



全向及定向圆极化天线的小型化研究

摘要

本文提出了两种分别应用于全向以及定向圆极化天线的小型化设计.这两种天线设计方案是基于电偶极子与磁偶极子的有机结合.全向圆极化方向图具有很广的覆盖范围及避免极化失配的特点,非常适合应用于移动物联网以及卫星间通信等.对于两组水平放置的电磁偶极子,如果采用等幅激励且相位相差 90° ,会产生全向的圆极化方向图.本文介绍了一种工作在下一代移动通信 28 GHz 频率的呈车轮形的紧凑全向圆极化天线,整个天线印刷在直径仅 4 mm 的圆形介质板上,且具有宽带高效率等良好电器特性,非常适合应用于 5G 小型化移动通信终端.定向圆极化天线具有高增益且避免极化失配的特点,广泛应用于卫星移动通信终端中.两组正交放置的电磁偶极子如果等幅且同向激励,会产生定向呈心形的辐射方向图.本文还介绍了一种电小且高辐射效率的惠更斯天线,该天线有机结合了两个电小的辐射单元,形成结构紧凑的定向圆极化天线,非常适合卫星通信以及无线能量传输等应用.

关键词

圆极化天线;全向辐射方向图;定向辐射方向图;天线小型化

中图分类号 TN820

文献标志码 A

收稿日期 2018-11-28

资助项目 Australian Research Council under Grant DP160102219; UTS Early Career Researcher Grant (PRO17-4544)

作者简介

蔺炜,男,博士,博士后,研究员,研究方向为应用电磁学、天线与电路.wei.lin@uts.edu.au

¹ 悉尼科技大学 全球大数据技术中心,澳大利亚 新南威尔士州,2007

0 引言

全向及定向圆极化天线在当今及未来无线通信领域将具有广泛应用.未来的无线物联网将实现物物互联^[1].全向圆极化天线具有辐射覆盖面大以及避免极化失配的特点,特别适用于无线设备与设备之间的通信^[2].同时,毫米波将应用于下一代(5G)无线通信系统中,可以大幅提高系统的通信容量.28 GHz (27.35 ~ 28.5 GHz) 频段已经被定为 5G 标准之一,基于该频段的通信系统研发商用正在广泛进行.研究具有小型化的 28 GHz 全向圆极化天线具有重大意义及工程应用前景^[3].定向圆极化天线具有高增益且避免极化失配的特点,已经广泛应用于卫星通信终端.随着未来无线通信终端进一步小型化,结构紧凑且具有高辐射效率的定向圆极化天线具有重大应用价值^[4].

设计应用在毫米波频段且结构紧凑的全向圆极化天线具有很大挑战.在本文设计提出之前,通过查阅文献,只有两款天线设计^[5-6]可以实现工作在毫米波频段的全向圆极化辐射.然而,这两款天线的尺寸非常大,设计复杂且加工难度高,不能应用于小型化的无线通信终端中.同时,设计高辐射效率且电小结构紧凑的惠更斯定向方向图的圆极化天线也具有很大挑战.在本设计提出之前,已有很多惠更斯圆极化天线在文献中被报道^[7-8],然而,没有一款天线设计可以实现电小尺寸.惠更斯圆极化天线的小型化具有重要意义.

为了解决上述问题,本文提出了基于电磁偶极子的小型化全向以及定向圆极化天线.首先,通过在一片直径仅有 4 mm 的介质板上设计紧凑的车轮形辐射结构,产生了一组工作在 28 GHz 频段的相互平行的电磁偶极子.同时,这两组电磁偶极子天然形成 90° 的相位差,实现了全向的圆极化辐射.其次,通过将一组由超材料启发的电小电磁偶极子单元有机结合,实现了电小结构紧凑的惠更斯定向圆极化辐射.加工实测结果表明,两款小型化的全向以及定向圆极化天线均与仿真很好吻合,在未来小型化通信系统中具有广泛应用价值.

1 28 GHz 全向圆极化天线的小型化

本节介绍一款工作于 28 GHz 的小型化全向圆极化天线.由于 28 GHz 频段远远高于当今移动通信使用的微波频段 1~2 GHz,更高的无线通信速率(20 Gbps)将得以实现.同时,未来的无线设备将实现万物互联,物物之间的通信十分重要.圆极化天线由于其可以避免极化

失配的独有特性将在物物互联的系统中扮演重要角色.工作在 28 GHz 的全向圆极化天线将满足日益增加的通信需求.下面将介绍一款基于电磁偶极子的 28 GHz 小型化全向圆极化天线设计.

1.1 设计思路

全向圆极化的辐射方向图可以由激励两个平行放置的电磁偶极子实现,如图 1 所示.如果一个电偶极子与一个磁偶极子平行放置,并且激励幅度相位相差 90° ,就产生全向圆极化辐射方向图.这是因为,单个电磁偶极子产生的方向图均是全向的,但是其极化方向是正交的.如果它们之间的相位刚好相差 90° ,全向的圆极化方向图就可以形成.本设计的目的就是在一个紧凑的结构里面实现两个电磁偶极子,并激励它们产生合适的幅度相位.

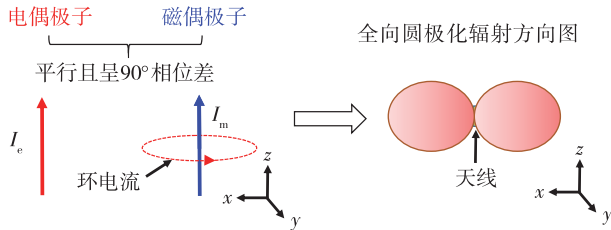


图 1 全向圆极化辐射方向图产生机理
Fig. 1 Generation mechanism of omni-directional CP radiation pattern

1.2 天线结构及工作原理

设计的 28 GHz 全向圆极化天线如图 2 所示.整个天线印刷在一块直径仅为 4 mm、高度为 1.58 mm 的圆形介质上面.天线用同轴线进行馈电.同轴线的内导体位于天线的中心并于顶层进行连接.同轴线的内导体作为天线辐射结构的一部分.天线辐射结构的另一部分由 4 个弯折的辐射单元组成,形成一个车轮的形状.8 个弧形的辐射单元分别位于介质板的上下两个表面.每两个弧形辐射单元由一个金属化孔连接.同轴线的内导体跟一块小金属地相连.整个天线结构紧凑,可以安装在无线移动设备终端中.从图 2 中的电流分布可以看出:所有弧形的辐射体形成了一个顺时针的环形电流,这个环形电流产生磁偶极子的效果;所有的垂直辐射体形成了电偶极子的效果.从图 3 一个周期中的电流分布动态中可以看出:所有辐射体上的电流都是同时增强及减弱的.由于磁偶极子与产生它的电流环之间有 90° 的相位差,在此结构中,其电磁偶极子天然满足 90° 的相位差.电磁偶极子的强度可以通过调节弯折辐射单

元的数量决定.4 个弯折辐射单元可以产生最佳的全向圆极化辐射特性.

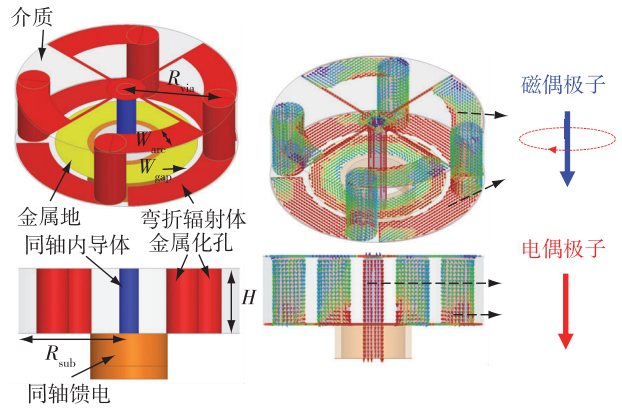


图 2 结构紧凑的 28 GHz 全向圆极化天线设计
Fig. 2 Design of the compact 28 GHz omni-directional CP antenna

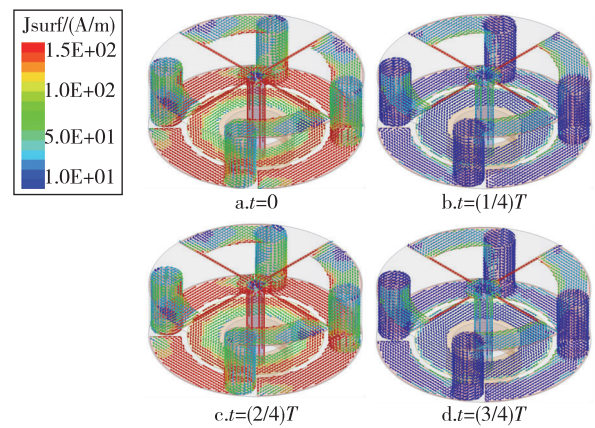


图 3 一个周期中的电流分布
Fig. 3 Current distributions in a period of time

1.3 实验测试结果

图 4 显示的是天线的加工实物,天线使用标准的电路板加工工艺,可实现低成本大批量生产.从显微镜中可以看出天线的结构很小,易于安装在移动设备终端中.在测试中,由于同轴线长度远大于天线高度,使用了套筒巴伦防止同轴线外导体上形成的电流泄漏.图 5 显示了天线的测试构架,此测试系统使用远场测试原理.网络分析仪产生信号通过放大器由标准喇叭天线发射,由本文所设计天线接收,然后经另一放大器放大返回网络分析仪,通过与另一个标准喇叭天线进行比较对比,可以计算出被测天线的增益与辐射方向图.由于是圆极化天线,在测量过程中,需要用标准线极化喇叭天线测试一组正交的幅度相位数据,然后通过计算得到天线的圆极化轴比以及增益.

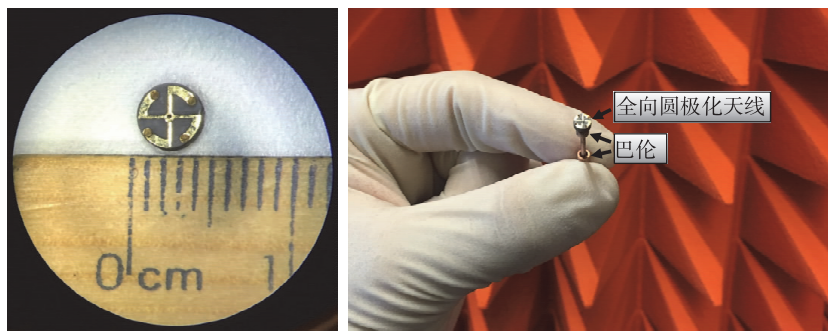


图4 天线加工实物图

Fig. 4 Fabricated antenna prototype

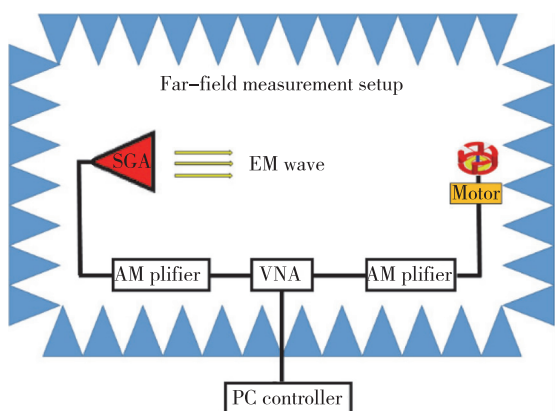


图5 天线测试构架

Fig. 5 Configuration of the antenna measurement system

图6显示了天线的测试回波损耗、增益以及轴比结果.可以看出,天线测试结果与仿真十分吻合,标准的电路板加工工艺可以满足精度要求.天线的阻抗以及轴比带宽完全覆盖5G通信系统的28GHz频段(27.5~28.35GHz).天线的增益在频段内稳定,最大增益达到2.2dBi.天线的圆极化特性很好,最小的轴比接近1dB,在整个28GHz频段内均小于2dB.

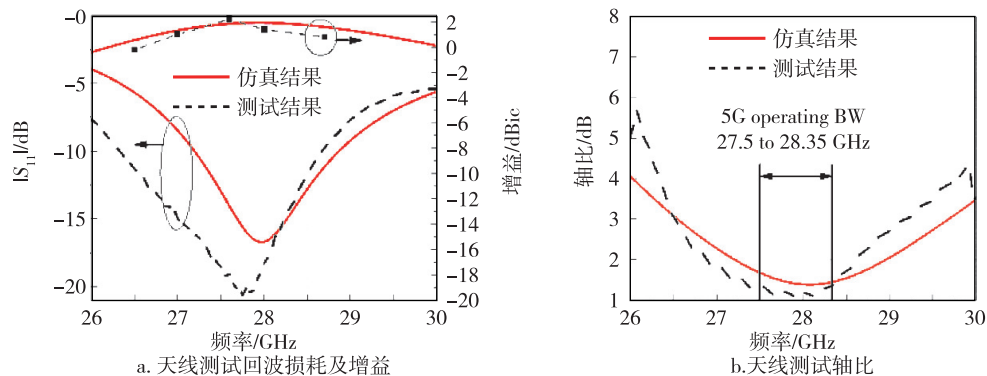


图6 天线测试结果

Fig. 6 Measured results:(a) $|S_{11}|$ and realized gain;(b) axial ratio

图7显示了天线的测试辐射方向图.可以看出,天线实现了很好的全向圆极化辐射特性.仿真结果与测试吻合良好,尤其是交叉极化,证明了测试系统的可靠性以及加工工艺的精度.该天线十分适用于下一代5G无线系统的移动终端中.

2 定向圆极化天线的小型化

本节介绍一款小型化惠更斯定向圆极化天线.定向圆极化天线广泛用于卫星通信移动终端中,例如微带贴片天线.然而,微带天线的辐射特性例如增益会随着天线面积的缩小而恶化.本文将2个由超材料启发的电磁辐射单元有机结合,实现惠更斯定向圆极化辐射方向图.整个天线尺寸属于电小天线范围($ka < 1$, k 指波数, a 指包围天线整体的最小球体的半径), ka 仅为0.7.虽然整体尺寸很小,该天线却具有高的辐射效率(70%)以及惠更斯心形辐射方向图.

2.1 设计思路

全向圆极化天线设计方法需要将2个电磁偶极子平行放置并且给予 90° 相位差的激励,而定向惠更

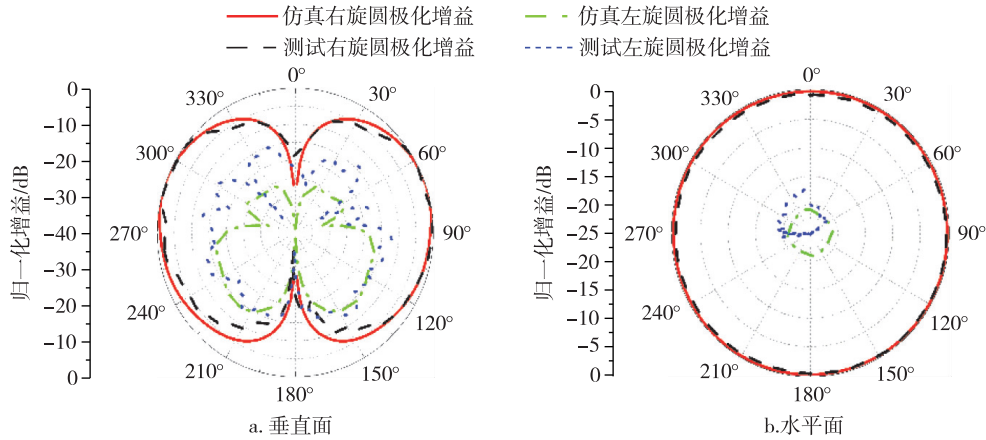


图7 天线测试辐射方向图

Fig. 7 Measured radiation patterns: (a) vertical plane; (b) horizontal plane

斯圆极化天线需要将 2 组惠更斯线极化天线给予 90°相位差的激励,其中每个惠更斯线极化天线又包含一对正交放置并且同向激励的电磁偶极子,如图 8 所示,2 组两两正交的电磁偶极子给予 90°相位差的激励,产生惠更斯心形圆极化辐射方向图.本设计的目标就是在一个非常紧凑的天线结构中实现 4 个电磁偶极子并且给予合适幅度相位的激励.为了实现天线的小型化,本设计采用了由超材料启发的电磁辐射体作为基本单元,如图 9 所示.埃及斧偶极子作为电小的电偶极子单元.这个电小结构的形状类似著名的埃及斧,故以其命名.埃及斧辐射体弯折部分的电流辐射相消,故天线整体呈电偶极子特性.相比起传统半波长偶极子天线,埃及斧偶极子仅仅为 1/5 波长.电小的磁偶极子单元是电容加载环辐射体.该辐射体可以产生环形电流,形成磁偶极子,该

辐射体可以由一个短的偶极子激励.本文的目的是将两组埃及斧电偶极子与两组电容加载环磁偶极子设计在一个紧凑的结构中,并给予等幅且相位差 90°的激励.

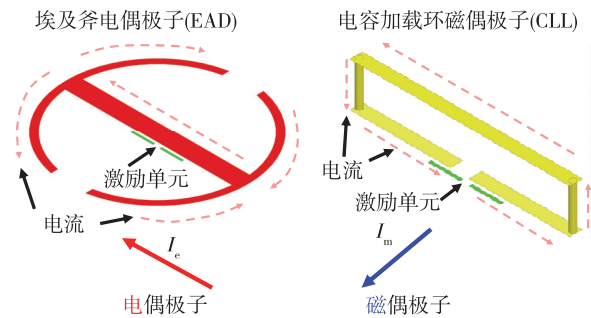


图9 由超材料启发的电小电磁辐射单元
Fig. 9 Metamaterial-inspired electrically small electric and magnetic radiating elements

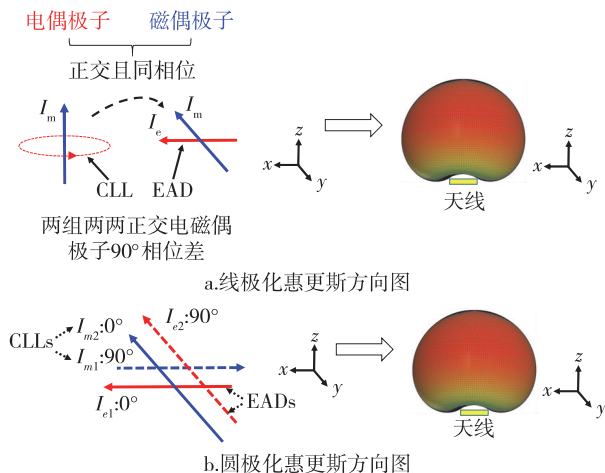


图8 定向圆极化辐射方向图产生机理

Fig. 8 Generation mechanism of unidirectional radiation pattern: (a) LP radiation; (b) CP radiation

2.2 天线结构及工作原理

天线结构如图 10 所示,在 3 块介质板上实现了 2 组十字形埃及斧电偶极子与 2 组十字形电容加载环磁偶极子.十字形埃及斧电偶极子印刷在位于中间的介质板上表面.十字形电容加载环磁偶极子印刷在上下 2 块介质板的上表面,由 4 个直径为 1.5 mm 的金属柱连接.金属柱不与埃及斧偶极子辐射体接触.天线的馈电结构印刷在底层介质板的下表面,是一个非等长的十字形结构.2 组电磁偶极子之前 90°的相位差由这个馈电结构的长度差决定.天线辐射体上的电流在一个周期内的分布如图 11 所示,可以看出,电磁偶极子在一个周期内顺时针旋转,产生左旋圆极化惠更斯辐射方向图.

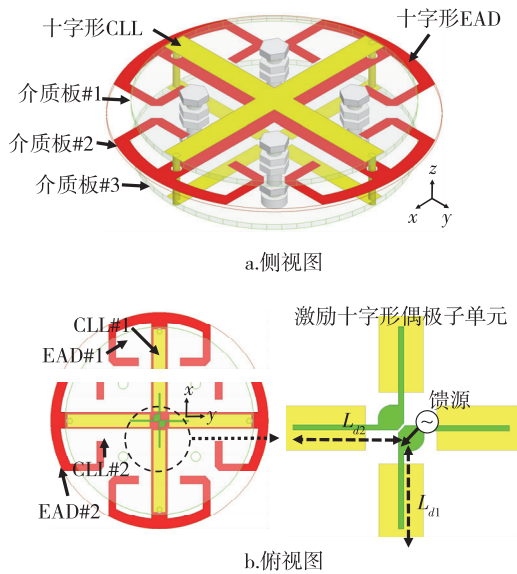


图 10 结构紧凑的定向惠更斯圆极化天线设计
Fig. 10 Design of the Huygens unidirectional CP antenna

2.3 实验测试结果

天线加工实物如图 12 所示.天线由标准的低成本电路板加工工艺加工.天线用同轴线进行馈电,为了防止同轴线外导体的电流泄漏,在同轴线外导体上加了一个套筒巴伦.天线整体结构非常紧凑, ka 只有 0.7 且高度只有 $1/20$ 波长.

图 13 显示了天线的测试结果.可以看出,测试结果与仿真吻合很好.天线测量的工作中心频率(1.584 GHz)对比仿真仅仅发生微小的偏移.在中心频率天线的轴比小于 1 dB,并且产生定向惠更斯圆极化方向图.天线增大增益 3.3 dBi.这是业内第一款电小惠更斯圆极化天线.由于其结构紧凑的特点,非常适用于移动设备终端以及无线能量传输等应用.

3 结束语

本文针对未来无线通信系统对设备小型化的要

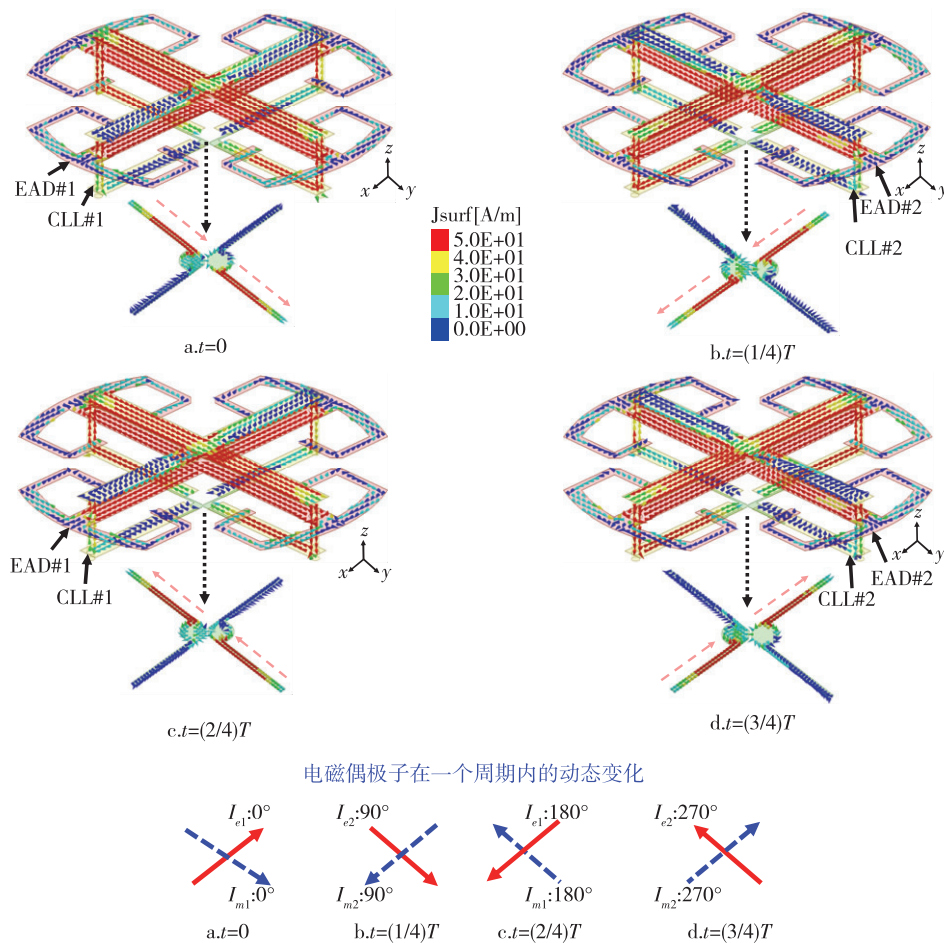


图 11 天线辐射体上一周期的电流分布

Fig. 11 Current distributions in a period of time: (a) $t=0$; (b) $t=(1/4)T$; (c) $t=(2/4)T$; (d) $t=(3/4)T$

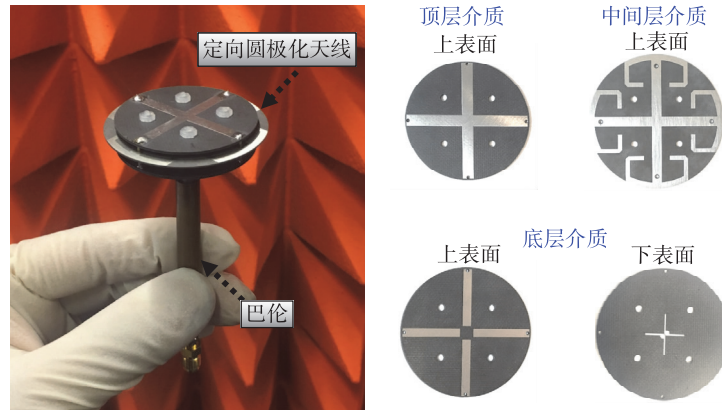


图 12 天线加工实物图

Fig. 12 Fabricated antenna prototype

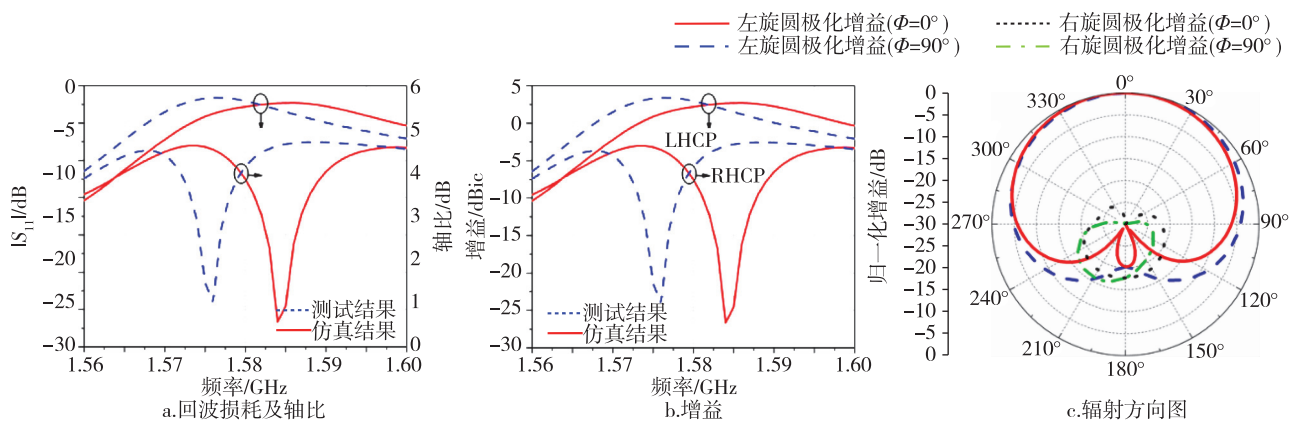


图 13 天线测试结果

Fig. 13 Measured results: (a) $|S_{11}|$ and axial ratio; (b) realized gain; (c) radiation pattern

求,分别介绍了全向以及定向圆极化天线的小型化设计.利用电磁偶极子的独特结合,在紧凑的空间内实现了平行以及正交的电磁偶极子单元,分别实现了全向及定向的圆极化辐射.两种天线的设计思路具有普遍性,可以拓展到其他工作频率.由于其结构紧凑、高效率、加工成本低的特点,本文所设计的小型化天线具有十分广阔的应用前景.

参考文献

References

- [1] Tehrani M N, Uysal M, Yanikomeroğlu H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5) : 86-92
- [2] 蔺炜,黄衡.宽带极化与方向图可重构天线研究[J].电波科学学报,2018,33(3) : 293-300
LIN Wei, WONG Heng. Wideband polarization and pattern reconfigurable antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2018, 33(3) : 293-300
- [3] Lin W, Ziolkowski R W, Baum T C. 28 GHz compact omnidirectional circularly polarized antenna for device-to-device communications in the future 5G systems [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12) : 6904-6914
- [4] Lin W, Ziolkowski R W. Electrically small, low-profile, Huygens circularly polarized antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(2) : 636-643
- [5] Fernández J M, Masa-Campos J L, Sierra-Pérez M. Circularly polarized omnidirectional millimeter wave monopole with parasitic strip elements [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(3) : 664-668
- [6] Verma P K, Singh M, Kumar R. Ka-band circularly polarized omnidirectional antenna for wide elevation coverage [J]. Electronics Letters, 2014, 50(22) : 1563-1564
- [7] Li M J, Luk K M. Wideband magnetoelectric dipole antennas with dual polarization and circular polarization [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(1) : 110-119

[8] Dadgarpour A, Sorkherizi M S, Kishk A. High-efficient circularly polarized magnetoelectric dipole antenna for 5G applications using dual-polarized split-ring resonator lens

[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(8):4263-4267

Miniaturization techniques for omnidirectional and unidirectional circularly polarized antennas

LIN Wei¹

1 Global Big Data Technologies Centre, University of Technology Sydney, NSW 2007 Australia

Abstract This paper introduces two miniaturized antennas for either omnidirectional or unidirectional radiation. These two antenna designs are based on the manipulation of two electric and magnetic radiators. First, omnidirectional CP antennas have broad radiation coverage and can avoid the polarization mismatch problem, which are suitable for device-to-device (D2D) and satellite communications. Two horizontally placed electric and magnetic radiators excited with equal amplitude and 90 degree phase difference can produce omnidirectional CP pattern. This paper will present a 28 GHz compact wheel-shaped omnidirectional CP antenna. The entire antenna is printed on a dielectric disk with the diameter of only 4 mm. It has broad bandwidth and good electrical characteristics, which is ideal for compact 5G mobile terminals. Second, unidirectional CP antennas have high directivity and can avoid polarization mismatch problem, which have been widely used in satellite mobile terminals. Two orthogonally placed electric and magnetic radiators excited with equal amplitude and phase produce unidirectional cardioid-shaped radiation pattern. This paper will introduce an electrically small unidirectional CP antenna, which organically combines two metamaterial-inspired electric and magnetic radiator into a compact entity. This antenna is ideal for satellite communication and wireless power transfer applications.

Key words CP antenna; omnidirectional; unidirectional; miniaturized antennas