

文章编号: 2095-4980(2019)06-1017-06

一种 5G 手机的紧凑型 16 单元多频 MIMO 天线

丁志清, 邢贝贝, 姚 婷, 刘雪梅, 刘志伟*

(华东交通大学 信息工程系, 江西 南昌 330013)

摘 要: 提出一种应用于 5G 智能手机中结构紧凑的 16 单元多频段多输入多输出(MIMO)天线阵列。该多天线系统由 8 个紧凑天线阵列对组成, 为了预留 2G/3G/4G 天线的布局空间, 这 8 个天线阵列印刷在智能手机的两侧边上。每个天线阵列对由 2 个紧凑的间隙耦合环路天线组成, 分别布置在系统板的上、下两侧; 其中上侧天线工作在 LTE band 46(5 150~5 925 MHz), 下侧天线覆盖 LTE band 42/43(3 400~3 800 MHz)。测试结果表明该天线阵列具有良好的阻抗匹配和隔离性能。同时还对 MIMO 一些包络相关系数进行了研究分析。最后研究了人手和头对整个天线性能的影响, 仿真结果表明, 在日常各种使用情况下, 该天线阵列 also 具有良好的辐射特性。

关键词: 紧凑型耦合环路天线; 多频段; 5G; 多输入多输出

中图分类号: TN821

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.1017

A compact 16-port multi-band MIMO antenna array for 5G smart phones

DING Zhiqing, XING Beibei, YAO Ting, LIU Xuemei, LIU Zhiwei*

(Department of Information Engineering, School of East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: A compact 16-port multiband antenna array for massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) applications in future 5G smartphones is proposed. The multi-antenna system consists of eight pairs of compact antenna arrays. In order to reserve the local space of the 2G/3G/4G antennas, the eight pairs of antenna arrays are printed on both sides of the smartphone. Each antenna array pair consists of two compact gap-coupled antennas, arranged on the upper and lower sides of the system board. The upper antenna operates in LTE band 46(5 150–5 925 MHz), and lower antenna covers LTE band 42/43(3 400–3 800 MHz). Test results show that the antenna array has good impedance matching and isolation performance. In addition, this paper also studies and analyzes some characteristic parameters of MIMO. Finally, the effects of hand and head for antenna are studied. The results of simulation and measurement show that the antenna array has good radiation characteristics and MIMO performance.

Keywords: compact coupled antenna; multi-band; 5G; Multiple-Input Multiple-Output.

第 4 代移动通信(4G)日趋成熟后, 很多机构都将重点转向第 5 代移动通信(5G)^[1]。毫无疑问, 数据传输速率将是未来 5G 通信的核心指标之一^[2]。因此, 如何提高 5G 智能终端的数据传输速率是首先需要解决的难题。多输入多输出(MIMO)技术成为增强无线带宽的不错选择, 因为它能在不增加输入功率的情况下提高频谱效率^[3]。目前, 在 4G 通信系统中主要应用 2×2 和 4×4 MIMO 天线系统^[4-8]。但即使在 4×4 MIMO 系统中, 其性能仍远低于 5G 通信的传输速率标准^[7]。所以, 把更多的天线单元整合在智能手机内部已成为未来 5G 时代的必然趋势。近年来, 已经有一些关于 5G 终端的多天线系统设计^[9-11]。如文献[9]提出一种用于 LTE band 42 的 8 单元天线阵列, 在 20 dB 信噪比(SNR)测量的遍历信道容量(用于 2×8 MIMO 信道)已达到约 16 bps/Hz, 但是天线单元是沿着手机系统板的 4 个角落边缘放置, 并且没有为 4G 天线预留其他可用空间。文献[10]提出一种工作在 LTE band 42/43 的 10 天线阵列, 测量的峰值遍历信道容量为 47 bps/Hz。值得一提的是, 文献[11]提出一种工作在 2.6 GHz 频段具有正交极化特性的 8 端口 MIMO 天线阵列, 其信道容量最高可达 40 bps/Hz。除此之外, 还有很多关于 5G 智能终端的多天线设计^[12-13]。但是, 这些天线的阻抗带宽仍然不够, 无法完整覆盖 LTE band 42/43(5G 在 C 波段中

收稿日期: 2019-02-28; 修回日期: 2019-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61601185); 江西省自然科学基金资助项目(20171ACB21040)

*通信作者: 刘志伟 email:zwliu1982@hotmail.com

规划频段)和 LTE band 46(C 波段中免许可频段)。另外,上述设计的天线尺寸过大,没有考虑到 2G/3G/4G 以及其他天线的局部空间。

因此,本文提出一种适用于下一代智能手机的紧凑型 16 单元多频段(LTE band 42/43 和 LTE band 46)MIMO 天线,该多天线系统由 8 个紧凑的耦合环路型天线阵列组成,对称布局于智能手机的 2 个侧边框。本文提出的耦合环路天线对尺寸仅为 $10\text{ mm}\times 7\text{ mm}$,天线净空区域只需 $7\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,适用于全面屏智能手机的设计。另外,本文对提出的天线阵列进行了仿真、加工以及测试,给出了 S 参数、天线效率等典型结果,计算了天线阵列的包络相关系数(Envelope Correlation Coefficient, ECC)验证 MIMO 的性能。最后,研究了在实际使用情况下手机用户对天线阵列性能的影响。

1 天线布局设计

本文提出的 16 单元天线阵列结构图及其详细尺寸见图 1。该 16 单元多天线系统由 8 个紧凑的天线阵列组成,它们对称布局于智能手机中垂直于系统板的两侧边框上。其中,系统板尺寸为 $150\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,与 5.7 inch 智能手机兼容;侧边框尺寸 $80\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 7\text{ mm}$,2 种介质板都采用 FR4 介质(介电常数为 4.4,损耗正切角为 0.02)。从图 1(b)和(c)可以看出,每个天线阵列由 2 只印刷在侧边框上下侧的紧凑型耦合环路天线组成。其中,上侧天线(单元 1,3,5,7,9,11,13 及单元 15)工作在 LTE band 46,下侧天线(单元 2,4,6,8,10,12,14 及单元 16)覆盖 LTE band 42/43。通过将 8 个天线阵列对称印刷在 2 条侧边框上,从而在 5G 移动通信中 6 GHz 以下的频段中,实现 LTE band 42/43 和辅助接入的免许可频段 LTE band 46 的 8×8 MIMO 天线阵列。

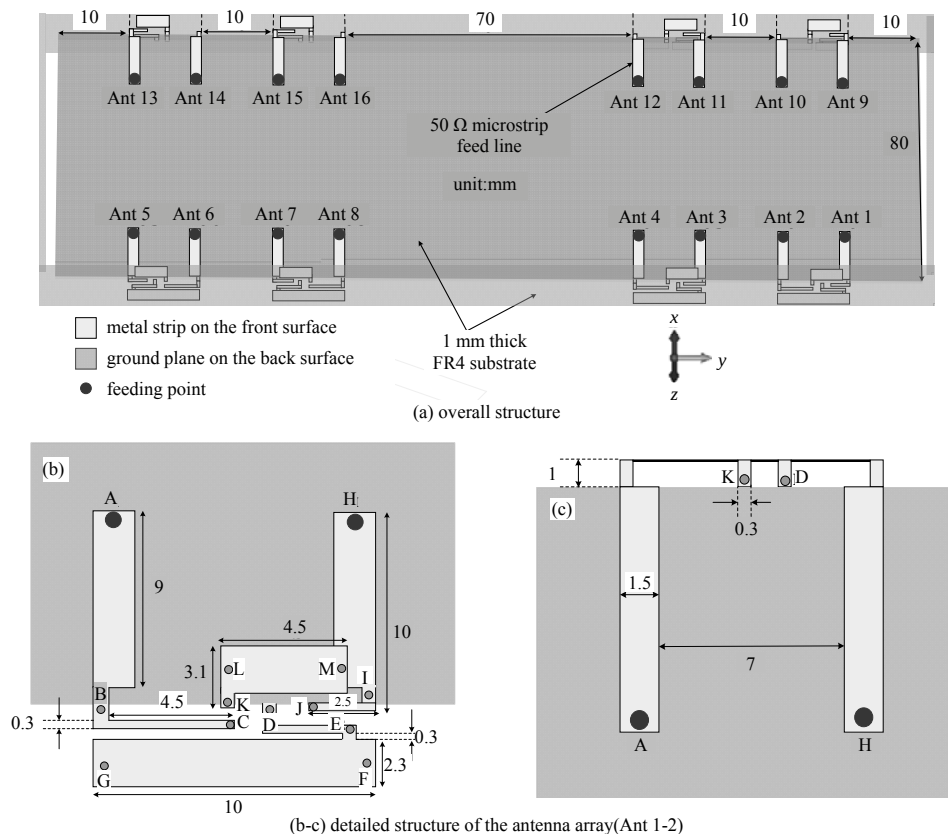


Fig.1 Geometry and dimensions of the proposed MIMO antenna array

图 1 天线阵列结构图及其详细尺寸

2 紧凑型耦合环路天线阵列的设计与仿真

图 1 给出了该紧凑型耦合环路天线阵列的结构及其具体尺寸。由图可知,该天线阵列由印刷在侧边介质板上侧的 2 个耦合环路天线组成;相邻天线阵列之间的距离为 10 mm ,天线所需净空区域仅为 $7\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 。其中,下天线(下侧天线)由馈线支节(ABC)和短路支节(DEFG)组成;从 A 点处激励上天线,使得馈线支节和短路支节耦

合,通过调整它们大小尺寸以及两者的间距可以激发出位于 3.6 GHz 处的四分之一波长谐振模式。上天线(上侧天线)原理与下天线类似,在调整馈线支节(HIJ)和短路支节(KLM)的尺寸后,它们能激发出位于 5.5 GHz 处的四分之一波长谐振模式。通过上下天线组合的耦合环路天线阵列可以覆盖 LTE band 42/43 和 LTE band 46。

16 单元 MIMO 天线阵列的仿真参数 S 见图 2(本文采用的电磁仿真软件为 CST microwave studio 2015)。从图 2 可以看出,8 只上下天线分别在 LTE band 42/43(3 400~3 800 MHz)和 LTE band 46(5 149~5 910 MHz)取得良好的 -6 dB(3:1 电压驻波比)阻抗匹配。另外,相邻天线单元之间的隔离度在低频隔离优于 -12.5 dB,高频隔离优于 -12 dB,满足行业内标准。因此,本文提出的 5G 天线阵在尺寸紧凑、净空区域极小的情况下具有良好的阻抗带宽和隔离性。

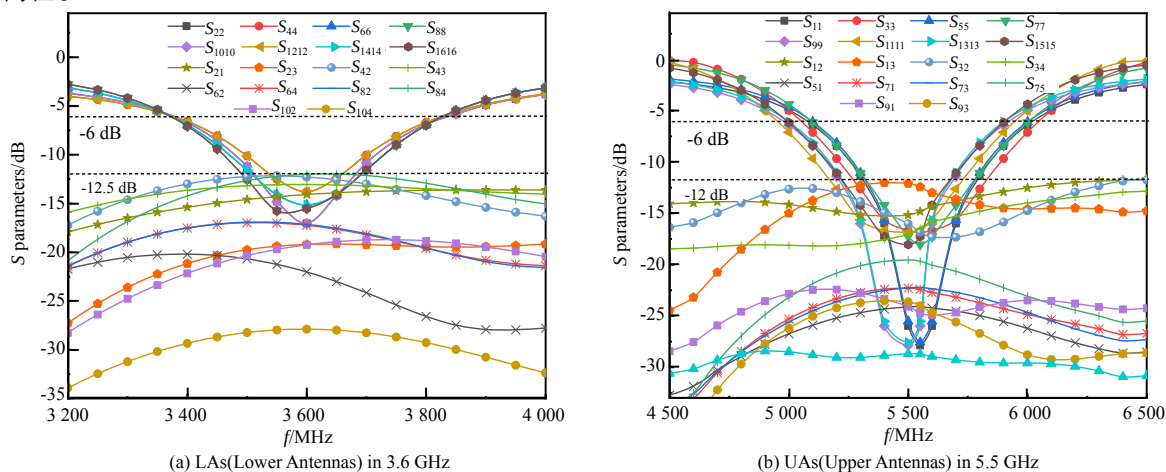


Fig.2 Simulated S parameters of antennas

图2 仿真 S 参数

3 天线的加工以及测试结果分析

将本文设计的 16 单元紧凑型多频 MIMO 天线阵列进行加工并测试,加工的天线实物见图 3。16 个天线单元均印刷在 2 块位于侧壁的 FR4 介质板上,通过 $50\ \Omega$ 的 SMA 连接器连接。

天线的实测 S 参数见图 4(测试结果由 Agilent N5247A 矢量网络分析仪提供)。从实测 S 参数可以看出,测试结果和上述仿真结果非常接近,两者之间的细微误差可能是由于插入损耗和 SMA 连接端和天线加工的误差引起的。由图 4 可知,下天线阻抗带宽(-6 dB)为 12.1%(3 385~3 820 MHz);上天线阻抗带宽为 15%(5 145~5 910 MHz)。天线单元间隔离度的测试结果和仿真结果也十分吻合,在低频和高频处,天线之间的隔离度均低于 -12 dB,比智能手机行业的 -10 dB 标准高了 2 个 dB。综上所述,本文提出的 16 单元紧凑型多频 MIMO 天线阵列足以覆盖 LTE band 42/43 和 LTE band 46 频段,各个天线单元的 S 参数均达到行业标准。

为了进一步验证天线的辐射性能,图 5 给出了各天线实测的总效率,测试结果在 ETS 微波暗室中得出。由图 5 可知,上天线在 LTE band 46 的总效率大于 50%,峰值能达到 70%;下天线在 LTE band 42/43 频段内效率略低于上天线,在 45%以上;这是合理的,因为下天线离地板更近,且为低频段。总体来说,上天线和下天线的总效率分别优于 50%和 45%,满足 5G 通信的要求。

包络相关系数(ECC)计算结果^[14]见图 6,计算得到的 ECCs 在低频段小于 0.2,高频段小于 0.12。从计算结果可以看出,无论在低频端还是高频段,ECC 峰值都出现在 2 个相邻单元之间(如:单元 1 和单元 2、单元 2 和单元 3);同频段的天线之间(如:单元 2 和单元 4、单元 1 和单元 3)的 ECC 反而很小。这种现象的存在是由天线形式本身造成的,因本文采用的是耦合环路的天线形式,单元 1 在馈电时,它的短路支节和单元 2 的单元支节距离非常近;因此当单元 1 将电流耦合传入其短路支节时,单元 2 也会受到耦合电流影响。所以,虽然单元 1 和单元 2 工作在不同频段,但是其 ECC 值反而高于同频段天线单元之间的值。尽管如此,对于 5G 通信系统来说,该多天线阵列计算出的 ECC 值整体还是远远优于行业标准(0.5)。

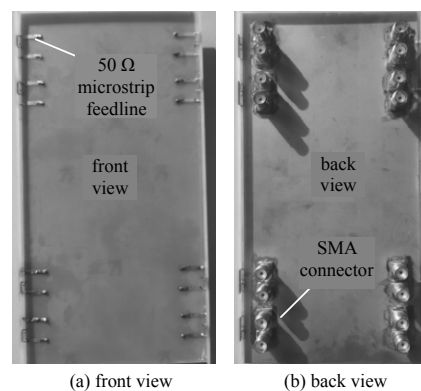


Fig.3 Photographs of the fabricated prototype

图3 天线实物图

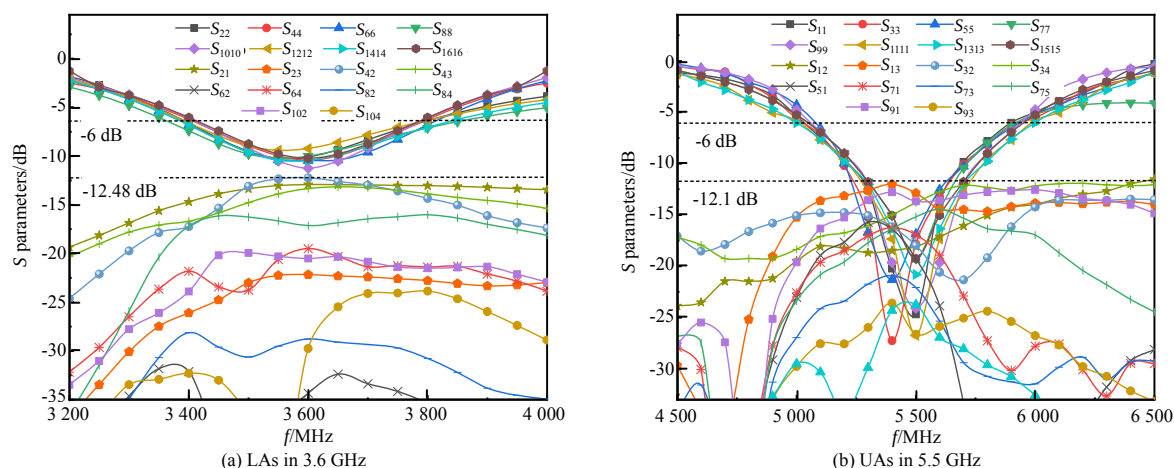


Fig.4 Measured S-parameters of antennas

图 4 测试 S 参数

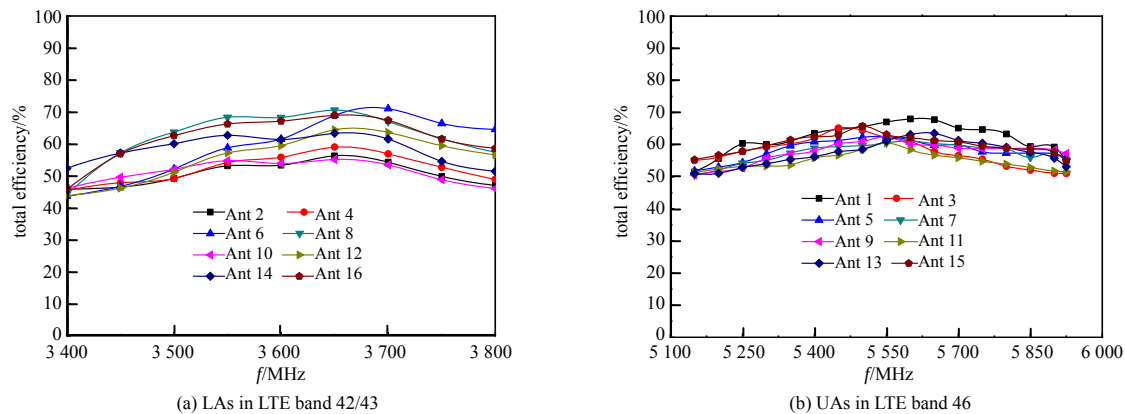


Fig.5 Measured total efficiency of antennas

图 5 天线的总效率测试

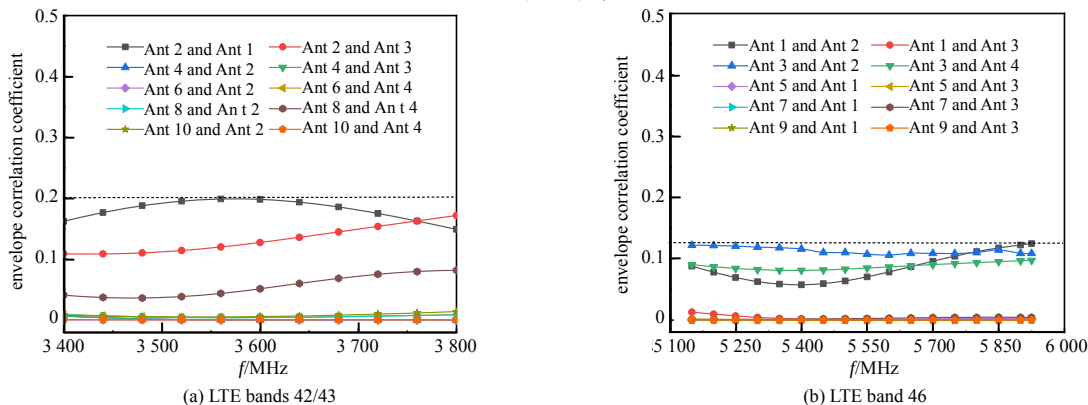


Fig.6 Calculated ECC values from the measured results

图 6 从测试结果计算出的 ECC 值

4 人手和头对天线性能的影响研究

人体具有很强的吸收电磁波能力,一般来说人体手或者头靠近天线时,天线会有 3 dB 的损耗。因此,用户在使用智能手机时会对天线性能产生很大的影响。本节就用户常用的左手(Left Hand, LH)、右手(Right Hand, RH)、阅读/娱乐模式(Read/game Mode, RM)以及通话模式(Call Mode, CM)(见图 7)下对天线性能进行研究分析,验证本文提出的天线阵列在正常使用过程中是否能达到性能要求。

图 8(a)和(b)为左右手模式下仿真的天线总效率。从图中可以看出,在左右手模式下的仿真结果差别不大,这是对称导致的结果。另外,下天线(工作在 LTE band 42/43)更容易受到手模型的影响,其天线效率普遍比上天线(工作在 LTE band 46)差;这是由于下天线尺寸大于上天线,更多的天线面积与手接触,使得天线效率降低。

总体来看,左右手模式下低频效率平均值为 24%,高频部分平均值为 36.5%。阅读/娱乐模式下的天线效率结果见图 8(c)。从图中可以看出,阅读模式下的上天线性能也是优于下天线,其原因也同左右手模式一样。从计算结果来看,此模式下的低频天线平均效率为 25.5%,略高于左右手模式;高频单元则为 33.5%。

除了研究各种手握状态下手对天线性能的影响,人体头部对天线辐射的影响更为关键,智能手机最基本也是最为重要的功能就是通话。图 8(d)给出了在通话模式下的天线效率。从图中可看出,在头和手的共同作用下,下天线的天线性能急剧下降,最高效率仅为 38%;其中,单元 2、单元 4 和单元 8 由于和人体接触过于紧密,导致天线基本无法辐射;另外,只有单元 10 和单元 14 的总效率能勉强维持通信使用。反观高频处,上天线受到的影响就相对好很多。整体来看,低频天线的平均效率仅为 12.6%,是 4 种模式下的最低值;高频天线则是 21.3%。

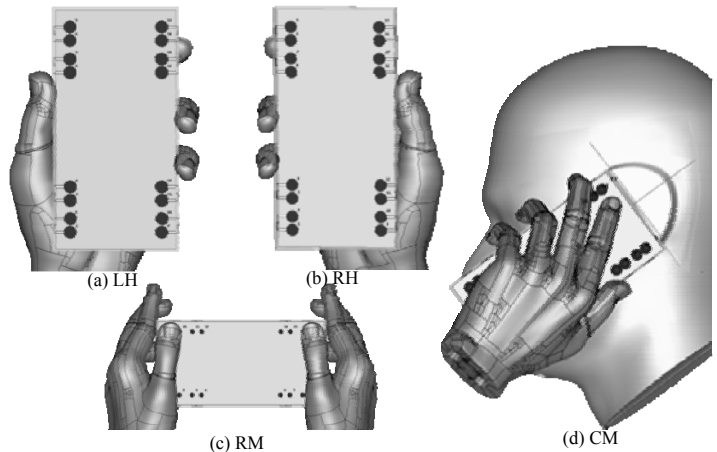


Fig.7 Four typical usage scenarios of smartphone

图 7 四种常用模式

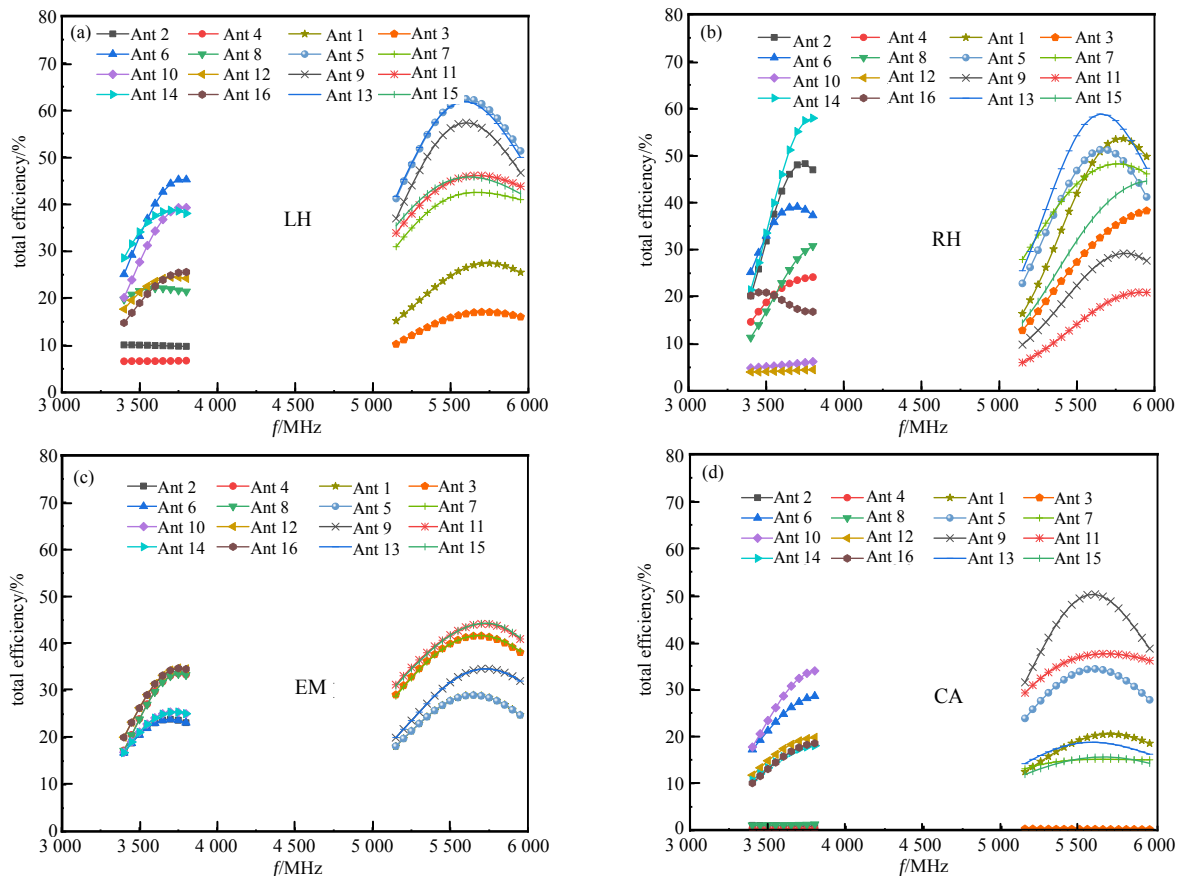


Fig.8 Simulated total efficiency in typical usage scenarios

图 8 典型适用模式下的总效率

从 4 种模式下的仿真平均效率来看,下天线由于尺寸原因更容易受到人体(手头)的影响而导致天线性能下降;上天线相对好一些;另外,通话模式下天线性能最差。但是在最差的使用情况下,低频天线的平均效率也能达到 12.6%,而高频为 21.3%。从这也能验证本文设计的应用于智能手机的 16 单元紧凑多频天线阵列不仅能够在自由空间表现出优秀的天线性能,在日常使用中也能保持相对良好的性能以维持 5G 通信。

5 结论

本文提出一种针对于未来 5G(Sub-6 GHz)智能手机的 16 单元紧凑型多频天线阵列。通过布局于智能手机侧边框上的耦合环路天线阵列实现 LTE band42/43 和 LTE band 46 的覆盖,同时减小天线布局面积和净空区域,为 2G/3G/4G/GPS/WIFI 等天线的设计预留了足够空间。仿真和测试结果表明该天线阵列在工作频段内,天线单元表现出良好的-6 dB 回波损耗和优于-12 dB 的隔离度;天线单元同样具有不错的辐射特性,总效率均优于 45%。此外,MIMO 天线系统的特性参数也优于行业标准。最后,本文对智能手机用户常用的 4 种模式进行了研究分析,结果表明该 16 单元紧凑型多频天线阵列在用户使用过程中也能保持相对良好的天线性能。因此,本文提出的 16 单元天线阵列适用于未来 5G 智能手机的应用。

参考文献:

- [1] NADEEM Q U A,KAMMOUN A,DEBBAH M,et al. Design of 5G full dimension massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018,66(2):726-740.
- [2] AL-FALAHY N,ALANI O Y. Technologies for 5G networks:challenges and opportunities[J]. IT Professional, 2017,19(1):12-20.
- [3] AGIWAL M,ROY A,SAXENA N. Next generation 5G wireless networks:a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016,18,(3):1617-1655.
- [4] BAN Y L,CHEN Z X,CHEN Z,et al. Decoupled hepta-band antenna array for WWAN/LTE smartphone applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014(13):999-1002.
- [5] 刘志伟,结顺利,吴喜亮,等. 一种具有双缝隙结构的双频宽带 MIMO 天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):1048-1053. (LIU Zhiwei,JIE Shunli,WU Xiliang,et al. Dual-band wideband MIMO antenna with double slot structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):1048-1053.)
- [6] BAN Y L,QIANG Y F,WU G,et al. Reconfigurable narrow-frame antenna for LTE/WWAN metal-rimmed smartphone applications[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2016,10(10):1092-1100.
- [7] WONG K L,CHEN Y C,LI W Y. Four LTE low-band smartphone antennas and their MIMO performance with user's hand presence[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2016,58(9):2046-2052.
- [8] DING Y,DU Z,GONG K. A four-element antenna system for mobile phones[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007(6):655-658.
- [9] AI-HAGI A,ILVONEN J,VALKONEN R,et al. Eight-element antenna array for diversity and MIMO mobile terminal in LTE 3 500 MHz band[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2014,56(6):1323-1327.
- [10] WONG K L,LU J Y. 3.6 GHz 10-antenna array for MIMO operation in the smartphone[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2015,57(7):1699-1704.
- [11] LI Mingyang,BAN Yongling,XU Ziqiang. Eight-port orthogonally dual-polarized antenna array for 5G smartphone applications[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016,64(9):3820-3830.
- [12] LI Y,ZOU H,WANG M,et al. Eight-element MIMO antenna array for 5G/Sub-6 GHz indoor micro wireless access points[C]// International Workshop Antenna Technol(iWAT). Nanjing,China:[s.n.], 2018:1-4.
- [13] HUSSAIN R,ALRESHAID A T,PODILCHAK S K,et al. Compact 4G MIMO antenna integrated with a 5G array for current and future mobile handsets[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2017,11(2):271-279.
- [14] TIAN R,LAU B K,YING Z. Multiplexing efficiency of MIMO antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011(10):183-186.

作者简介:



丁志清(1994-),男,南昌市人,在读硕士研究生,主要研究方向为 MIMO 天线理论与设计.email:360906700@qq.com.

邢贝贝(1994-),女,河南省驻马店市人,在读硕士研究生,主要研究方向为天线理论与设计。

姚 婷(1998-),女,江西省吉安市人,在读本科生,主要研究方向为天线理论与设计。

刘雪梅(1998-),女,江西省赣州市人,在读本科生,主要研究方向为天线理论与设计。

刘志伟(1982-),男,南昌市人,博士,副教授,主要研究方向为计算电磁学与快速算法。