论文

基于零阶谐振超材料的新型 LTE 智能手机天线设计

李龙^{①②*}, 贾珍^{①②}

① 西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071

② 西安电子科技大学天线与微波技术国防科技重点实验室, 西安 710071

* 通信作者. E-mail: lilong@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2014-09-23; 接受日期: 2015-01-16; 网络出版日期: 2015-05-15

国家自然科学基金 (批准号: 51477126)、陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目 (批准号: 2013JZ019)、中央高校基本科研业务费专项重点基金 (批准号: K5051202051) 和国家公派高级研究学者项目 (批准号: 201208610177) 资助

摘要 基于目前无线通信系统快速发展的背景针对下一代智能手机终端天线小型化、高性能、多频带发展的迫切需求, 以复合左右手传输线理论为基础, 设计了一款覆盖 LTE 频段的新型智能手机终端天线. 通过应用零阶谐振原理在天线设计中加载等效左手电容、左手电感结构和引入地回路电流的方法, 实现了天线的小型化、高性能设计. 该天线工作频带覆盖 LTE747/GSM850/900/DCS1800/PCS1900/UMTS/LTE2300/2600, 具有较好的辐射特性、较高的辐射效率和增益, 能够满足 LTE 智能移动终端的设计要求. 本文对该天线的工作特性给出了详细分析, 同时进行了加工测量. 实测结果显示, 加工的天线与仿真结果吻合, 该零阶谐振超材料天线具有小型化和高性能的优点.

关键词 超材料天线 复合左右手传输线 零阶谐振 小型化 多频带 LTE

1 引言

无线通信系统快速发展, 到 2017 年, 全球 LTE 覆盖将达到 50%, 4G 时代正全面加速到来. 同时现有的 2G, 3G 和 4G 技术将在未来很长一段时间内并存, 这就要求天线能够覆盖更多的频段. 在无线通信迅猛发展的大背景下, 无线终端通信系统的小型化趋势使得预留给智能手机天线的空间越来越小; 而另一方面, 通信业务如语音、数据、视频、广播和数字多媒体内容等不断增多, 高速、高质量、宽带和高信道容量逐渐成为手机天线设计的趋势, 这就使得无线移动终端天线的设计变得更具难度和挑战性. 新一代无线通信促使终端产品采用具有多功能和多频带的天线, 这要求终端天线不但能够覆盖更多、更宽的频带, 同时要具有较好的全向辐射性能^[1]. 实现多频带、宽带的方法有很多, 例如, 加载集总电容电感元件^[2,3], 增大天线支架的高度^[4,5], 加载阻抗匹配网络^[6]和耦合缝隙等^[7]. 传统天线的谐振频率和其物理尺寸密切相关, 缩小天线的物理尺寸将会导致谐振频率升高或者工作性能下降, 这对天线的多频带、小型化设计带来很大的困难. 调研目前研究中所设计的覆盖 LTE 频段的的天线^[8~12], 其结构尺寸普遍较大, 因此设计覆盖 LTE 频段的小型化天线就成为当前无线终端的重要课

引用格式: 李龙, 贾珍. 基于零阶谐振超材料的新型 LTE 智能手机天线设计. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 1169–1178, doi: 10.1360/N112014-00282

图 1 复合左右手传输线等效电路

Figure 1 Equivalent circuit of composite right and left-handed (CRLH) transmission line

题. 本文提出一款基于零阶谐振超材料的小型化天线设计, 可应用于无线终端设备覆盖 LTE 的工作频段.

早在 20 世纪 60 年代, 前苏联物理学家 Veselago 从理论上研究了双负介质的奇异特性, 当媒质的介电常数 ε 和磁导率 μ 同时为负值, 电场、磁场和波矢之间不再遵循传统媒质的右手定则, 而是构成左手螺旋关系. 同时他还预言了在该材料中会出现诸如负折射特性、逆 Doppler 效应等^[13~15] 奇异特性. 电磁超材料 (metamaterials) 是最近 10 年发展起来的热门研究, 超材料在理论上能够实现几乎任意的等效电磁参数, 极大拓展了电磁介质的特性参数范围, 为人们提供了更大的调控电磁波的空间.

本文正是针对下一代无线通信系统的发展趋势和需求, 利用电磁超材料所具有的超常材料功能以及新颖的设计思想, 研究无线终端天线小型化、高性能、多频带设计等方面的关键技术. 面对下一代无线通信系统的新挑战和新需求, 从无线终端天线小型化和 LTE 多频带方面出发, 同时结合超材料复合左右手传输线思想, 研究设计出一款基于零阶谐振的超材料新型智能手机终端天线, 仿真分析并进行实物测试验证, 这为下一代智能手机天线设计带来新的研究思路.

2 零阶谐振理论

在不考虑传输线损耗电阻的情况下, 传统的右手传输线可表示为由串联电感和并联电容组成的分布参数电路, 左手传输线则是并联电感和串联电容组成的等效电路. 而复合左右手传输线 (CRLH-TL) 是右手传输线与左手传输线的组合, 其等效电路如图 1 所示, 包括了单位长度的串联电感 L_R 、串联电容 C_L 、并联电感 L_L 和并联电容 C_R 4 个部分, 这种传输线结构能同时表现出右手和左手特性^[16].

在非平衡态下, CRLH 传输线存在两个特殊的频点, 串联谐振点 ω_{se} 和并联谐振点 ω_{sh} , 这两个特殊频点上的传播常数 $\beta=0$, 故其相位变化为 $\theta = \beta l$ 也为零, 因此称这两个特殊点为零阶谐振点^[15]. 串联谐振频率仅由串联电容 C_L 和串联电感 L_R 决定, 并联谐振频率只受并联电容 C_R 和并联电感 L_L 控制, 这种情况下谐振频率与物理尺寸之间就不存在必然的约束关系. 因此只要通过改变物理结构来

图 2 (网络版彩图) 零阶谐振超材料天线结构

Figure 2 (Color online) Geometry of the proposed antenna employing CRLH-TL zeroth-order resonance. (a) The overall figure; (b) top view; (c) top of substrate; (d) bottom of substrate

改变等效的电容和电感值, 就能改变零阶谐振点的谐振中心频率. 近年来, 复合左右手传输线结构凭借损耗小、频带宽的优势被广泛地应用在微波电路和天线的设计中, 为实现天线小型化方面创造了理论基础 [17~24].

3 零阶谐振天线设计与仿真

图 2 给出了零阶谐振天线的整体图和细节图, 所述天线采用的介质基板大小为 $110\text{ mm} \times 65\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$, 介电常数为 4.4, 损耗角正切为 0.02, 天线部分净空尺寸为 $35\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 3.8\text{ mm}$, 空气支架高为 3 mm . 天线由印刷在介质基板两面和天线支架上的金属组成. 这里考虑到天线支架对天线工作的损耗, 因而未使用介质支架, 实际中可以考虑直接共形在手机外壳内表面上; 接地板位于介质基板底部, 地板材料为铜箔; 使用集总端口进行馈电. 设计天线的具体拓扑结构及参数情况如图 2 所示.

该天线馈电端口设在基板底部, 通过端口馈电到倒 L 型单极子上, 在高频产生一个谐振模式, 其结构如图 2(d) 所示. 低频段谐振模式是通过在倒 L 型单极子上接入过孔, 连通到基板上层的 CRLH 谐振回路上, 产生低频 0.9 GHz 附近的谐振工作点. 另一路通过地回路, 经基板最左侧的过孔连通到折叠短路单极子上, 在 0.76 GHz 处形成另一个低频谐振, 覆盖 LTE747 频段. 两个低频谐振回路联合起来就能覆盖所需的低频频段. 图 2(c) 中所示的寄生枝节与折叠短路单极子相连, 该寄生枝节的作用是在高频 2.6 GHz 附近产生谐振, 展宽天线的高频工作频带. 通过 CRLH 谐振回路部分的加载, 耦合缝隙产生串联左手电容 C_L , 短路微带构成并联左手电感 L_L , 调整该部分结构参数, 可以等效地调整左手电容 C_L 和左手电感 L_L 的大小, 实现对天线谐振中心的有效调节和灵活设计, 同时基于零阶谐

图 3 S 参数特性

Figure 3 S-parameter characteristics

图 4 (网络版彩图) 输入阻抗特性

Figure 4 (Color online) Input impedance characteristics

图 5 天线的总效率

Figure 5 Total efficiency of the proposed antenna

振与物理尺寸无密切相关的特性, 实现了天线小型化. 而另一方面折叠短路单极子产生的低频谐振由于引入了地回路的部分, 谐振时会在地板上产生工作电流, 可以有效地减小天线部分的尺寸, 也达到小型化的目的.

HFSS 全波仿真结果如图 3 所示, 该天线阻抗带宽低频覆盖 0.72~0.96 GHz, 高频阻抗带宽为 1.78~2.75 GHz, 因此该天线能够完全覆盖 LTE747/GSM850/900/DCS1800/PCS1900/UMTS/LTE2300/2600 频段. 天线的输入阻抗如图 4 所示, 从图 4 中可以看出该天线工作在低频的输入阻抗特性呈现串联谐振和并联谐振的联合工作模式, 表明本文所提出的天线拓扑结构实现了 CRLH 结构中的零阶谐振特性, 相对于工作频率来说, 天线的尺寸非常小, 但由于产生的是零阶超材料的电磁响应, 该小型化天线具有较高的辐射效率和性能.

图 5 给出了天线总的效率特性, 从中可以看到该天线在工作频带内具有较高的辐射效率, 特别是在低频 LTE 频段保持较高的辐射效率, 这是零阶谐振超材料天线的一大优势. 天线在 4 个中心频点的辐射三维方向图如图 6 所示, 可以看出天线在高低频都具有良好的全向性, 满足无线终端对天线辐射全向性的要求, 该天线在 0.76, 0.9, 1.9 和 2.7 GHz 处增益分别达到 1.85, 1.86, 2.53 和 5.2 dBi.

图 6 (网络版彩图) 辐射方向图特性

Figure 6 (Color online) Radiation patterns of the proposed antenna. (a) 0.76 GHz; (b) 0.9 GHz; (c) 1.9 GHz; (d) 2.7 GHz

图 7 (网络版彩图) 天线的不同结构分析

Figure 7 (Color online) Analysis of the proposed antenna with different parts

图 7 给出了不同天线结构的情况, 其 S 参数仿真结果如图 8 所示, 仅有倒 L 型单极子的 Part1 部分工作频带在高频, 谐振时阻抗匹配情况不好; 包括 Part1 倒 L 型单极子和 Part2 折叠短路单极子的天线结构在高频和低频都产生谐振点, 低频谐振带宽较窄, 只覆盖 LTE747 频段; 涵盖 Part1 倒 L 型单极子和 Part3 CRLH 谐振回路的的天线结构, 由于 CRLH 结构加入, 在低频 0.9 GHz 处产生一个谐振模式, 但阻抗匹配并不好, 同时在高频 1.8 GHz 附近产生一个较窄谐振, 拓宽了高频谐振带宽. 当所有结构同时加载时, 天线在低频产生两个谐振点, 共同覆盖了低频工作频段, 高频由 CRLH 谐振回路的二次谐波产生一个谐振点, 倒 L 型单极子产生一个谐振, 寄生枝节产生第 3 个谐振, 共同构成了 LTE 天线的高频工作段.

图 9 分别对天线各个部分的结构设计参数进行分析, 进一步解释天线的工作原理并给出设计指

图 8 (网络版彩图) 天线各部分 S 参数对比

Figure 8 (Color online) S-parameters of the proposed antenna with different parts

图 9 (网络版彩图) 天线结构参数分析

Figure 9 (Color online) Antenna parameter analysis. (a) Addy; (b) Bottomy; (c) Endy; (d) Lowy; (e) Gap

图 10 (网络版彩图) 加工的天线样件

Figure 10 (Color online) Fabricated antenna prototype

图 11 (网络版彩图) 天线 S_{11} 实测与仿真比较

Figure 11 (Color online) Comparison of measured and simulated reflection coefficient of the proposed antenna

图 12 (网络版彩图) 天线总效率实测与仿真对比

Figure 12 (Color online) Measured and simulated total efficiency of the proposed antenna

导. 对寄生枝节长度 $Addy$ 的分析如图 9(a) 所示, 随着 $Addy$ 从小到大增加, 仅对天线的高频段产生影响, 2.6 GHz 处的谐振点向低频移动, 对低频段的工作模式几乎没有影响.

当倒 L 型单极子长度 $Bottomy$ 变大时, 从图 9(b) 中可以看出高频谐振向低偏移, 在高频段主要工作的部分就是倒 L 型单极子, 同时 $Bottomy$ 的变化也会影响低频 0.76 GHz 的谐振中心. 从图 9(c) 中对短路折叠单极子末端长度 $Endy$ 的分析可以看出, 当末端长度增长, 其工作点 760 MHz 处频率向低偏移, 同时 $Endy$ 的改变也一定程度上影响着低频另外一个 900 MHz 附近的谐振随它的变化而偏移. 图 9(d) 可以清楚看出, CRLH 谐振回路的耦合段长度 $Lowy$ 变化时, 低频 900 MHz 处谐振变化明显, 随着 $Lowy$ 的增长, 左手电感 L_L 增大, 该谐振点向低频偏移, 同时影响高频的二次谐波频点. 图 9(e) 给出了 CRLH 结构中缝隙 Gap 参数变化的曲线, 当 Gap 由大变小, 左手串联电容 C_L 逐渐增大, 900 MHz 处谐振向低频移动, 其零阶谐振特性非常明显. 通过以上参数的分析可以看出, 该天线在各个谐振点上具有相当的独立可调性, 这为天线后期加工测试, 频带拓展设计都提供了便捷的途径.

经过一系列仿真分析, 本文对上述所设计的天线进行实物加工 (图 10), 并测量验证天线的工作性能表现. 实物样机加工时, 采用 3 mm 的空气泡沫支撑短路单极子的顶部结构. 图 11 和 12 分别给出了该天线实测与仿真对比的 S 参数和天线效率, 可以看到实物的 S 参数与仿真一致, 在低频略有一点

图 13 (网络版彩图) 天线实测方向图

Figure 13 (Color online) Measured radiation patterns of the proposed antenna. (a) 0.85 GHz; (b) 2.3 GHz

表 1 不同天线性能对比

Table 1 Comparison between different antenna performance

Different antennas	Operating frequency bands	Size
Printed single-strip monopole [10]	GSM850/900/1800/1900/UMTS	42 mm×15 mm
Low-profile coupled-fed printed PIFA [11]	LTE700/2300/2500, GSM850/900/1900, UMTS 2100	60 mm×15 mm
Planar monopole [12]	LTE700/2300/2500, GSM850/900/1900, UMTS 2100	40 mm×20 mm
The proposed CRLH mobile antenna	LTE747/2300/2500, GSM850/900/1900, UMTS 2100	35 mm×9 mm

向高频偏移, 而辐射效率相对仿真趋势一致, 但在高低频均有所下降, 这可能是由于天线加工过程中产生的介质基板参数误差, 空气泡沫人工加载的误差和馈电方式的选择和放置有关.

图 13 给出天线实测辐射方向图, 分别为 850 和 2300 MHz 处, 增益达到 2.77 和 3.41 dBi. 通过上述结论可以看出, 文中提出的基于复合左右手结构的手机终端天线符合新一代无线通信系统的要求, 实现了小型化、多频带、高性能的目的, 这里将设计天线与文献 [10~12] 中的 3 款天线分别比较如表 1 所示, 可以看出文中设计的天线不仅兼顾了 LTE 工作频段, 同时相对另外 3 款天线其净空尺寸缩小了 50%以上.

4 结论

在当前无线通信系统快速发展的大背景下, 本文聚焦智能手机终端天线在小型化、LTE 多频段等热点和难点问题, 根据零阶谐振超材料的理论基础, 提出了一款覆盖 LTE747/GSM850/900/1800/1900/UMTS/LTE2300/2600 各频段的小型化手机天线. 该天线基于零阶谐振原理, 具有小型化、多频带和高效率的特点. 在保证工作带宽的同时, 通过加载 CRLH 结构, 合理设计其尺寸获得所需的零阶谐振频率, 有效地减小了天线的尺寸. 另通过引入地回路电流, 也可小型化天线的尺寸, 使天线在覆盖低频段的同时保持了较高的辐射效率. 该天线各个枝节加载和调节相对独立, 使其工作的特性也便于调整和优化. 相信这款天线的设计方法能为下一代智能手机终端天线和无线移动通信小型化终端设备的研发提供超材料设计的理论基础和参考.

参考文献

- 1 Gummalla A, Lee C J, Achour M. Compact metamaterial quad-band antenna for mobile application. In: Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, AP-S 2008, San Diego, 2008. 1–4
- 2 Wong K L, Lin Y F. Small broadband rectangular microstrips antenna with chip-resistor loading. *Electron Lett*, 1997, 33: 1593–1594
- 3 Lu J H, Tang C L, Wong K L. Slot-coupled compact broadband circular microstrip antenna with chip-resistor and chip-capacitor loadings. *Microw Opt Technol Lett*, 1998, 18: 345–349
- 4 Zuercher Z, Staub O, Skrivervik K. A compact and efficient antenna for mobile communications. *Microw Opt Technol Lett*, 2000, 27: 155–157
- 5 Tarvas S, Isohatala A. An internal dual-band mobile phone antenna. In: Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Salt Lake City, 2000. 266–269
- 6 Yarman B S, Sengul M, Linberg P, et al. A single matching network design for a double band PIFA antenna via simplified real frequency technique. In: Proceedings of IEEE Microwave Conference, APMC 2006, Asia-Pacific, Yokohama, 2006. 1325–1328
- 7 Hsu W H, Wong K L. Broadband aperture-coupled shorted-patch antenna. *Microw Opt Technol Lett*, 2001, 28: 306–307
- 8 Wong K L, Wu T J, Lin P W. Small-size uniplanar WWAN tablet computer antenna using a parallel-resonant strip for band width enhancement. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2013, 61: 492–496
- 9 Chu F H, Wong K L. Planar printed strip monopole with a closely-coupled parasitic shorted strip for eight-band LTE/GSM/UMTS mobile phone. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2010, 58: 3426–3431
- 10 Wong K L, Chen S C. Printed single-strip monopole using a chip inductor for penta-band WWAN operation in the mobile phone. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2010, 58: 1011–1014
- 11 Ying L, L Y, Ying L, et al. Low-profile coupled-fed printed PIFA for internal seven-band LTE/GSM/UMTS mobile phone antenna. In: Proceedings of Cross Strait Quad-regional Radio Science and Wireless Technology Conference, Harbin, 2011. 418–421
- 12 Lee C T, Wong K L. Planar monopole with a coupling feed and an inductive shorting strip for LTE/GSM/UMTS operation in the mobile phone. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2010, 58: 2479–2483
- 13 Smith D R, Padilla W J, Wier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 4184–4187
- 14 Engheta N, Ziolkowski R W. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. New York: Wiley, 2006
- 15 Caloz C, Itoh T. *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*. New York: John Wiley & Sons, 2005
- 16 Lai A, Itoh T, Caloz C. Composite right/left-handed transmission line metamaterials. *IEEE Microwave Mag*, 2004, 5: 34–50
- 17 Schussler M, Freese J, Jakoby R. Design of compact planar antennas using LH-transmission lines. *IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig*, 2004, 1: 209–212
- 18 Lee C J, Leong K M K H, Itoh T. Compact dual-band antenna using an anisotropic metamaterial. In: Proceedings of IEEE Microwave Conference, 36th European, Manchester, 2006. 1044–1047
- 19 Sanada A, Kimura M, Awai I, et al. A planar zeroth-order resonator antenna using a left-handed transmission line. *Proc Eur Microw Conf*, 2004, 3: 1341–1344
- 20 Lee C J, Leong K M K H, Itoh T. Composite right/left handed transmission line based compact resonant antennas for RF module integration. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2006, 54: 2283–2291
- 21 Sanada A, Caloz C, Itoh T. Novel zeroth-order resonance in composite right/left-handed transmission line resonators. In: Proceedings of IEEE Microwave Conference, Asia-Pacific, Seoul, 2003. 1588–1592
- 22 Li L, Jia Z, Huo F F, et al. A novel compact multiband antenna employing dual-band CRLH-TL for smart mobile phone application. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2013, 12: 1688–1691
- 23 Li L, Huo F F, Jia Z, et al. Dual zeroth-order resonance antennas with low mutual coupling for MIMO communications. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2013, 12: 1692–1695
- 24 Lopez N, Lee C J, Gummalla A, et al. Compact metamaterial antenna array for long term evolution (LTE) handset application. In: Proceedings of IEEE Antenna Technology, 2009. iWAT 2009. IEEE International Workshop on, Santa

Monica, 2009. 1–4

LTE smartphone antenna design based on zeroth-order resonant metamaterials

LI Long^{1,2*} & JIA Zhen^{1,2}

¹ School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

² National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China

*E-mail: lilong@mail.xidian.edu.cn

Abstract With the rapid development of next-generation wireless communication systems, a novel smart mobile phone antenna covering Long-Term Evolution (LTE) bands is proposed based on the theory of composite right- and left-handed (CRLH) transmission lines, which can be used to design a miniaturized and multi-band antenna. In this paper, the theory of zeroth-order resonance (ZOR) is particularly recommended for antenna design to produce the equivalent left-handed capacitor and left-handed inductor. In the meantime, the ground current is also used to achieve miniaturization. The proposed ZOR metamaterial antenna can cover LTE747/GSM850/900 and DCS1800/ PCS1900/UTMS/LTE2300/2600; further, it provides the performance benefits of an effective radiation pattern, as well as high gain and high efficiency, which can meet the requirements of a LTE smart mobile phone. The performance impact of the proposed antenna's operating characteristics is also analyzed. The measured results of the fabricated antenna are in good agreement with the simulated antenna. They confirm that the fabricated ZOR metamaterial antenna offers the advantages of miniaturization and good performance.

Keywords metamaterial antenna, composite right- and left-handed (CRLH) transmission line, zeroth-order resonance, miniaturization, multi-band, Long-Term Evolution (LTE)

LI Long was born in 1977. He received his B.E. and Ph.D. degrees in electromagnetic fields and microwave technology from Xidian University, Xi'an, in 1998 and 2005, respectively. He is currently a Professor in the School of Electronic Engineering, Xidian University. His research interests include metamaterials, computational electromagnetics, electromagnetic compatibility, novel antenna designs, and wireless power transfer technology. He received

the Program for New Century Excellent Talents in University of the Ministry of Education of China in 2010. Prof. Li is a senior member of IEEE and CIE.

JIA Zhen was born in 1990. She received her B.E. and M.S degrees in electromagnetic fields and microwave technology from Xidian University, Xi'an, in 2015. Her research interests include metamaterials, novel antenna designs, small (2G/3G/4G) mobile devices, and MIMO antenna systems.