

文章编号: 2095-4980(2021)06-1037-04

基于 CRLH 的小型化三频 LTE 微带天线设计

杨 波^{1,2}, 孟庆东²

(1.吉林大学 电子与科学学院, 吉林 长春 130000; 2.长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130000)

摘要: 研究了一种基于复合左右手传输线理论(CRLH)的小型化三频长期演进(LTE)微带天线, 利用 CRLH 的零阶谐振特性, 实现微带天线的小型化, 仿真结果显示微带天线的 3 个工作频段分别为 1 840~1 860 MHz, 2 130~2 160 MHz, 2 620~2 660 MHz。准确覆盖频分双工(FDD) LTE 规划的 Band3, Band4 和 Band7, 整个天线的电尺寸仅为 0.17λ 。最后通过对微带天线进行加工实测, 验证了仿真的准确性和有效性。多频小型化天线不仅可以大幅节约基站的天馈资源, 而且可以有效降低基站建设的成本, 该方案具有很强的工程实用价值。

关键词: 复合左右手传输线; 微带天线; 小型化; 三频

中图分类号: TN822

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020108

Miniaturized tri-band LTE microstrip antenna based on CRLH

YANG Bo^{1,2}, MENG Qingdong²

(1.School of Electronics and Science, Jilin University, Changchun Jilin 130000, China;

2.School of Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Jilin Changchun 130000, China)

Abstract: A miniaturized tri-band Long Term Evolution(LTE) microstrip antenna based on the Composite Right/Left-Handed Transmission Line(CRLH) theory is studied. The microstrip antenna is miniaturized by using the zero-order resonance characteristic of CRLH. The simulation results show that the three operating frequency bands of the microstrip antenna are: 1 840–1 860 MHz, 2 130–2 160 MHz, 2 620–2 660 MHz. The Band3, Band4, and Band7 of the Frequency Division Duplexing(FDD) LTE plan are accurately covered. The electrical length is 0.17λ . Finally, the microstrip antenna is processed and measured to verify the accuracy and effectiveness of the simulation. The multi-frequency miniaturized antenna can not only save the antenna feed resources of the base station greatly, but also cut the cost of base station construction effectively.

Keywords: Composite Right/Left-Handed Transmission Line(CRLH); microstrip antenna; miniaturized; tri-band

随着移动通信网络技术的进步, 频段资源变得越来越紧缺, 如何令单一天线能够兼容不同频段的需求成为研究的热点, 同时随着终端设备体积日益减小, 天线小型化的要求也逐渐成为设备核心指标。复合左右手传输线(CRLH TL)是一种周期结构, 其可以在特定频段呈现出等效介电常数和等效磁导率皆为负数的左手特性。2002 年, 加拿大多伦多大学的科研团队与美国加州大学洛杉矶分校的科研团队相继研究发现了 CRLH TL 结构。在对 CRLH 传输线分析过程中, 除了开口谐振环结构以外, 还有诸如交指结构、弯折线电感和缝隙电容等手段均可以实现器件的左手特性, 其中弯折线电感和缝隙电容结构最先由 T Jang 提出, 这种结构除了具有物理尺寸小及结构简单的优点以外, 最大的特点就是易于调节优化。对于 CRLH 微带天线, 其传播常数的取值可以是正数、负数或者是零, 因此 CRLH 微带天线可以进行零模传输, 再利用 Bloch-Floquet 定理分析, 得出这种微带天线的中心频率只与施加在天线上的电容和电感有关, 与天线物理尺寸无关, 所以课题中研究出的微带天线可以实现小型化^[1-7]。文献[8]基于互补开环谐振器(Complementary Split Ring Resonators, CSRR)结构设计了一种三频小型化天线, 其电尺寸为 0.28λ , 但其低频工作带宽较窄, 难以满足运营商频段规划要求; 文献[9]则提出了一种交趾型结构的双频小型化天线, 电尺寸可以缩小至 0.24λ , 但其增益仅为 -3 dBi, 实际应用中难以满足

收稿日期: 2020-03-15; 修回日期: 2020-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905047)

覆盖要求；文献[10]设计双单元 Jang 结构的双频微带天线，电尺寸可以做到 0.22λ ，但其并未提供物理尺寸与辐射性能之间的调谐关系，很难推广到其他场景。基于以上文献基础，本文基于渐进式 Jang 理论并采用无过孔非对称式共面波导结构，设计出一款三频 LTE 微带天线，并提供物理尺寸与天线辐射性能之间的调谐关系，不仅进一步缩小了天线的电尺寸，而且该设计可以应用到其他频段小型化天线设计中。

1 单元设计

本文设计的 CRLH 基于 Jang 理论得来，最早由 T Jang 提出，用一段四分之一波长的谐振器来实现小型化双工器和多工器。通过调谐谐振枝节的长度来呈现平衡状态下的左手特性。正是基于以上原理，本文提出一种新型单元模型示意图 1，该新型 CRLH 单元结构由辐射贴片、蛇形弯折线和共面波导(Coplanar Waveguide, CPW)接地面构成，其终端选择短接线进行接地短路。新型 CRLH 单元结构附着在宽为 1 mm 的特氟龙介质基板表面，基板的相对介电常数为 4.4，损耗角正切为 0.015；系统中的左手电感 L_L 由贴片与共面波导接地面中间的剖断线完成；左手电容 C_L 利用 2 个贴片中间的缝隙完成；因为电流顺着金属表面移动，所以此时贴片有右手电感 L_R ；因为结构中存在电压变化，所以贴片与共面波导接地面中间的耦合会有右手电容 C_R ，另外剖断线自身的间隙也有 C_R 产生，这样组合出的 CRLH 传输线结构，其能量消耗较小，支持多频段左手性能等特征。进一步对新型 CRLH 单元结构进行研究，设计了图 2 中的新型 CRLH 单元结构等效电路图。

在文献[10]里提供了该单元结构的电抗参数的计算式：

$$L_L, L_R = 2 \times 10^{-4} l \left[\ln \left(\frac{l}{w+t} \right) + 1.193 + \frac{w+t}{3l} \right] K_g, K_g = 0.57 - 0.145 \ln \frac{w}{h} \quad (1)$$

$$C_L, C_R = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{h}$$

式中： L_L 和 L_R 分别为左手电感和右手电感； C_L 和 C_R 分别为左手电容和右手电容； l 为微带线长度； w 为微带线宽度； t 为金属厚度； h 为介质基板厚度； S 为耦合缝隙的面积。根据单元结构的参数尺寸可以计算出相应的左右手电抗参数，进而确定传输模式和工作频段。

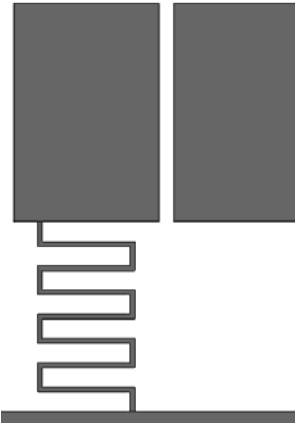


Fig.1 Diagram of unit cell
图 1 单元模型结构示意图

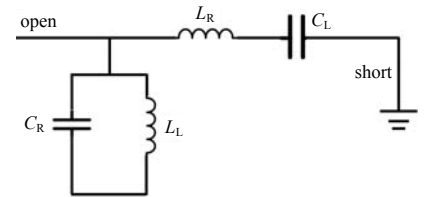


Fig.2 Equivalent circuit of cell structure
图 2 单元结构等效电路

2 基于 CRLH 的小型化三频 LTE 微带天线设计

基于上述单元结构理论，可以设计出工作在 1.84 GHz, 2.14 GHz, 2.65 GHz 频点的三频天线，图 3 是新型复合左右手传输线的三频天线结构示意图，这种天线包括了 3 个尺寸不相等的剖断线单元结构，共面波导传输线以及耦合缝隙组成馈电网络，天线由带缝隙的贴片、临界接地面以及短截线形成一环状系统。天线具有 $n=-1, -3, -5$ 三个负的谐振模式。

新型复合左右手传输线的三频天线的性能参数见表 1。根据物理尺寸可计算出 2 个单元结构的电抗参数，电抗参数见表 2。根据表 2 中的参数能够绘制出图 4 中的等效电路图。

从图 4 中等效电路不难计算出天线 3 个谐振模 $f_1=1.842$ GHz, $f_2=2.14$ GHz, $f_3=2.65$ GHz，为了验证设计的准确性，选择合适的仿真软件进行系统仿真，仿真得到图 5 的三频天线 S_{11} 仿真结果。从图 5 中可以发现，三频天线谐振频率包括 1.855 GHz, 2.136 GHz 及 2.645 GHz，与理论计算值非常

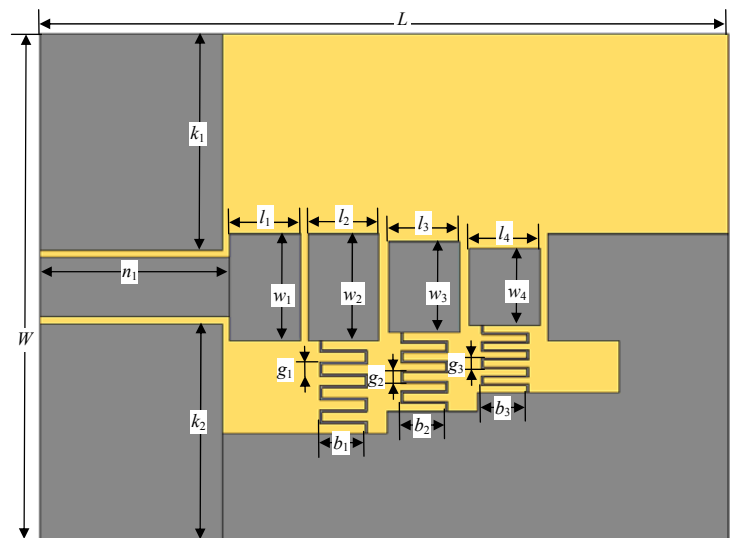


Fig.3 Diagram of antenna model structure
图 3 天线模型结构示意图

接近，这也从侧面验证了设计的准确性。根据参数的结构尺寸与电抗参数之间的关系，还可以定性分析出结构参数尺寸的变化对谐振频率的影响，天线 3 个谐振频点分别由 3 个单元结构决定，各单元之间的耦合值很低，各谐振频率与剖断线长 l 、剖断数 u 、间隙宽 g 成正比关系；与剖断线宽 w 和间隙长 L 成反比关系。上述特点使得该三频天线具有谐振频点易于调节的优点，设计者可以根据自身需要，只需要调节单元各个元件的物理尺寸，就能调整谐振频段。

表 1 三频天线几何参数表(单位: mm)

Table1 Geometric parameters of tri-band antenna(unit:mm)

W	L	k_1	k_2	n_1	l_1	l_2	l_3	l_4	w_1	w_2	w_3	w_4	g_1	g_2	g_3	b_1	b_2	b_3
28.00	28.00	8.70	8.60	7.60	3.00	3.00	3.00	3.00	4.25	4.25	3.83	3.24	0.60	0.53	0.41	1.90	1.90	1.90

表 2 三频天线电抗参数表

Table2 Reactance parameters of tri-frequency antenna

L_{L1}/nH	L_{R1}/nH	C_{C1}/pF	C_{R1}/pF	L_{L2}/nH	L_{R2}/nH	C_{C2}/pF	C_{R2}/pF	L_{L3}/nH	L_{R3}/nH	C_{C3}/pF	C_{R3}/pF
2.78	1.25	0.37	1.25	2.24	1.00	0.46	1.56	1.78	0.79	0.58	1.95

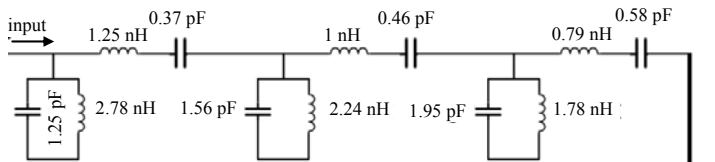


Fig.4 Equivalent circuit for tri-band antenna
图 4 三频天线的等效电路图

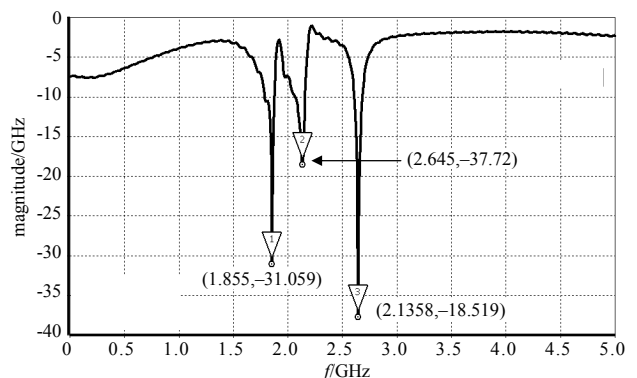


Fig.5 S parameters for tri-band antenna
图 5 三频天线 S 参数仿真结果

3 三频微带天线实测

为进一步证明仿真数据准确性，对三频天线进行了加工，图 6 为天线的实物图。天线通过 50 Ω 的同轴馈电组成，由于天线使用了不对称的 CPW 结构，所以不需要额外设计巴伦进行平衡馈电。为了验证仿真的可行性，利用矢量网络分析仪和微波暗室分别对天线的 S 参数和增益进行实测，图 7、图 8 和图 9 中分别展示了仿真与实测的对比。

图 9 为 2.132 GHz 处天线 E 面辐射方向图的仿真和实测对比结果。从测试结果看，天线 3 个谐振频率分别为 1.845 GHz, 2.132 GHz 和 2.645 GHz，与仿真结果一致性良好，这其中的差别可能是由于加工精确度以及一致性导致的，在工作带宽方面，测试结果相较仿真有一定程度的展宽，这可能是由于聚四氟乙烯材料的损耗角正切较理论值偏高，使得三频天线的阻抗特性值减小，进而可以提高天线的带宽。最后将本文设计的天线与参考文献[8-10]中所述天线进行对比，可得到表 3。从表中结构不难发现，本文设计的三频天线其电尺寸最小，天线增益也能满足工程使用要求，同时还具有易于调谐的优点，综合而言，四款多频天线中本文所设计的天线性能最优。

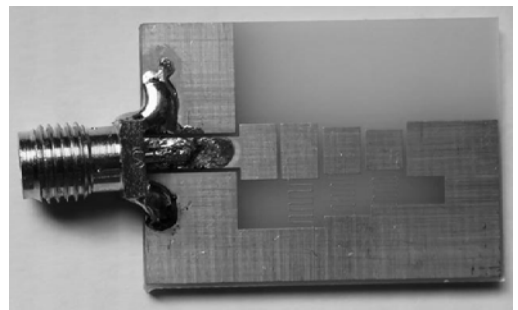


Fig.6 Picture of tri-band antenna
图 6 三频天线实物图

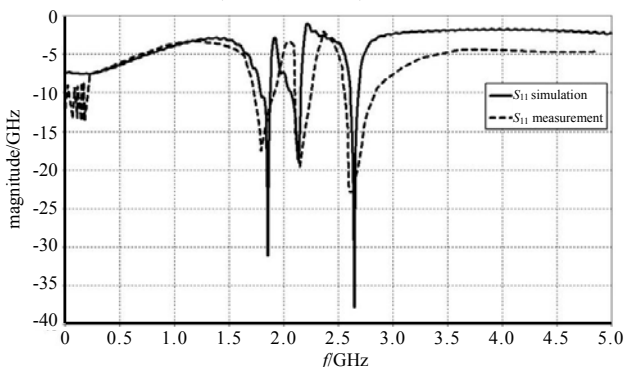


Fig.7 Measurement for tri-band antenna
图 7 三频天线 S 参数测试结果

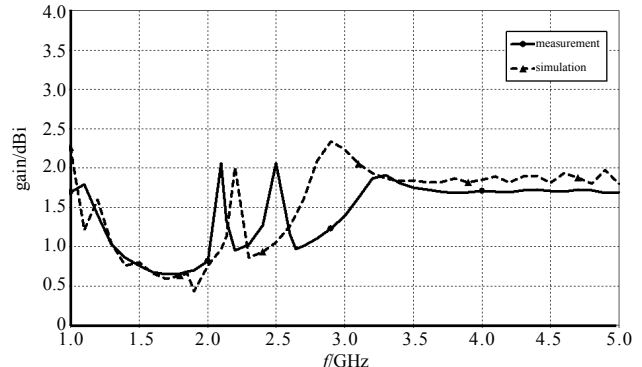


Fig.8 Measurement for tri-band antenna
图 8 三频天线增益测试结果

表 3 三频天线性能对比参数表
Table3 Comparison of tri-band antenna

parameter	paper [8]	paper [9]	paper [10]	this paper
upper limit of working frequency band	3.5 GHz	2.1 GHz	2.6 GHz	2.6 GHz
electrical length	0.28λ	0.24λ	0.22λ	0.17λ
gain	2.5 dBi	1.8 dBi	-3 dBi	2 dBi

4 结论

本文以 Jang 结构作为理论基础, 基于复合左右手传输线理论, 设计出小型化三频 LTE 微带贴片天线, 并且经过仿真实测对比, 验证了设计的准确性, 该设计可以广泛推广到 5G 及其他领域。

参考文献:

- [1] 唐灿,郑宏兴,王铭,等. 一种应用于 5G 的紧凑型阵列天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(6):1015-1019. (TANG Can,ZHENG Hongxing,WANG Lu,et al. Design of a compact array antenna for 5G[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(6):1015-1019.)
- [2] KALYANBRATA Ghosh,SUSHRUT Das. A triple-band dual-polarized CRLH antenna for wireless applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020,62(4):3961-3965.
- [3] HU Wei,QIAN Long,WEN Lehu,et al. Compact dual-band antenna based on CRLH-TL for WWAN/LTE terminal applications[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019,29(4):2702-2712.
- [4] LI Tianpeng,LEI Xue,DONG Huixu,et al. Novel two-dimensional CRLH TL and its application on tri-band omnidirectional antenna[J]. Frequenz, 2018,72(7-8):359-363.
- [5] ALIBAKHSHIKENARI Mohammad,VIRDEE Bal S,ABDUL Ali,et al. Extended aperture miniature antenna based on CRLH metamaterials for wireless communication systems operating over UHF to C-band[J]. Radio Science, 2018,53(2): 154-165.
- [6] NANDI Sourav,MOHAN Akhilesh. CRLH unit cell loaded quad-band monopole antenna[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016,58(3):653-658.
- [7] WANG Chuan'an,HU Bo. Leaky-wave antenna with high gain and wide beam-scanning angle range based on novel SIW-CRLH transmission line[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2016,26(1):36-41.
- [8] 于凯. 基于超材料的新型微带天线设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017. (YU Kai. Design and research of novel microstrip antenna based on metamaterials[D]. Harbin,China:Harbin Engineering University, 2017.)
- [9] 董亚文. 超材料天线的研究与设计[D]. 北京:北京邮电大学, 2017. (DONG Yawen. Research and design of antenna based on metamaterial[D]. Beijing,China:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.)
- [10] 刘双喜. 新型复合左右手传输线及其在天线中的应用[D]. 成都:西南交通大学, 2012. (LIU Shuangxi. A novel composite right/left handed transmission line and its application to antennas[D]. Chengdu,China:Southwest Jiaotong University, 2012.)

作者简介:

杨波(1969-),女,长春市人,在读博士研究生,讲师,主要研究方向为微带天线和 EBG 结构.
email:83210495@qq.com.

孟庆东(1971-),男,长春市人,博士,副教授,主要研究方向为微带天线。

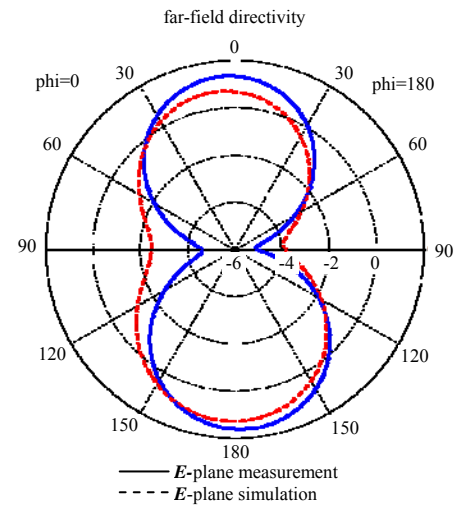


Fig.9 *E*-plane pattern for tri-band antenna
图 9 三频天线 *E* 面方向图测试结果