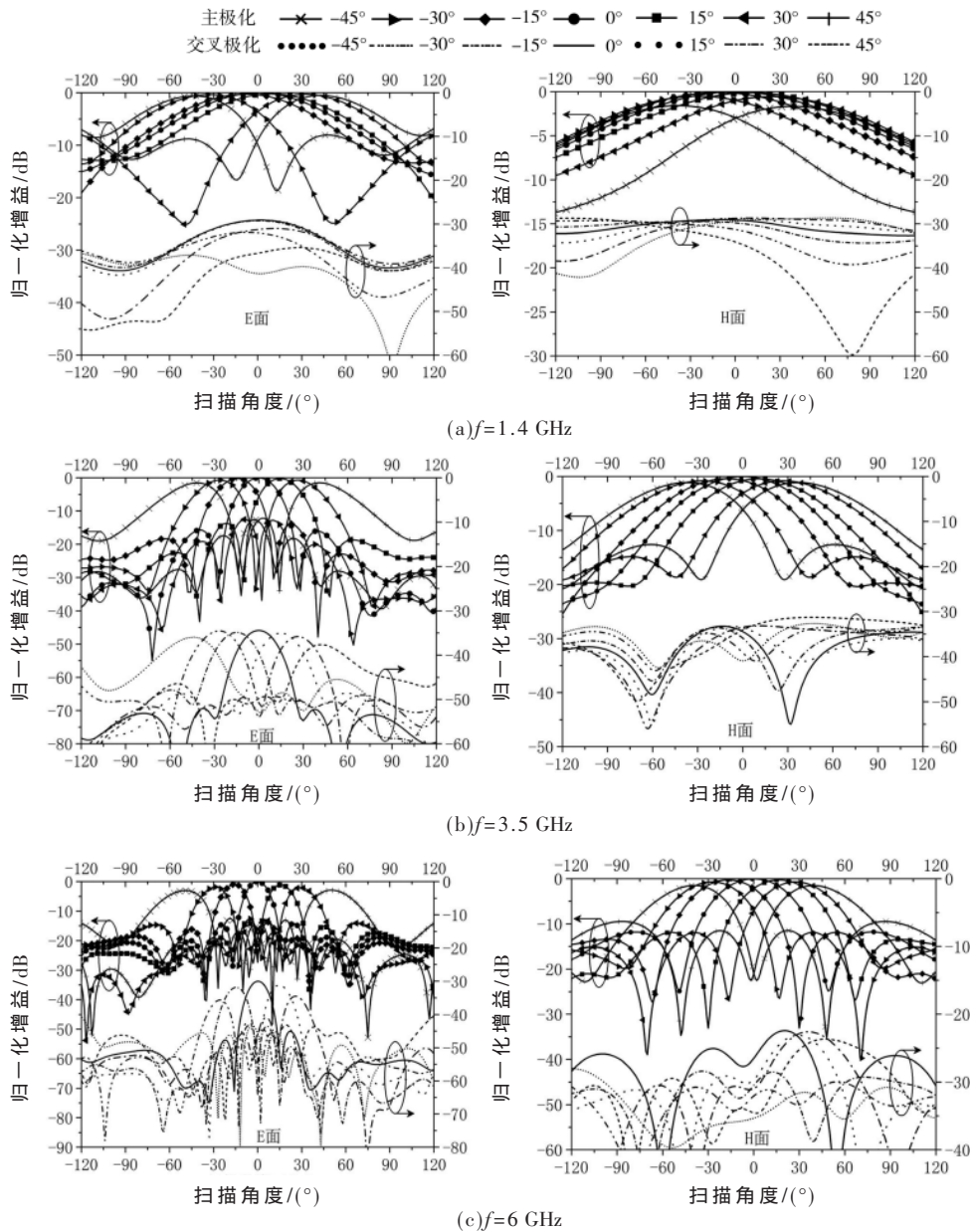


图 8 有限紧耦合阵列辐射方向图

3.5 GHz 和 6 GHz 处的方向图,左右两图分别为 E 面和 H 面扫描方向图。从图中可以看到,阵列在 E 面和 H 面均有 $\pm 45^\circ$ 的扫描能力,扫描特性较好,除了低频段的交叉极化为 $-25 \sim -15$ dB 外,别的频带均有 -30 dB 以下的交叉极化。在低频段因为阵列的电尺寸较小,波束宽度较大,因而最大波束指向不明显,随着频率升高,电尺寸的增大,阵列的最大波束指向明显加强。

3 天线实物测试

为了验证设计的正确性,根据图 6 所示的结构及表 1 所给的紧耦合阵列天线的结构参数制作了天线实物,天线实物测试如图 9 所示。

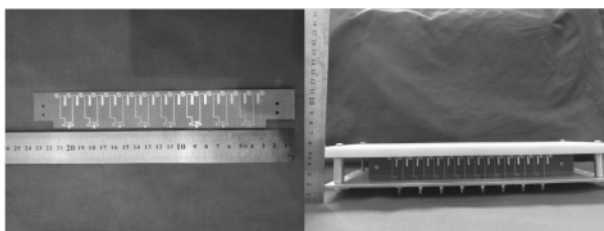


图 9 天线实物图

受测试条件的限制,有源电压驻波比不能直接测出,可通过间接方法进行测试:首先在非测试单元接负载匹配的情况下测量出两两单元间的散射矩阵,再经过后处理计算出每个单元的有源驻波。详细方法描述如下:

阵列天线的端口间的散射矩阵可以由以下方程组描述:

$$\text{active VSWR}_{(m,n)} = \frac{1 + \text{mag}(\text{active } S_{(m,n)})}{1 - \text{mag}(\text{active } S_{(m,n)})} \quad (1)$$

$$\text{active } S_{(m,n)} = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^8 \left[\frac{a_{(p,q)} S_{(m,n),(p,q)}}{a_{(m,n)}} \right] \quad (2)$$

此处, (m,n) 代表需要求解的单元编号, $a_{(p,q)}$ 代表端口入射波。 $S_{(m,n),(p,q)}$ 是单元 (m,n) 和单元 (p,q) 间的散射矩阵。

图 10 给出了加工的紧耦合阵列天线中间一列单元

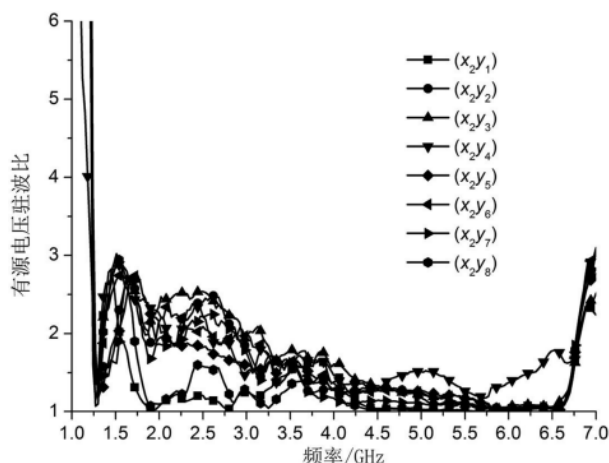


图 10 3×8 紧耦合阵列有源驻波测试曲线

的有源驻波测试曲线。可以看到,天线的有源驻波比在 1.3~6.8 GHz 频段小于 3,即获得了 5.2:1 相对阻抗带宽,表明该阵列有较好的宽频带工作特性。测试结果与仿真结果略有差异,可能原因是加工精度不够和测试误差所致。

4 结论

本文提出了一种新型的阿基米德电容耦合器实现了阵列单元间的强互耦,并以此为依据,结合印刷蝴蝶结偶极子、宽带巴伦和功率分配器构建了新型的紧耦合阵列天线。测试结果表明,所设计的紧耦合阵列天线在所有平面 $\pm 45^\circ$ 扫描下有源驻波小于 3 的阻抗带宽达到 5.2:1,验证了新型电容耦合器的优良性能,为紧耦合阵列天线的设计提供了新的设计思路。

参考文献

- [1] TZANIDIS I, SERTEL K, VOLAKIS J L. UWB low-profile tightly coupled dipole array with integrated Balun and edge terminations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(6): 3017-3025.
- [2] MOULDER W F, SERTEL K, VOLAKIS J L. Superstrate-enhanced ultrawideband tightly coupled array with resistive FSS[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(9): 4166-4172.
- [3] 王泽东. 宽频带定向天线及强耦合阵列天线研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- [4] 胡志慧, 姜永华, 凌详. 基于电阻型频率选择表面的超宽带紧耦合阵列[J]. 电波科学学报, 2013, 28(6): 1144-1150.
- [5] WHEELER H. Simple relations derived from a phased array antenna made of an infinite current sheet[J]. Transactions on Antennas and Propagation, 1965, 13(4): 506-514.
- [6] MUNK B, TAYLOR R, DURHAM T, et al. A low-profile broadband phased array antenna[J]. IEEE AP-S International Symposium, 2003(2): 448-451.
- [7] HOLLAND S S, SCHAUBERT D H, VOLAKIS J L. A 7-21 GHz dual-polarized planar ultrawideband modular antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012(10): 4589-4600.
- [8] MOULDER W F, SERTEL K, VOLAKIS J L. Ultrawideband superstrate-enhanced substrate-loaded array with integrated feed[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(11): 5802-5807.
- [9] TZANIDIS I, SERTEL K, VOLAKIS J L. Characteristic excitation taper for ultrawideband tightly coupled antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(4): 1777-1784.
- [10] PAPANATONIS D K, VOLAKIS J L. Dual-polarized tightly coupled array with substrate loading[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letter, 2016, 15: 325-328.
- [11] DOANE J P, SERTEL K, VOLAKIS J L. A wideband, wide

(下转第 132 页)

- 制和目标检测方法[J].雷达学报, 2020, 9(4): 640-653.
- [13] 吕焦盛.基于 TCP/IP 协议的网络通信服务器设计与实现[J].赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(9): 50-52.
- [14] 刘彦平.基于 Qt 的 Windows 平台组播通信技术研究[J].软件, 2017, 38(1): 135-138.
- [15] 黄翩, 张琼, 祝婷.基于 Qt 的一个服务器多个客户端的 TCP 通信[J].电子科技, 2015, 28(3): 76-78, 82.

(收稿日期: 2021-03-01)

(上接第 122 页)

胶层厚度会引起高度测量值的偏移,如:在铬上涂敷 PMMA 后,由于在 PMMA 中的折射,铬表面看起来位置会更高一些,高度测量计读出的高度约为铬表面之上 PMMA 厚度的 0.69 倍,因此需要根据抗蚀剂厚度增加一个偏移量,以便有效读出衬底表面的真实高度。

6 结论

在光刻设备中也有采用二象限、四象限光电管作为探测器,采用汞灯、卤素灯作为测量光源的,利用光阑、光栅图形,应用双折射调制技术和激光功率脉宽控制等技术进行测量的方法。本设计的电路实现了 CCD 的光积分时间的调整和激光器的功率的调整,利用这两种方法来获得高质量的测量信号,提高测量的准确性和对不同材料的适应性,可以满足电子束曝光使用要求和投影光刻的高度粗调的技术要求。

参考文献

- [1] 陈安.曝光光学系统性能对光刻性能影响的研究[D].成都:中国科学院光电技术研究所, 2013.
- [2] 金晓刚.光刻工艺中的焦距异常发生原因分析及解决办法[D].上海:复旦大学, 2009.
- [3] 冯俊艳, 冯其波, 匡萃方.高精度激光三角位移传感器的技术现状[J].应用光学, 2004, 25(3): 33-36.
- [4] GARCIA D F, GARCIA M, OBESO F, et al. Flatness measurement system based on a nonlinear optical triangulation technique[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 188-195.

(上接第 127 页)

- scanning tightly coupled dipole array with integrated Balun (TCDA-IB)[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(9): 4538-4548.
- [12] CHEN Y K, YANG S W, NIE Z P. The role of ground plane plays in wideband phased array antenna[C]//IEEE International Conference on Ultra-Wideband Antenna, 2010, 2: 1-4.
- [13] CHEN Y K, YANG S W, NIE Z P. A novel wideband antenna Array with tightly coupled octagonal ring elements[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2012, 124: 55-70.
- [14] TZANIDIS I, SERTEL K, VOLAKIS J L. Excitation and

作者简介:

侯彭亮(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向: 雷达显卡平台开发。

郭苹(1989-), 通信作者, 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 合成孔径雷达成像算法研究, E-mail: guopingxidian@126.com。

王展鹏(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向: 雷达显控设计。



扫码下载电子文档

- [5] 刘书明, 苏涛, 罗军辉. TigerSHARC DSP 应用系统设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [6] 王晓明, 庄喜润, 崔建. 高性能工业控制 DSP—ADSP-2199X 原理及应用[N]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [7] 元琳. 基于线阵 CCD 的小型光电位移监测系统的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013, 2.
- [8] 张智辉, 田地, 杨义先. 线阵 CCD 驱动电路设计的几种方法[J]. 仪表技术与传感器, 2004(6): 32-33.
- [9] 黄红星, 卢凌, 肖李, 等. 基于 DSP 的 CCD 驱动电路的设计[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 26(6): 811-814.
- [10] 孙立环, 赵霄洋, 高凌好, 等. 基于亚像素定位技术的激光光斑中心位置测量[J]. 激光技术, 2017, 41(4): 511-514.
- [11] 陈青山, 吕乃光. 激光准直高斯光斑中心位置计算方法分析[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(5): 486-488.
- [12] 王祖军, 张勇, 唐本奇, 等. TCD132D 线阵 CCD 总剂量效应的实验分析[J]. 电子器件, 2010, 33(1): 18-21.
- [13] 颜伟彬, 赵斌. 基于数字信号处理器的 CCD 自动增益调整[J]. 传感器技术, 2004, 23(3): 74-76.

(收稿日期: 2020-12-26)

作者简介:

赵英伟(1971-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 半导体工艺设备。

郝晓亮(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 电子束光刻机和扫描电镜等。

张文雅(1982-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 投影光刻机等。



扫码下载电子文档

termination of finite tightly coupled antenna arrays based on structural characteristic modes[J]. Proceeding on Antenna Applications Symposium. IEEE, 2011: 103-106.

(收稿日期: 2021-05-30)

作者简介:

杨龙(1988-), 通信作者, 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向: 宽带天线、共形相控阵, E-mail: wuyanqianzi@163.com。

周文涛(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 相控阵天线、数字信号处理。

王娜(1989-), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 相控阵天线、测控通信系统。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所