

零磁导率谐振器加载宽带印刷单极子天线设计 *

李晓峰,彭 麟

(桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004)

摘要: 在印刷单极子天线上刻制零磁导率谐振器(MZR),使MZR的谐振频率低于并融合于天线的谐振频率,不但可有效减小天线整体尺寸,还可增加天线带宽。设计并制作了原型天线,测试结果表明,加载MZR后的印刷单极子天线的阻抗带宽可以显著向低频段扩展。由于天线具有电小结构,保证了辐射的全向特性和波束指向稳定性。同时基于微带线模型对MZR加载天线机理进行了讨论分析。

关键词: 零磁导率谐振器;加载单极子;小型化;宽频带

中图分类号: TN823

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200135

中文引用格式: 李晓峰,彭麟. 零磁导率谐振器加载宽带印刷单极子天线设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(8): 13–16, 20.

英文引用格式: Li Xiaofeng, Peng Lin. Design of MRZ-loaded wideband printed monopole antenna[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(8): 13–16, 20.

Design of MRZ-loaded wideband printed monopole antenna

Li Xiaofeng, Peng Lin

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A mu-zero resonance(MZR) resonator is etched in the patch of a printed monopole antenna. The MZR resonator generates a new resonance. As the MZR resonance is lower than the monopole and the resonances merge with each other, size reduction and bandwidth enhancement were obtained. A prototype was designed and fabricated. The test results show that the impedance bandwidth of the MRZ-Loaded monopole is extend to lower frequency remarkably. Because of the small electric structure of the antenna, the omnidirectional radiation and the beam pointing stability is well guaranteed. A microstrip line based model was built to analyze the MZR resonator antenna.

Key words: mu-zero resonance resonators; loaded monopole; miniaturization; wide band

0 引言

单极子天线由于结构简洁和全向辐射特性而获得广泛应用,平面印制单极子天线可在电路板上直接蚀刻完成,同时不需要进行平衡到不平衡的转换,其制作方便并且可与电路集成,是常用的天线类型。印制单极子天线通过结构的改进能获得非常大的阻抗带宽,常见的方案是通过改变单极子的形状结构或者接地板的形状结构来实现宽频带的阻抗匹配^[1-5]。例如文献[1]中提出一种印刷三角形单极子天线;文献[3]设计了一种印刷椭圆形单极子天线,通过在微带线的屏蔽导体上开一个凹槽来调整天线的阻抗带宽;文献[4]分析了圆形单极子天线的特性;文献[5]通过在接地上端引入渐变梯形结构调整馈入端接地面间隙,实现印制矩形单极子天线的超宽带特性。

常见的印制单极子的形状包括圆形、椭圆形、三角

形、半圆形、多边形等结构。对比分析这些不同形状的印制单极子天线,不难发现,它们具有相似的阻抗特性。它们的阻抗带宽对其形状变化并不敏感,这是因为印制单极子天线的阻抗带宽性能及工作原理是一致的,其宽带特性可被视为理想单锥天线的非频变特性。此类超宽带单极子天线难以实现小型化设计,其辐射振子的最小尺寸受限于其最低设计频率,而且在高频端由于振子的电尺寸变大,其方向图出现副瓣,进而波束指向改变,失去全向辐射特性。

利用容性加载能够有效地提高电小天线的辐射效率,通过加载改变振子上的电流分布,实现低频的匹配是实现天线小型化的有效方法。但是对于印制结构天线,为了实现较大的电容加载,往往使得振子结构变化较大而破坏了其全向辐射特性^[6-8]。

超材料谐振器结构紧凑,利用贴片与接地板结构可以方便形成等效超材料模型,因此它在微带天线设计中具有很大的吸引力^[9-10]。然而,超材料谐振器天线存在着频带窄、增益小等缺点^[9-13]。为了克服这些缺点,天线

* 基金项目: 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室基金(GXKL06170109);国家自然科学基金(61661011)

设计中一般采用加载电磁带隙、短路枝节,甚至多层结构或者厚介质板等方法,通过激发多谐振多模式增加带宽。但是,这种设计不仅增加制造的复杂性,其引入的非对称结构也会导致天线辐射方向图倾斜或变形^[13-15]。

本文采用新型零磁导率谐振器(MZR)对印刷天线进行加载,增加天线带宽,减小天线尺寸。谐振器尺寸很小,可直接刻蚀于单极子上,保持了天线的紧凑特性。

1 天线结构

选择圆形单极子天线作为参考天线,如图1(a)所示,天线谐振频率设在2.2 GHz,印制在介电常数为2.65、厚度为1 mm的F4B-2介质基板上,介质基板的尺寸设置为52 mm×45 mm;天线接地平面印制在介质另一面,高度为h=15 mm;圆形单极子贴片的直径D₁=33 mm;馈线的宽度s设置为2 mm,长度p设置为16 mm。MZR加载是在参考天线的圆形单极子上嵌入蘑菇形的加载贴片构成零阶谐振器,其结构较小,可以直接被蚀刻在圆形辐射振子上,如图1(b)所示,蘑菇形加载片的茎直接与圆形极子及馈线贯通,茎宽与馈线宽度一致,茎长l设置为13 mm,蘑菇头由长短轴半径分别为a=7 mm,b=5 mm的椭圆刻制构成。

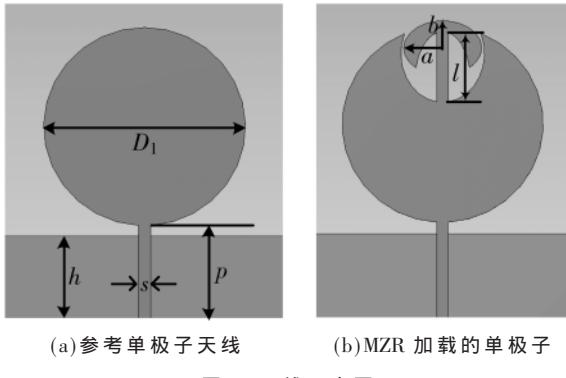


图1 天线示意图

当天线被激励,圆形极子中的电流沿宽度为s的条形带(蘑菇茎)流动,等效为电感L₁,而加载贴片(蘑菇头)和圆形极子以及条带之间的电场效应,等效为电容C₁,天线的圆形极子充当MZR谐振器的地面,形成短路终端边界以激发谐振。MZR谐振器的尺寸决定等效电感与电容的大小,从而确定谐振频率($f_1=1/2\pi\sqrt{L_1C_1}$)。为了简单起见,单极子辐射可以看作是终端开路的微带线谐振器,可将其视为LC并联谐振器,则整个加载天线的等效电路如图2所示,其中并联的L₀C₀为圆形极子的等效模型,而MZR谐振器也被称为串联谐振器,等效

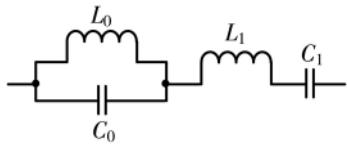


图2 天线等效电路

为L₁C₁串联模型。MZR的谐振频率与单极子的谐振频率进行组合,两个谐振器的合并可以提高带宽,由于MZR的谐振频率比单极子的谐振频率低,工作频带会向低频扩展^[6]。

2 设计与讨论

参考天线和MZR加载单极子天线的反射系数S₁₁参数曲线如图3所示。可以看出,在低于3 GHz频率范围内,在参考天线的S₁₁参数曲线上,只在f₀=2.18 GHz处观察到一个谐振,而在MZR加载单极子天线的S₁₁参数曲线上,除了与参考天线曲线相似的f₀谐振点外,还可以看到另外一个谐振值,其两个谐振频点分别为f₀=2.22 GHz,f₁=1.6 GHz。嵌入的MZR所产生的额外谐振提高了低频段的阻抗,从而实现了天线在低频段的阻抗匹配。由于振子结构一致,加载天线与参考天线具有相似的S₁₁参数曲线,同样会出现高阶谐振频率,并且加载谐振器会引起高阶的谐振点向低频端偏移,例如4 GHz附近的谐振点f₂。

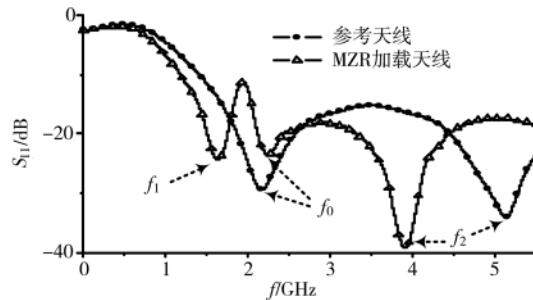


图3 参考天线和MZR加载天线的S参数比较

为进一步揭示该天线的工作机理,图4、图5给出了两个谐振频点处的电场和电流分布。如图4所示,f₁=1.6 GHz的电场E在MZR谐振器位置处更为集中,电场能聚集于加载贴片引入的电容C₁,而f₀=2.2 GHz对应的E场更集中于圆形振子的下边缘,可以解释为圆形单极子与接地面引入的电容C₀所致;同样,在图5中,f₁对应的电流更多集中于宽度为s条形加载微带及加载片的边缘,归因于MZR的等效电感L₁,而f₀对应的电流较

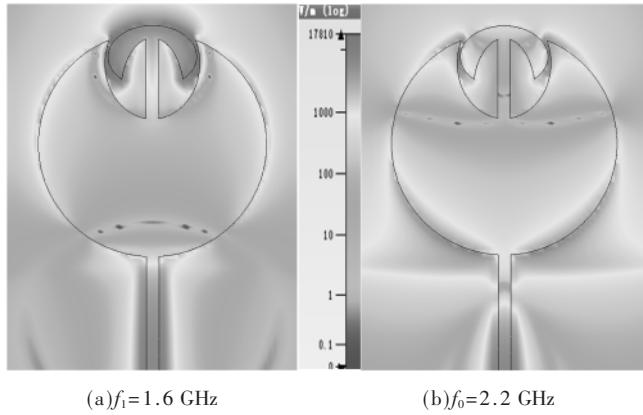


图4 MZR加载天线的电场分布

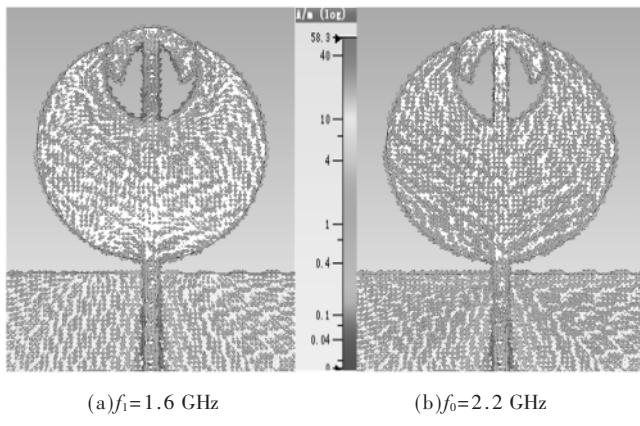
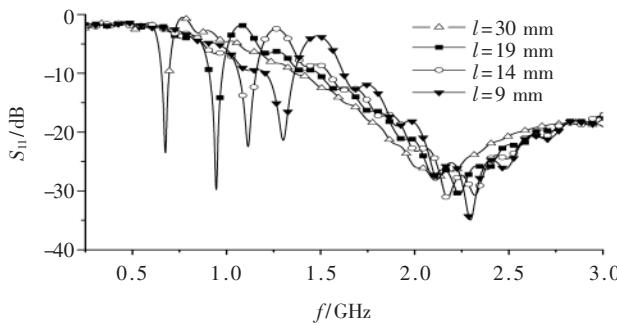


图 5 MZR 加载天线的表面电流分布

集中地分布于圆形振子的表面及左右边缘, 归因于通常单极子的等效电感 L_0 。因此, f_1 是加载 MZR 引入的谐振频率, 而 f_0 是单极子天线的谐振频率。

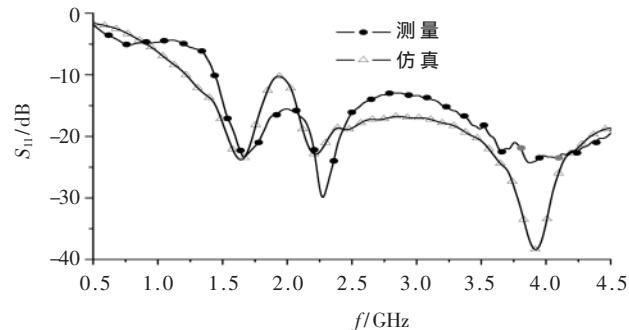
为了揭示加载 MZR 对天线谐振频率的调控性, 研究 MZR 的结构参数与谐振频率的关系。从图 5 的电流分布来看, MZR 谐振器的等效参数 L_1 和 C_1 与加载贴片的结构尺寸相关。因此, 期望可以通过调整加载贴片的结构参数来调谐 MZR 的谐振频率(匹配频点)。以条形微带线长度 l 为例, 保持圆形单极子及接地板的结构尺寸不变, 取加载椭圆形贴片的长轴半径 $a=12 \text{ mm}$, 调整微带线的长度 l , 则会引起 MZR 的等效电感 L_1 变化, 即可达到调谐目的。如图 6 所示, 当 l 以 5 mm 的步长从 7 mm 变化到 14 mm, 再到 19 mm 时, 谐振频点 f_1 从 1.3 GHz 降低到 1.1 GHz, 再到 0.9 GHz, 而当 l 增加到 30 mm 时, 谐振频点 f_1 降低到 0.6 GHz。可以看出, 通过调整谐振器的相关参数, 可以很容易独立调谐低频端的谐振频率。当然, 因为 MZR 谐振器属于窄带谐振, 大跨度向低频段调谐难以形成宽频带匹配, 只能形成多频段调谐匹配。要实现低频宽频调谐, 还需要增加调谐器的数目以及更多的调谐参数。

图 6 调谐参数 l_1 分析

同时可以看到 l 的变化也会引起 f_0 的偏移, 但是影响不大, 一方面频率偏移较小, 另一方面印制单极子本来在该频段容易做到宽频匹配。

实际制作 MZR 加载单极子天线, 其反射系数 $|S_{11}|$ 的

测量结果如图 7 所示, 图 7 中还绘制了仿真的 $|S_{11}|$ 以进行比较。如图所示, 模拟结果与实测结果吻合较好, 天线的 $|S_{11}|$ 参数曲线在 f_0 附近有一个额外的匹配频点 f_1 , 从而实现了阻抗带宽的提高。仿真曲线的匹配频点为 $f_1=1.6 \text{ GHz}, f_0=2.2 \text{ GHz}$, 实测匹配频点为 $f_1=1.62 \text{ GHz}, f_0=2.24 \text{ GHz}$ 。由于 MZR 谐振对尺寸参数非常敏感, 因此, 仿真结果与实测结果之间的微小差异可能是由于 MZR 的较小线宽和较小缝隙尺寸加工误差所致。然而, 仿真和测量结果都显示, 所提出的 MZR 加载天线有效地展宽了单极子天线的低频段带宽范围。

图 7 仿真与实测的天线 S_{11} 参数

天线的方向图使用 NSI2000 系统在微波暗室中测量获得, 如图 8 所示。图 9 是天线分别工作在 1 GHz、2 GHz、3 GHz、4 GHz 频点的辐射方向图, 由于天线正反面的对称性, 实测的方向图仅给出正面测试结果。图中星号曲线为实测 E 面方向图, 三角曲线为实测 H 面方向图, 圆形曲线为仿真的 E 面方向图。单极子具有良好的全向辐射特性, 仿真的 H 面方向图为理想圆环形, 图 9 中予以省略。可以看出仿真分析与测量结果具有合理的一致性。仿真与测量的差异主要是由于自制的测试夹具对被测天线进行固定而产生的测量误差。由于 MZR 加载天线具有电小尺寸, 它在 3 GHz 以下频段的方向图显示出非常好的全向性, 波束指向稳定; 随着频率升高, 到 4 GHz, 虽然天线在 H 面仍然是全向辐射, 但波束指向已明显向振子一端偏移。

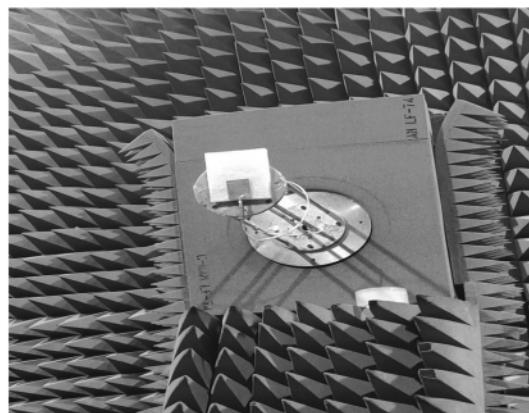


图 8 天线方向图测试环境

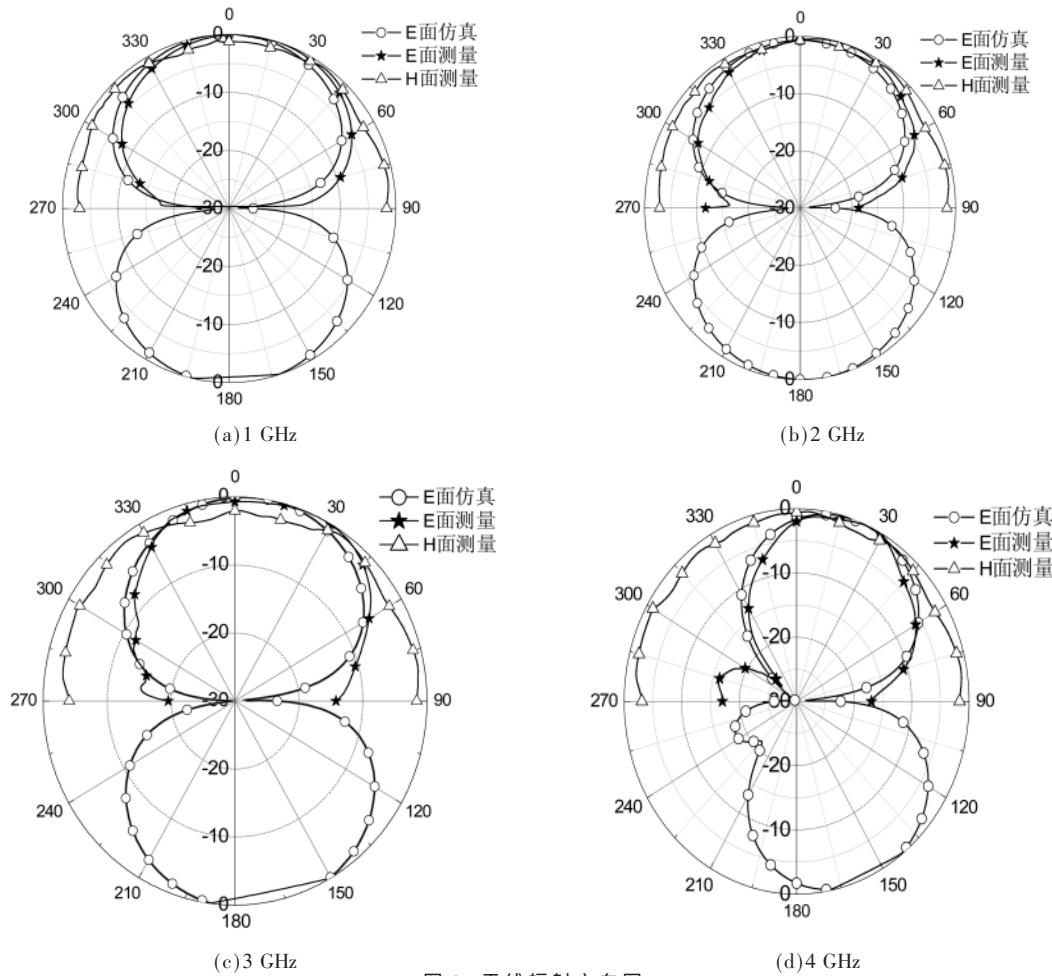


图 9 天线辐射方向图

3 结论

采用新型 MZR 谐振器加载印制单极子天线，改变振子上的电流分布，以改善天线低频端的阻抗特性。结果发现，通过嵌入 MZR 谐振器，可以产生额外的共振，将新的谐振和单极子天线的谐振合并，可以有效改善天线低频端的阻抗匹配，从而减小天线的尺寸，适合应用于天线的小型化设计。研究还发现，通过调整谐振器的相关结构参数，能够实现对天线低频端进行独立调谐，因此这种加载方法可以很容易地应用到其他频段的设计中。本文所提出的零磁导率谐振器嵌入式加载方法调试方便，结构简洁，能够与印制结构天线相融合，有效调节天线的匹配特性。

参考文献

- [1] WONG K L ,Lin Yifang.Stripline-fed printed triangular monopole[J].Electronics Letters ,1997 ,33(17) : 1428–1429.
 - [2] LIN C C ,KAN Y C ,KUO L C ,et al.A planar triangular monopole antenna for UWB communication[J].Microwave and Wireless Components Letters.IEEE ,2005 ,15(10) : 624–626.
 - [3] HUANG C Y ,HSIA W C.Planar elliptical antenna for ultra-wideband communications[J].Electronics Letters ,2005 ,41(6) : 297–298.

- [4] LIANG J , CHIAU C C , CHEN X , et al. Printed circular disc monopole antenna for ultra-wideband applications[J]. Electronics Letters , 2004 , 40(20) : 1246–1247.
 - [5] 李伟文 , 黄长斌 , 游佰强 , 等. 超宽带印制矩形单极天线设计 [J]. 微波学报 , 2010 , 26(2) : 30–34.
 - [6] RIAD K . Compact double meandered line inverted-f antenna for outdoor parking wireless car detector[C]. IET Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile , 2014 : 30–35.
 - [7] LAK H J , GHOBADI C , NOURINIA J . A novel ultra-wideband monopole antenna with band-stop characteristic[J]. SciRes. Wireless Engineering and Technology , 2011 , 2(10) : 235–239.
 - [8] NI W , NAKAJIMA N . Small printed inverted-L monopole antenna for worldwide interoperability for microwave access wideband operation[J]. Microwaves , Antennas & Propagation , IET , 2010 , 4(11) : 1714–1719.
 - [9] 汪大军 , 王彦虎 , 廖永波 . 新型电磁材料微带天线的综述 [J]. 电子技术应用 , 2015 , 41(12) : 11–14.
 - [10] PARK J H , RYU Y H , LEE J G , et al. Epsilon negative zeroth-order resonator antenna[J]. Antennas Propagation .

(下转第 20 页)

侧,增益曲线的纵坐标在右侧,图中分别用箭头表示。由图10(b)可以看出,在43.5 GHz~45.5 GHz频段内增益大于10.5 dB,效率大于9.5%。

4 结论

本文基于四路对脊鳍线电路完成了Q波段5 W固态功率放大器的设计。模拟仿真了对脊鳍线波导微带过渡结构的S参数,以及四路波导T型节的S参数,仿真结果表明,该结构的插入损耗都在0.1 dB以内,可以满足毫米波功放模块的设计要求。基于仿真结构,本文制作了四路功率合成/分配器背靠背实物图,通过实际测试,该背靠背结构的插入损耗可以控制在2 dB以内,可以推算该结构合成器合成效率大于80%。本文选择一款2 W量级的MMIC功放裸芯片作为实验样片,基于此设计了一个Q波段毫米波固态功率放大模块,并添加了供电电路。对该模块进行测试,测试结果表明在频率43.5 GHz~45.5 GHz频段内,饱和功率输出在5.7 W以上,增益大于10.5 dB,效率在9.5%以上。本文只针对2 W量级的MMIC做了设计,为获得功率等级更高的功放模块,可以选择功率量级更高的功放单片,以本文中的电路做参考来设计毫米波功放模块。该结构具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Cheng Naishuo, Jia Pengcheng, RENSCH D, et al. A 120W X-band spatial combined solid-state amplifier[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques, 1999, 47(3): 2557–2561.
- [2] 张峻齐.毫米波超宽带径向功率合成技术研究[D].成都:电子科技大学, 2017.
- [3] LI G, SONG K, ZHANG F, et al. Novel four-way multilayer SIW power divider with slot coupling structure[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2015, 25(12): 799–801.
- [4] LI Y, ZHANG Y, ZHU G, et al. A W-band miniature power divider based on E-faced-folder magic-T junction[C]. IEEE Mtt-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and the Applications. IEEE, 2007, 55(12): 3710–3712.

(上接第16页)

- [11] LEE S W, LEE J H. Electrically small MNG ZOR antenna with multilayered conductor[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 724–727.
- [12] 周凯,王睿乔,赵志恒.面向5G高隔离度4单元MIMO手机天线设计[J].电子技术应用, 2019, 45(11): 1–5, 9.
- [13] YANG S Y, NG M K M. A bisected miniaturized ZOR antenna with increased bandwidth and radiation efficiency[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2013, 12:

2016: 1–3.

- [5] 梁荣江,李思敏,周海京.一种改进型毫米波开槽波导空间功率分配合成网络[J].电子技术应用, 2009, 35(1): 102–105.
- [6] Zhang Yunchi, RUIZ-CRUZ J A, ZAKI K A. A waveguide to microstrip inline transition with very simple modular assembly[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 20(9): 480–482.
- [7] 孙静.W波段对脊鳍线过渡的波导微带转换设计[J].宇航计测技术, 2015, 35(3): 10–13.
- [8] 王小伟,李家胤,周翼鸿.一种Ka波段波导微带鳍线转换结构.[J]空间电子技术, 2009, 35(3): 98–102.
- [9] HUANG Z Y, XIANG X Z, GOU Y Y. T-type power divider/combiner based on waveguide–microstrip structure in W-band[C]. 2017 2nd International Conference on Communication and Information Systems. Wuhan, 2017: 92–96.
- [10] BELAID M, WU K. Quasi-optical power amplifier using TEM waveguide concept[C]. IEEE 2001 MIT-S Digest, 2001, 3: 1835–1839.
- [11] TAKAGI K, NG C Y, SAKURAI H, et al. GaN MMIC for Ka-band with 18W[C]. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, New Orleans, USA, 2015, 3: 1–4.
- [12] PEREZ J A G, KOSMOPOULOS S, GOUSSETIS G. A compact 12-way slotted waveguide power combiner for Ka-band applications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(2): 135–137.
- [13] Wi Shaobing, Gou Fangjin, Gao Jianfeng, et al. W-band AlGaN/GaN MMIC PA with 3.1 W output power[C]. International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China. IEEE, 2017, 2: 1–4.

(收稿日期: 2019-11-12)

作者简介:

董亮(1987-),通信作者,男,硕士,高级工程师,主要研究方向:射频及微波功放,E-mail: uestc_dl@163.com。

卫明(1980-),男,本科,高级工程师,主要研究方向:射频及微波功放。

159–162.

- [14] Li Xiaofeng, Peng Lin. MZR resonators etched in microstrip patch with enhanced bandwidth and reduced size[J]. Progress in Electromagnetics Research M(PIER M), 2018, 76(12): 197–205.
- [15] 常伟,孙学宏,刘丽萍,等.OAM介电谐振器阵列天线的研究[J].电子技术应用, 2018, 44(8): 90–93.

(收稿日期: 2020-02-24)

作者简介:

李晓峰(1970-),男,硕士,主要研究方向:微波网络、天线理论与技术、电磁测量等。

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