

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107814

一种更低剖面的平面超宽带模块化天线阵列设计

覃昱翔¹ 张洪银^{1,2} 吴鸿超^{1,2}

(1.南京电子技术研究所 南京 210039; 2.天线与微波技术重点实验室 南京 210039)

摘要:针对现代社会多功能一体化、小型化、轻量化的趋势,并基于前人的研究,提出了一种更低剖面的平面超宽带模块化天线阵列。该阵列通过更换介质基板材料,并在天线末端添加金属片的方式,降低天线剖面的同时,保证天线在5.5~21.35 GHz频带内具备较好的性能。仿真结果表明,在边射、45°和55°三种扫描状态下,有源驻波比分别低于2.0、3.0和3.5;端口隔离度大部分低于-15 dB;交叉极化亦能低于-15 dB。在具备较好的天线性能同时,更低的剖面,有利于降低实际工程应用中的成本。

关键词:超宽带天线;低剖面;模块化;双极化

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

New design of planar ultrawideband modular antenna array with lower profile

Qin Yuxiang¹ Zhang Hongyin^{1,2} Wu Hongchao^{1,2}

(1. Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210039, China; 2. Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: With the trend of multifunctionality, miniaturization and light weight, this paper, based on former researches, presents a new design of planar ultrawideband modular antenna (PUMA) array with lower profile. By replacing the substrate materials and adding metal plate at edges of antenna, the antenna can achieve lower profile and good performance within operating band of 5.5~21.35 GHz. The simulation results show that the Active VSWR < 2.0, 3.0, 3.5 while scanning to broadside, 45°, 55°, respectively, and both port isolation and cross polarization can be lower than -15 dB. With good performance, lower profile leads to much less cost on engineering application.

Keywords: UWB antenna; low profile; modularity; dual polarization

0 引言

现代社会,通信、射电望远镜、雷达、电子对抗等多功能一体化的趋势下,超宽带天线在未来有着广阔的应用前景^[1],而轻量化、小型化亦使天线低剖面设计成为潮流。

超宽带天线的历史最早可追溯到上世纪七十年代,由 P. J. Gibson 设计的 Vivaldi 天线,带宽达 2~20 GHz,但剖面高度高达 $2\sim 3\lambda_H$ ^[2]。过高的剖面会引起交叉极化的恶化,文献[3]提出了一种槽型 Vivaldi 天线,解决了交叉极化恶化的问题的同时,降低了剖面,便于实际工程化应用,但剖面仍达 $1\lambda_H$ ^[4]。

1965年, Wheeler 提出了无限大电流片(infinite current sheet, ICS)的理想模型,后人在此基础上提出了包括连接阵在内的多种近似模型。但当其置于金属地之上时,均存在低频带匹配恶化的问题^[5]。2003年, Munk 团

队^[6]基于等效电路分析法,利用单元间的电容耦合,抵消由金属地引入的低频感抗,解决了匹配恶化的问题,并提出了紧耦合偶极子阵列(tightly coupled dipole array, TCDA)。该阵列工作带宽可达 4.5:1 甚至 9:1。

2010年,麻省理工大学 Vouvakis 团队基于 TCDA 提出了一种新型超宽带天线阵列——平面超宽带模块化天线阵(planar ultrawideband modular antenna array, PUMA),采用非平衡馈电,避免了巴伦等外置匹配网络的使用,结构简单便于加工,工作带宽可达 3:1~5:1^[7-9]。但均采用了短截线结构以消除共模谐振,从而引起环路谐振,使低频带匹配恶化,且文献[8-9]采用了偶极子非同层设计,加强耦合的同时,容易引起“寄生效应”^[10]。为消除环路谐振,文献[10-11]采用了金属耦合接地结构,且文献[10]引入了“肋带”结构以满足 PCB 工艺需求,并将带宽拓至 6:1,剖面高度仅为 $0.48\lambda_H$,但该设计介质层数过多,不利于控

收稿日期:2021-09-08

制成本。

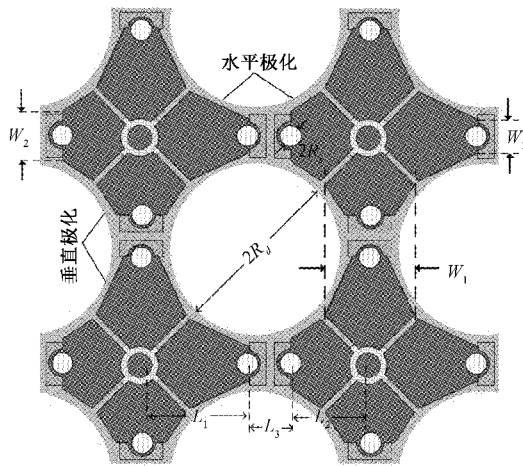
不难看出,尽管现有 PUMA 阵列具有较低的剖面,但仍存在低频匹配较差或介质层过多、成本较高的问题。故本文提出了一种新的 PUMA 阵列,通过更换介质材料,减少材料的使用,将剖面降至 $0.35\lambda_H$,减小成本。仿真结果表明:天线工作带宽达 $5.5\sim 21.36$ GHz,在边射、 45° 及 55° 扫描时,有源驻波比分别小于 2.0、3.0 与 3.5;带内端口隔离度及交叉极化均低于 -15 dB。

1 原理与设计

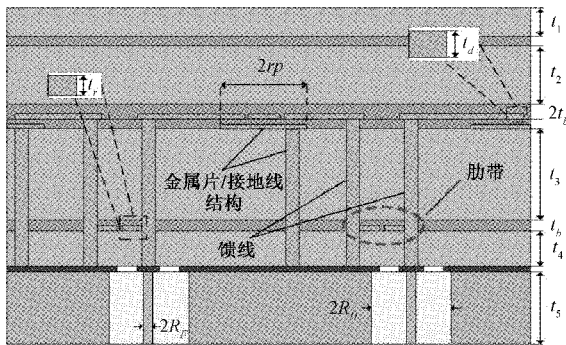
本文采用非对称平面偶极子单元,如图 1(a)所示,相邻单元排列在同一层 PCB 板上,利用单元间的电容耦合消除金属地带来的感抗效应,避免非同层排列带来的寄生效应。

由于非平衡馈电会引起共模谐振^[12]——因馈线间的电流幅度和相位不相等,无法相互抵消,从而导致其与邻近单元构成探针馈电式二维谐振腔结构,并在特定的频率下形成谐振。与单极化阵列不同,双极化阵列单元之间具有强烈的耦合特性,相互之间耦合的功率没有“对应的端口进行吸收”,使得共模谐振在双极化阵列中显得格外强烈^[12]。

为消除共模谐振,天线下方放置一个金属片,并与金属地连接,形成脊型波导结构,如图 1(b)所示。理论表明,谐



(a) 俯视图



(b) 主视图

图 1 阵列结构

振频率与波导主模的截止频率相关,且随着接地金属片高度 h 的增加,谐振频率逐渐向低频端移动,当 $h=0.97\lambda_H$ 时,共模谐振将被移出带外^[10]。由于接地金属片与偶极子之间的电容耦合对低频匹配有较大的影响,故在偶极子的尖端添加小金属片,以加强两者之间的耦合。

根据 Munk 的理论,将整个结构视为一个终端短路的等效电路——金属地可视为短路,如图 2 所示。阵面下方的馈线可视为双线传输线,上方的自由空间亦可视为一段传输线终端接匹配负载 $Z_L=377\Omega$ 。下方的低耗介质基板既可改善带内阻抗匹配,还可用于支撑整个阵面。进行波束扫描时,单元间的互耦导致阻抗(或导纳)随扫描角的变化而变化^[13],需在阵面上方添加宽角匹配层;当扫描角度过大时,电磁波在介质内部发生全反射,激起横向传播表面波,后者会对高频阻抗匹配和辐射带来严重的影响^[14]。降低剖面并采用介质层打孔的方式,可有效地抑制表面波^[12]。

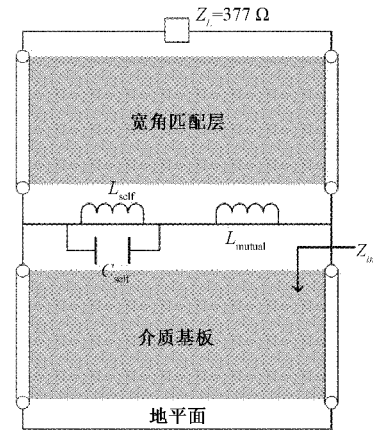


图 2 等效电路图

各介质层分别如图 1(b)中 $t_1\sim t_4$ 所示,其中, t_1 和 t_2 分别采用:RA1000(10.2, 0.0021)、RP220B(2.2, 0.0009), t_3 与 t_4 均为 RA300B(2.94, 0.0011);介质层之间用粘结石 RLP30(3.0, 0.002)连接,厚度为 t_b 。所有板材均由无锡睿龙科技公司提供,且均为标准厚度。

为了满足 PCB 工艺,需扩大馈线间距,但这会改变传输线的特征阻抗从而对匹配造成影响。故馈线间添加一对相向而视的“肋带”,由介质板上的铜箔刻蚀而成,如图 1(b)虚线圈所示。“肋带”可在扩大馈线间距的同时提供补偿电容,调节带内阻抗匹配^[10]。

在金属地与 50Ω 同轴接头之间放置铝板,并在后者相对位置处挖圆柱形孔洞,中心放置细铜芯与馈线相连,并填充聚四氟乙烯(Teflon)。整个圆柱孔洞构成一个同轴变换器,用于馈线与同轴接头之间做阻抗匹配。阵列与金属地之间的距离约为 $0.18\lambda_H$,整体剖面高度(不包含金属地与铝板)约为 $0.35\lambda_H$ 。

阵列尺寸如表 1 所示。

表 1 PUMA 阵列几何尺寸/mm

D_x	D_y	t_r	t_d	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_b
7.09	7.09	0.017 8	0.069	0.635	1.016	1.778	0.762	1.2	0.112
L_1	L_2	L_3	W_1	W_2	W_3	R_s	R_H	R_F	rp
3.02	2.26	1.7	2.94	1.78	1.34	0.4	1.2	0.254	0.8

2 仿真设置

为了验证本文设计的天线阵列在降低剖面的同时仍具有较好的性能,基于上述结构,利用仿真软件进行建模仿真。

通过构造周期性单元结构,并添加边界条件以模拟无限大阵列环境,如图 3 所示。

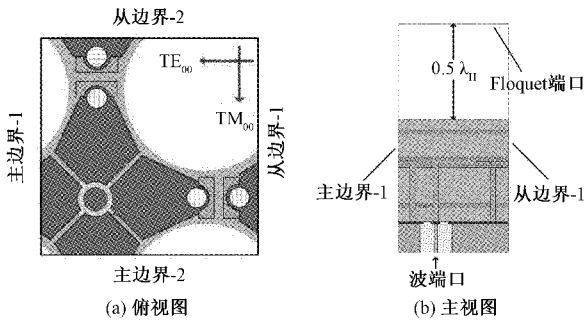


图 3 周期性单元模型图

将周期性单元置于空气腔内,其顶端距离阵面 $0.5\lambda_H$,四周添加周期性边界条件;顶部添加 Floquet 端口,并添加两个相互正交的模式—— TE_{00} 与 TM_{00} ,极化方向如图 3(a)所示——用以吸收两个正交极化方向的辐射电磁波;两个通道的输入端口均位于铝板最下端的同轴变换器圆截面,如图 3(b)所示,采用波端口 (Wave Port) 激励,并归一化至 $50\ \Omega$ 。除铝板和铜芯为对应的金属材料外,其他金属均为 PEC 材料。

本次仿真由 Ansys HFSS 2020 R2 软件完成。

3 结果

3.1 阻抗匹配

3 种扫描方式下有源驻波比与频率关系的仿真结果如图 4 所示。在 $5.5\sim 21.36\ \text{GHz}$ 的工作频带内,边射、 45° 与 55° 三种扫描状态下有源驻波比分别小于 2.0、3.0 与 3.5,且 E 面扫描比 H 面扫描的匹配效果要好,这是可以预见的。图 5 为端口隔离度与频率的关系,带内端口隔离度主要小于 $-15\ \text{dB}$,且绝大多数小于 $-20\ \text{dB}$,隔离效果较好。与文献[10]的结果相比较,不难看出,本设计的工作频带能够覆盖其 89.7%,带内匹配效果相当,且相对前者拥有更低的剖面以及更少的介质材料使用量。

3.2 极化与辐射

根据 Ludwig 关于线极化的定义,我们可以用天线的辐射效率来衡量交叉极化与主极化的特性^[15]。因此,可通

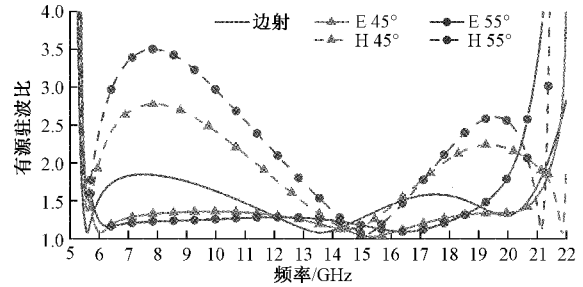


图 4 有源驻波比

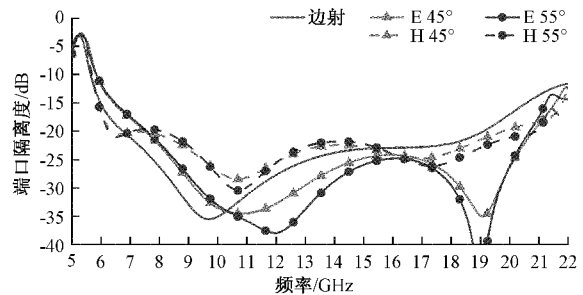
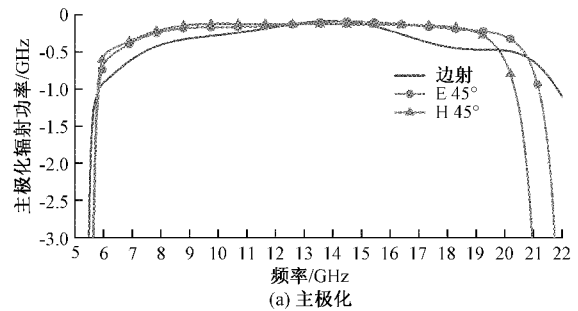


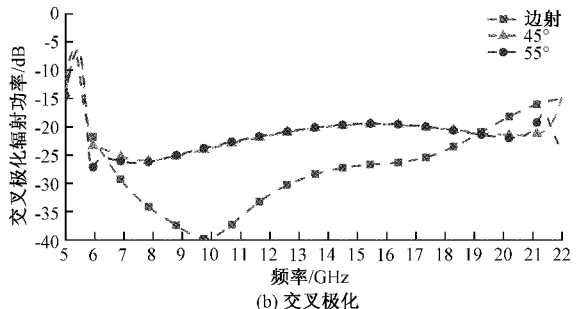
图 5 端口隔离度

过 S 参数分别读出由波端口馈入,并以主极化模式(与天线平行)和交叉极化模式耦合(辐射)至 Floquet 端口的能量,从而判断交叉极化以及辐射特性。

图 6 给出了 3 种扫描方式下的归一化辐射能量图,可



(a) 主极化



(b) 交叉极化

图 6 归一化辐射效率

以看出:频带内主极化辐射大部分均高于-0.5 dB,除频带两端因共模谐振与表面波的影响低于-1 dB。意味着更好的带内匹配、更多的能量沿着主极化方向辐射入自由空间,以及更低的端口能量耦合。交叉极化则小于-15 dB且绝大部分小于-20 dB,表明天线的极化特性较好。

3.3 有限阵列与远场

现实中不可能做无限大阵列,故而研究有限阵列是有必要的。通过天线阵列设置(antenna array setup),以 9×9 阵列为例进行分析。图7分别给出,在 $f = 6, 13, 20$ GHz时,边射方向的方向图。不难看出,这3个频点的方向图的主瓣最大值处,主极化与交叉极化之差分别为22.09、27.71、17.8 dB,表明在实际应用中,本文设计在降低剖面的同时,拥有较好的天线性能。

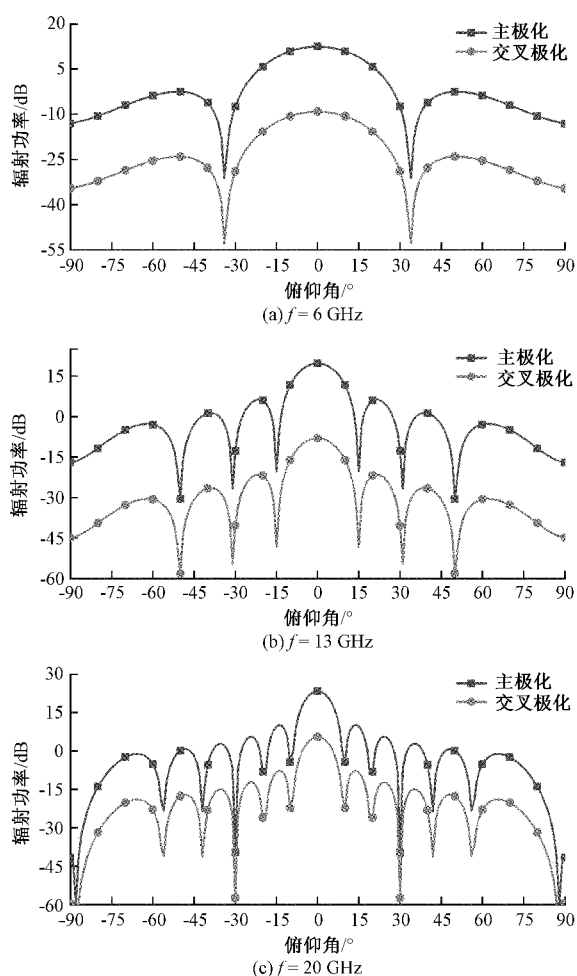


图7 9×9 阵列远场方向图

4 结 论

本文基于共模谐振的产生激励,以及 Munk 的等效电路分析法,分析并验证了一种新的平面超宽带模块化天线阵列设计的可行性。通过末端金属片的添加以及介质材料的更换,工作带宽达 5.5~21.35 GHz,带内匹配、极化与

辐射特性较好。与现有方案相比,具有更低的剖面,使用的介质材料更少,利于实际加工中减小成本。

不难看出,当进行大角度扫描时,高频驻波靠近奇点,后者在工艺误差的情况下容易引进带内,影响天线性能。因此进一步改善大角度扫描高频匹配将是下一步研究的方向。

参考文献

- [1] CHEN Z. Development of ultra-wideband antennas[J]. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2013, 3(2): 63-72.
- [2] 张航宇. 紧耦合天线阵超宽带宽角扫描及低剖面化技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- [3] LOGAN J T, KINDT R W, VOUVAKIS M N. Low cross-polarization vivaldi arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4): 1827-1831.
- [4] 李晓金,郭先松,李记任,等. 一种超宽带,低交叉极化,低剖面的消控阵天线单元设计[J]. 电子测量技术, 2019, 62(21): 5-9.
- [5] TZANIDIS I. Ultrawideband low-profile arrays of tightly coupled antenna elements: Excitation, termination and feeding methods [D]. Columbus: Ohio State University, 2011.
- [6] MUNK B A. Finite antenna arrays and FSS[M]. New York, A Wiley-Interscience Publication, 2005.
- [7] HOLLAND S S, SCHAUBERT D H, VOUVAKIS M N. A 7~21 GHz planar ultrawideband modular array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(10): 4589-4600.
- [8] HOLLAND S S, VOUVAKIS M N. The planar ultrawideband modular antenna (PUMA) array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 130-140.
- [9] 黄博. 低剖面平面模块化超宽带阵列天线的研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [10] LOGAN J T, KINDT R W, LEE M Y, et al. A new class of planar ultrawideband modular antenna arrays with improved bandwidth[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(2): 692-701.
- [11] 李祥祥,李哲,腾飞. 平面模块化超宽带阵列天线设计[C]. 2019年全国天线年会,昆明:2019:1-3.
- [12] HOLLAND S. Low-profile, modular, ultra-wideband phased arrays [D]. Amherst: Massachusetts University of Massachusetts Amherst, 2011.
- [13] WHEELER H A. Simple relations derived from a phased array made of an infinite current sheet[C]. 1964 Antennas and Propagation Society International Symposium, New York, USA, 1964.
- [14] HERRY H V, CHEN C C, HAGAN P, et al. A very

low-profile UWB phased array antenna design for supporting wide angle beam steering[C]. 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, USA, 2016.

- [15] LOGAN J T. A new class of improved bandwidth planar ultrawideband modular antenna (puma) arrays

scalable to mm-waves[D]. Amherst University of Massachusetts Amherst, 2014.

作者简介

覃昱翔, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术。

E-mail: yuxqin@163.com