

一种提高移动终端天线隔离度的方法

刘 巍, 林 辉, 廖淑敏, 郭 恒, 宋以祥

联想(上海)信息技术有限公司, 上海

收稿日期: 2022年10月27日; 录用日期: 2022年11月25日; 发布日期: 2022年12月2日

摘 要

本文研究移动终端天线的隔离度提高方法。首先通过理论的推导得出了对称设计的天线当共模(CM)与差模(DM)阻抗相等的时候隔离度最优的结论。基于此分析思路提出并设计了紧耦合情况下通过在两个相邻的倒F天线地脚之间同时串联电感和电容来提升隔离度的方法。首先, 通过xfttd仿真软件对比了串联电感和电容前后天线间隔离度的变化。其次, 制作了实验治具并对隔离度和回损进行了测试。实验结果表明, 此方法在设计频段内隔离度提升约4.5~8.5 dB, 仿真和实验结果均表明该方法有效。

关键词

隔离度, 共模差模, 倒F天线

A Method to Improve the Isolation of Mobile Terminal Antenna

Wei Liu, Hui Lin, Shumin Liao, Heng Guo, Yixiang Song

Lenovo (Shanghai) Information Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: Oct. 27th, 2022; accepted: Nov. 25th, 2022; published: Dec. 2nd, 2022

Abstract

In this paper, the isolation improvement method of mobile terminal antenna is studied. For the symmetrically designed antennas, the isolation is optimal when the impedances of the common mode (CM) and the differential mode (DM) are equal. Based on this analysis method, a method is proposed to improve the isolation by connecting simultaneously inductance and capacitance in series between two adjacent inverted-F antenna ground points in the case of tight coupling. First, the isolation without and with series inductance and capacitance is compared by the xfttd simulation software. Secondly, the proposed antenna was manufactured then the isolation and return loss were measured. The experimental results show that this method could improve the isolation

by about 4.5~8.5 db in the operational frequency band, and both the simulated and measured results show that the method is effective.

Keywords

Isolation, Common Mode (CM) and the Differential Mode (DM), Inverted-F Antenna

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了满足日益提升的数据速率需求及提高用户体验，能够提高信道容量和信号吞吐量的多天线技术在当下的无线通信技术中被广泛使用，而消费类电子产品一直在往低剖面、高集成度、支持多频段的趋势发展，在如此紧凑的空间环境中实现多天线的的设计则必然带来天线之间的耦合问题，天线之间耦合会带来通信系统的信道容量降低等问题；很多文献对去耦技术进行了研究，如空间分集技术[1]、极化分集技术[2]、带阻结构去耦[3]、缺陷地结构去耦[4]、中和线去耦[5]、谐振器去耦[6]、自愈式去耦技术[7]。这些对于紧耦合的解耦方法往往具有结构复杂、解耦带宽窄、影响辐射特性等缺点。近期模式抵消(MCM)的解耦方法[8]较好地解决了近距离的两个天线的耦合问题，对于对称设计的两个天线当共模阻抗和差模阻抗相等时隔离度最优。

本文基于 MCM 的解耦思路，在距离较近的两个天线的地之间通过串联电感电容的方式来提高天线间的隔离度，相较于其它的解耦方法，这种方法结构简单易于实现尤其在 5G 移动通讯终端设备中较容易实现和应用，解耦的最优频点可以通过加载的串联电感、电容值进行调节。

2. 天线设计

2.1. 设计原理

基于二端口网络的互易性，对于完全对称的两个天线，共模 CM 的 S 参数 S_{cc} 和差模 DM 的 S 参数 S_{dd} 可以简化为如下形式[9]：

$$S_{cc11} = (S_{11} + S_{12} + S_{21} + S_{22})/2 = S_{11} + S_{21} \quad (1)$$

$$S_{dd11} = (S_{11} - S_{12} - S_{21} + S_{22})/2 = S_{11} - S_{21} \quad (2)$$

两式左右两边相减，共模和差模的关系可以进一步推到如下，

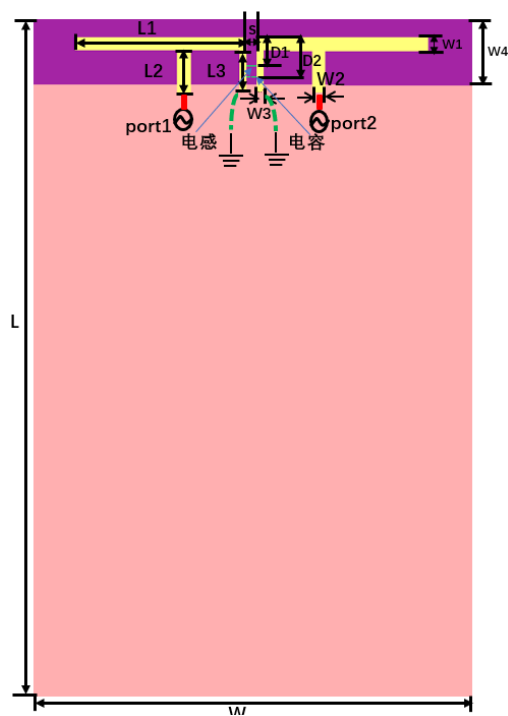
$$|S_{cc11} - S_{dd11}| = 2|S_{21}| \quad (3)$$

上式表明当共模和差模的阻抗相等时，隔离度 $S_{21} = 0$ 即天线之间耦合即可消除。基于上述设计原理，只需要找到能够使得两个天线共模、差模阻抗相等或者靠近的方法，即可以提升两个天线之间的隔离度。

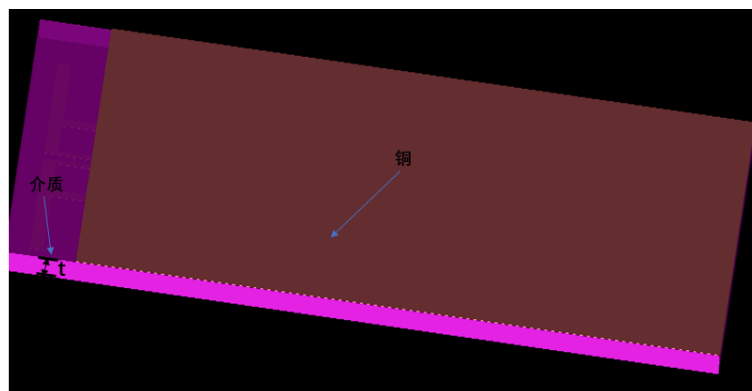
2.2. 天线结构

如下图 1 所示背靠背的天线 1 和天线 2 为完全对称结构的 IFA 形式，在端口 1、2 分别采用 50 ohm 的 SMA 接头进行馈电，天线整体尺寸 $100 \times 65 \text{ mm}^2$ ，天线 1 和天线 2 之间背靠背的两个地之间间距 s 只有 1.5 mm，通过在两个天线之间的地之间距离顶端 D1 和 D2 位置处分别串联电感 L 和电容 C 的方式来

实现隔离度的提升, 其中铜厚度 35 μm , 介质 FR4 介电常数 $\epsilon_r = 3.4$, 损耗角正切 $\delta = 0.02$ 。天线具体结构如图 1 中, 详细的天线结构参数在表 1 中。



(a) 正视图



(b) 侧视图

Figure 1. Diagram of antenna structure
图 1. 天线结构示意图

Table 1. Design parameters (units: mm)

表 1. 设计参数表格(单位: mm)

参数	L	L1	L2	L3	W	W1	W2	W3	W4	D1
数值	100	25.1	6	5.5	65	2	2	1	10	4.3
参数	D2	s	t							
数值	5.8	1.5	1.6							

2.3. 仿真结果

本文中天线的设计工作频点为 2.4~2.5 GHz，对两天线之间不加电感、电容和加串联电感 8.2 nH、电容 1.5 pF 的情况下的共模/差模阻抗的仿真结果如图 2 中所示，加上串联电感、电容后 CM 阻抗位置不变，DM 阻抗位置从低阻抗区向高阻抗区转动且向 CM 阻抗位置靠近，由 2.1 中所述的理论分析可知当共模与差模阻抗越接近时两天线之间的隔离度越好，因此由天线的 CM、DM 的阻抗位置变化情况来看，加载串联电感、电容后会比加载电感、电容前的天线的隔离度有所提升。对 S 参数进行仿真对比，从仿真结果来看 S_{11} 的 -5 dB 相对带宽约 21%，加 LC 后带宽略有增加，回损变化如图 3 中所示。如图 4 中所示， S_{21} 最差的点从 -9 dB 提升到 -13 dB，在整个设计频带内隔离度 S_{21} 有 2~4 dB 的提升，说明通过在两天线地之间串联电感、电容的方式能够实现对隔离度 S_{21} 的提升。

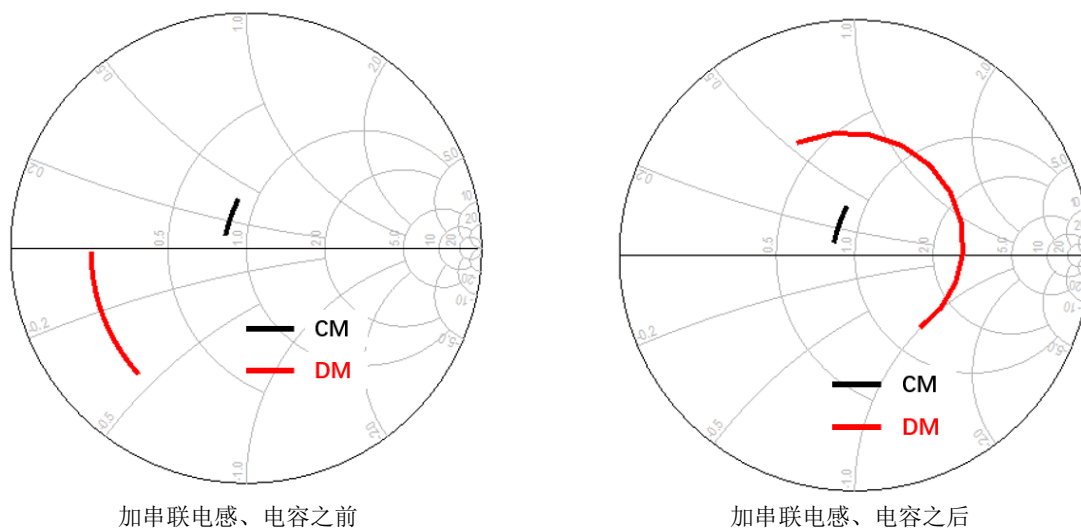


Figure 2. CM/DM results before and after series inductance and capacitance (2.4~2.5 GHz)

图 2. 串联电感和电容前后的 CM/DM 结果(2.4~2.5 GHz)

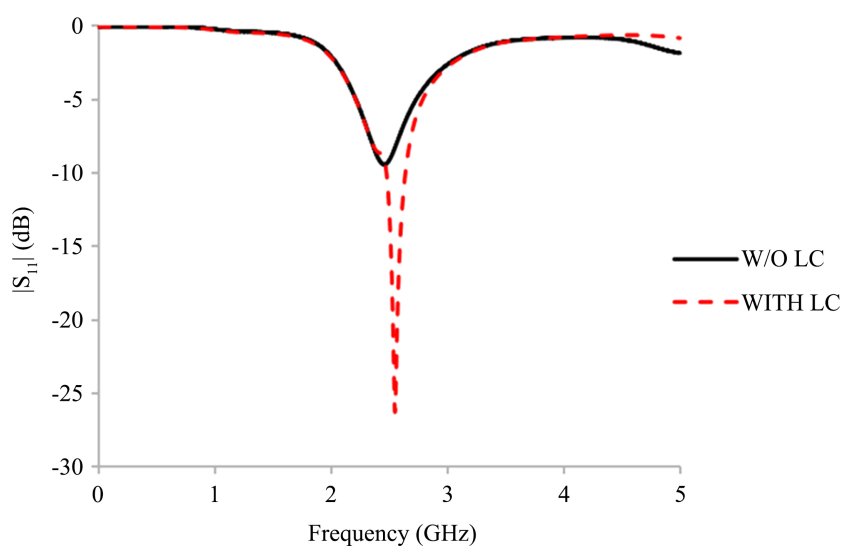


Figure 3. S_{11} results before and after series inductance and capacitance

图 3. 串联电感和电容前后的 S_{11} 结果

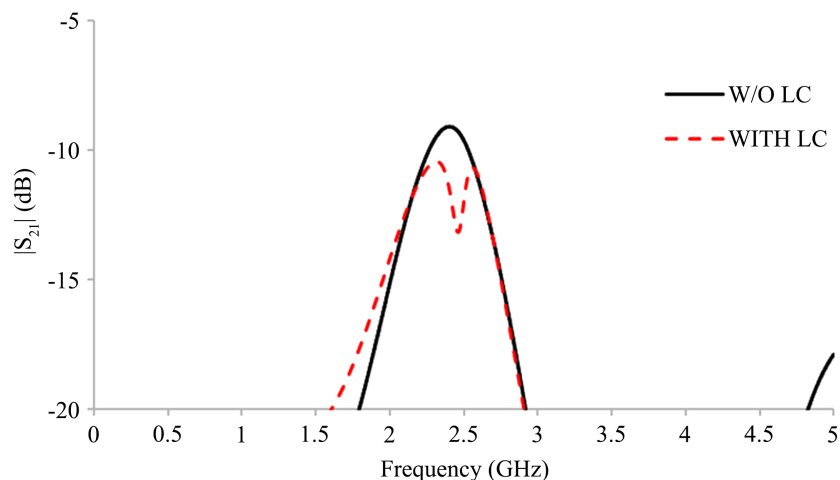


Figure 4. S_{21} results before and after series inductance and capacitance

图 4. 串联电感和电容前后的 S_{21} 结果

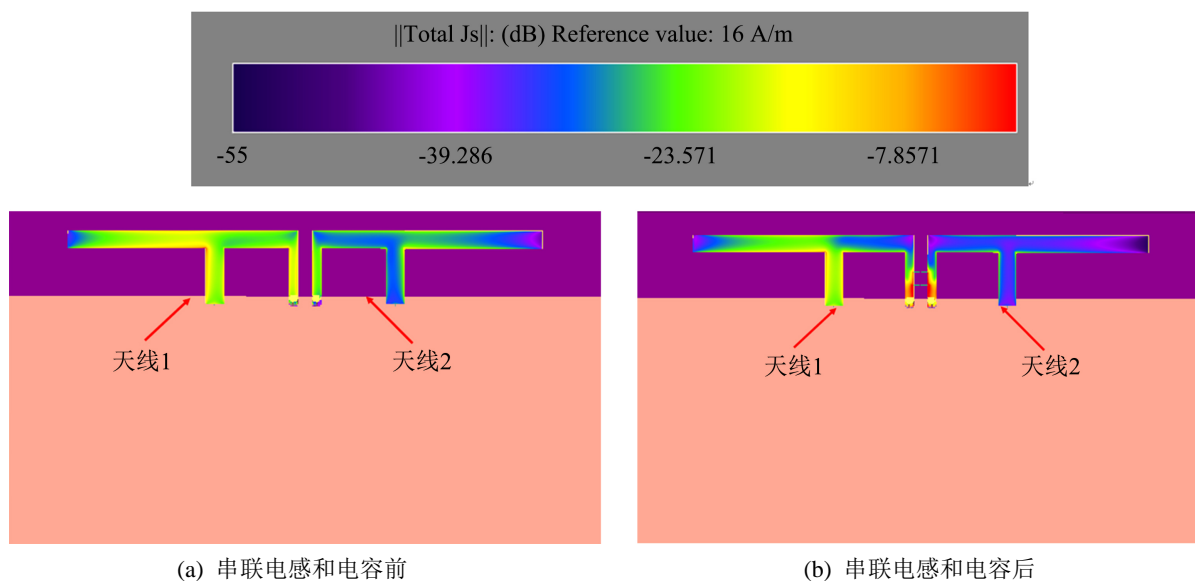


Figure 5. Surface current distribution results before and after series inductor and capacitor (2.45 GHz)

图 5. 串联电感和电容前后的表面电流分布结果(2.45 GHz)

上图 5(a), 图 5(b)中为在频率 2.45 GHz 的情况下, 在两天线之间加载串联电感和电容前后的天线 pattern 表面电流分布的仿真结果。从图 5(a)中可以看出在串联电感和电容前天线 2 受到了天线 1 的耦合影响, 天线 2 的支节上存在有一定的耦合电流分布, 串联电感和电容后天线 2 上的电流分布较如图 5(b)中所示, 天线 2 支节上存在的耦合电流分布减弱, 即在两天线之间加载串联电感和电容后起到了去耦的效果, 从而有效降低了天线 1 对天线 2 的影响, 从而提升了两天线之间的隔离度。

2.4. 参数研究

为了研究串联的电容值对隔离度的影响, 如图 6 中固定电感值 8.2 nH 不变, 改变电容值的大小, 当电容值 1.2~2 pF 从小到大扫描时, 隔离度抑制的最优频点逐渐向低偏移。如图 7 中所示, 从 LCtank 电路谐振的角度理解[10] [11], 这主要是因为加入串联的电感、电容后与原来的两个天线之间的互感、互容一

起组成了并联的 LC 电路, 当并联 LC 电路里阻抗最大(并联谐振)时隔离度达到最优, 根据谐振频点与电感、电容关系的公式 $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ 来看, 当电容增大时, 并联谐振点会向低偏移。图 6 中的仿真数据也说明了隔离度的最优频点可以通过调整电容 C 的大小进行设计频率的调整。

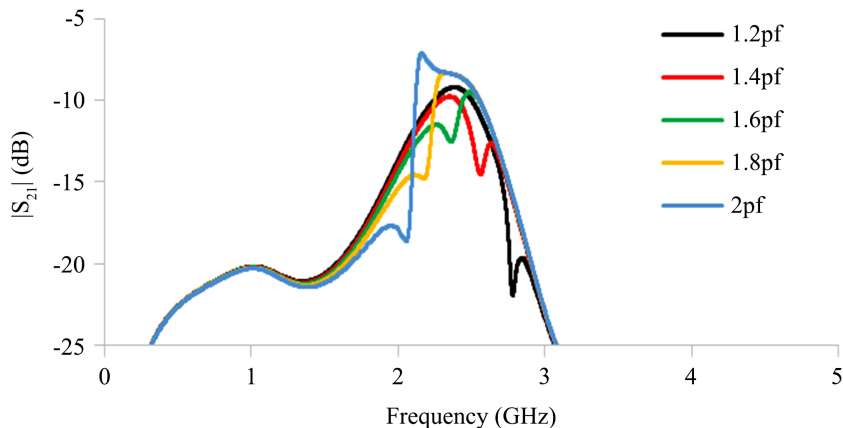


Figure 6. S_{21} results of different capacitance values

图 6. 扫描不同电容值的 S_{21} 结果

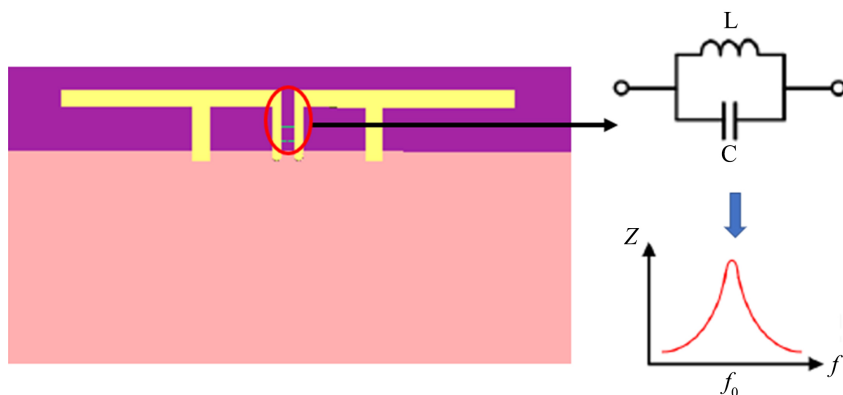


Figure 7. Diagram of the equivalent circuit of series inductors and capacitors between two antenna grounds

图 7. 两天线地之间串联电感、电容的等效电路示意图

3. 实物治具及测试结果

制作的实物治具如下图 8 中所示, 按照仿真中的设计位置处焊接了电感、电容, 并且分别对不加电感、电容与加上电感 8.2 nH、电容 1.8 pF (根据实际调试情况将电容由仿真时的 1.5 pf 调整为 1.8 pf, 主要是因为采用 1.5 pf 的电容时实际调试中隔离度优化最好的谐振频点偏高, 调整为 1.8 pf 后隔离度抑制较好的频点落在 2.4~2.5 GHz 带内) 的两种情况进行了实验测试, 如图 9 所示在设计频段 2.4~2.5 GHz 内 $S_{11} < -10$ db 回损较好即串联电感、电容的引入没有对回损产生恶化的影响, 在如图 10 中所示在 2.4~2.5 GHz 的频段内, S_{21} 在串联电感和电容后比串联电容和电容前提升了约 4.5~8.5 db, 实验结果表明在距离较近的紧耦合的两天线的地之间串联电感、电容的方法对于提高天线之间的隔离度是有效的。

从实测结果来看, 加串联 LC 前后的回损 S_{11} 和隔离度 S_{21} 的测试结果及趋势与仿真结果吻合较好, 但是隔离度 S_{21} 最优频点略有偏移, 一方面是因为加载的电容值的调整, 另一方面是由于加工测试误差导致。



Figure 8. Physical fixture diagram
图 8. 实物治具图

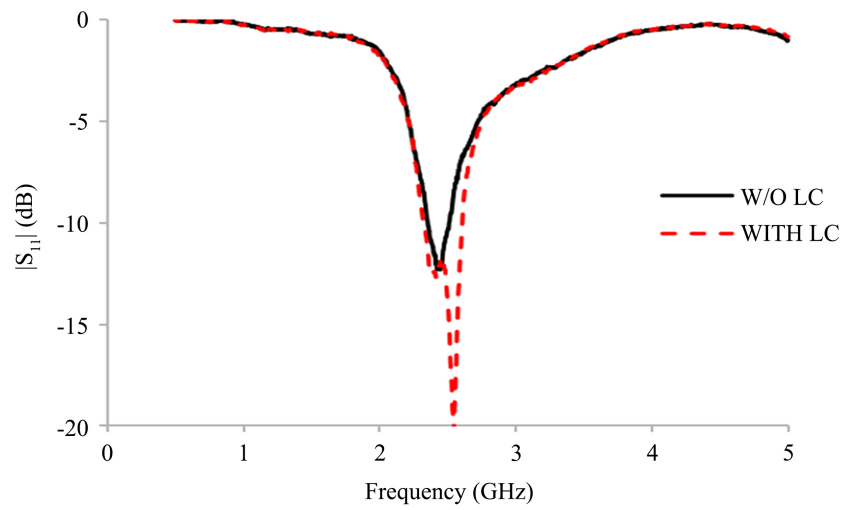


Figure 9. S_{11} measured result
图 9. 实物治具的 S_{11} 测试结果

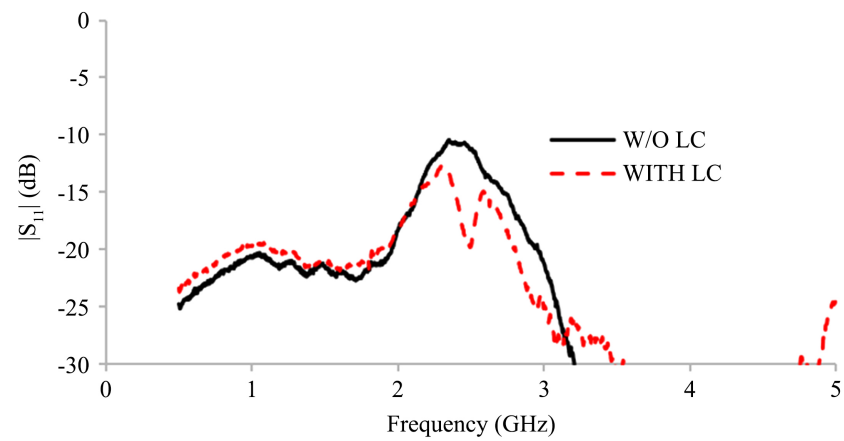


Figure 10. S_{21} measured result
图 10. 实物治具的 S_{21} 测试结果

4. 结论

本文基于当共模(CM)与差模(DM)阻抗相等的时候隔离度最优的设计思路,提出了一种在紧耦合的两个倒F天线的地之间增加串联电感和电容的解耦方法,实现了隔离度的提升,这种方法实现简单且隔离度最优频点可以通过调整串联电容值的大小进行调节,仿真和测试结果均表明此设计方法可行,实验测试结果显示在设计频段内隔离度提升约4.5~8.5 db。对于移动终端紧凑的空间环境中实现多天线的的设计且当天线距离较近时所产生的天线之间的耦合问题,通过本文中所提出的解耦方法可以得到有效解决,在诸如5G MIMO天线设计中有较好的应用前景和参考意义。

参考文献

- [1] Chae, S.H., Oh, S.-K. and Park, S.-O. (2007) Analysis of Mutual Coupling, Correlations, and TARC in WiBro MIMO Array Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*, **6**, 122-125. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2007.893109>
- [2] Sun, L.B., Feng, H.G., Li, Y. and Zhang, Z.J. (2018) Compact 5G MIMO Mobile Phone Antennas with Tightly Arranged Orthogonal-Mode Pairs. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 6364-6369. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2864674>
- [3] Hsu, C.-C., Lin, K.-H. and Su, H.-L. (2011) Implementation of Broadband Isolator Using Metamaterial-Inspired Resonators and a T-Shaped Branch for MIMO Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **59**, 3936-3939. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2163741>
- [4] Zhang, S., Lau, B.K., Tan, Y., Ying, Z.N. and He, S.L. (2012) Mutual Coupling Reduction of Two PIFAs with a T-Shape Slot Impedance Transformer for MIMO Mobile Terminals. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 1521-1531. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2180329>
- [5] Diallo, A., Luxey, C., Thuc, P.L., Staraj, R. and Kossiavas, G. (2006) Study and Reduction of the Mutual Coupling between Two Mobile Phone PIFAs Operating in the DCS1800 and UMTS Bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **54**, 3063-3074. <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.883981>
- [6] Deng, J.Y., Li, J.Y., Zhao, L.Y. and Guo, L.X. (2017) A Dual-Band Inverted-F MIMO Antenna with Enhanced Isolation for WLAN Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **16**, 2270-2273. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2713986>
- [7] Sui, J.W. and Wu, K.L. (2017) Self-Curing Decoupling Technique for Two Inverted-F Antennas with Capacitive Loads. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 1093-1101. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2790041>
- [8] Sun, L.B., Li, Y. and Zhang, Z.J. (2021) Decoupling between Extremely Closely Spaced Patch Antennas by Mode Cancellation Method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **69**, 3074-3083. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3030922>
- [9] Sun, L.B., Li, Y., Zhang, Z.J. and Wang, H.Y. (2020) Self-Decoupled MIMO Antenna Pair with Shared Radiator for 5G Smartphones. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **68**, 3423-3432. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2963664>
- [10] Sun, L.B., Li, Y. and Zhang, Z.J. (2021) Wideband Integrated Quad-Element MIMO Antennas Based on Complementary Antenna Pairs for 5G Smartphones. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **69**, 4466-4474. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3060020>
- [11] Sun, L.B., Li, Y. and Zhang, Z.J. (2021) Wideband Decoupling of Integrated Slot Antenna Pairs for 5G Smartphones. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **69**, 2386-2391. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3021785>