

一种同轴共线多频段高增益 5G 全向天线设计

魏诚实¹ 袁家德¹
WEI Chengshi YUAN Jiade

摘要

为应对 5G 移动通信系统对多频段、高增益全向天线的迫切需求,针对传统全向天线在覆盖 Sub-6 GHz 多频段时存在的带宽受限、增益不足及辐射不圆度较高等问题,文章设计了一种同轴共线多频段高增益 5G 全向天线。该天线由印制在 FR4 介质基板上的两副交叉正交放置的同轴共线偶极子阵列组成,每副同轴共线偶极子阵列由两个偶极子天线单元组成。偶极子天线单元的两端带有 "T" 形结构,通过短路探针将介质基板上下层的偶极子臂与 "T" 形结构短路相连,使得天线阵列交错排列,形成同轴共线的结构。天线总尺寸为 250 mm×38.2 mm×38.2 mm,实测结果表明: $|S_{11}| \leq -10$ dB 的阻抗带宽分别为 2.43~2.68 GHz、3.36~3.61 GHz、4.13~4.43 GHz 和 4.80~5.10 GHz,覆盖了常用 Sub-6 GHz 下 5G 通信频段。天线峰值增益大于 7 dBi;各频段天线不圆度均低于 2.5 dB。该天线具有多频段、高增益、全向性好等优点,适合应用于 5G 移动通信场景中。

关键词

同轴共线;全向天线;高增益;偶极子天线;多频段

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.025

0 引言

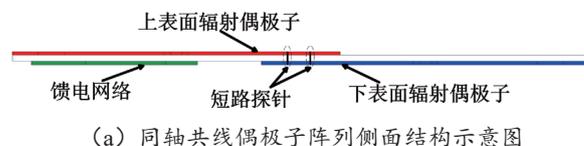
随着智能家居、智慧医疗、智能交通、智慧城市等领域进入快速增长阶段,作为物联网的基础技术支持,5G 通信系统具有较高的传输速率和较低的延时^[1-3],而天线则是 5G 通信系统的重要部件。

目前,诸多研究者对 5G 通信系统天线开展了研究与优化,文献[4-6]提出基于对称振子的 5G 双极化基站天线,通过振子间产生强耦合从而拓展带宽;文献[7-9]采用不同天线子阵和天线结构串联馈电,实现全向天线的 5G 多频段覆盖;文献[10-11]利用多个单极子实现 MIMO 天线的 5G 频段全覆盖;文献[12]提出一种通过同相激励电偶极子天线和磁偶极子天线的新型互补天线,在 5G 标准频段中实现较宽的阻抗带宽和稳定的增益。上述天线的性能良好,但不能在 Sub-6 GHz 下 5G 通信全频段中同时实现高增益和全向辐射性。

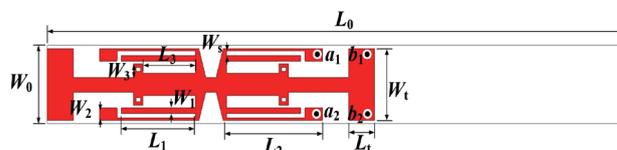
本文提出一种运用于 5G 通信频段的高增益全向天线。在平面偶极子天线阵列中引入垂直交叉放置的偶极子天线阵列,实现偶极子天线在空间上交替排列,形成三维偶极子结构;所提出的天线具有较高的增益,并且有良好的水平辐射特性,实现在 Sub-6 GHz 下覆盖 5G 通信频段。

1 天线结构

天线结构如图 1 所示。偶极子天线单元分别印制在厚度 1 mm 的 FR-4 介质基板上下两面,基板的相对介电常数为 4.4、正切损耗为 0.02,如图 1(a)所示。介质基板上表面和下表面所印制天线结构如图 1(b)和(c)所示,其中馈电网络印制于介质基板下表面,对上表面的偶极子天线进行耦合馈电;下表面的偶极子天线单元,通过 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 四个短路探针与上表面偶极子天线单元相连,形成同轴共线的天线阵列结构。最终的天线由两副阵列天线构成,图(d)给出了阵列 1 和阵列 2 天线的组阵过程,首先把阵列 1 和阵列 2 分别分成①、②、③、④部分,然后分别将①和②、③和④垂直放置,最后形成图(d)右侧图的最终天线结构图,其中馈电网络连接馈电同轴线外导体,同轴线内导体接天线辐射臂,如图 1 所示。



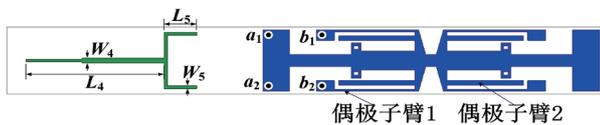
(a) 同轴共线偶极子阵列侧面结构示意图



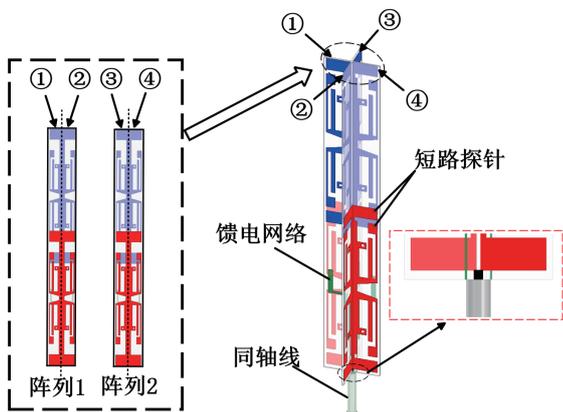
(b) 同轴共线偶极子阵列正面结构示意图

1. 福州大学物理与信息工程学院 福建福州 350116

[基金项目] 福建省高校产学研合作项目(2023H6004)



(c) 同轴共线偶极子阵列背面结构示意图



(d) 三维天线结构示意图

图1 天线结构图

采用电磁仿真软件 ANSYS HFSS 18 对天线进行优化, 天线主要结构尺寸如表 1 所示。

表 1 天线结构尺寸

单位: mm

参数	尺寸	参数	尺寸	参数	尺寸
W_1	2.5	L_1	18.6	W_0	38.2
W_2	6.0	L_2	22.5	L_0	250.0
W_3	6.5	L_3	16.0	W_t	37.0
W_4	4.0	L_4	41.5	L_t	9.0
W_5	3.1	L_5	8.6	W_s	2.5

2 天线设计分析

图 2 (a) ~ (e) 给出了本文天线设计演化过程图。图 3 给出了图 2 演化过程中各偶极子天线的反射系数 $|S_{11}|$ 曲线。图 2 (a) 天线 I 是一款传统的共地偶极子天线结构, 从图 3 中可以看出, 天线 I 仅谐振在 3.5 GHz 附近, 且 $|S_{11}| \leq -10$ dB 的带宽较窄。图 2 (b) 天线 II 是在天线 I 的基础上通过蚀刻“L”形长槽, 将原有的偶极子臂分割成两条偶极子臂; 从图 3 可以看出, 相比于天线 I, 天线 II 增加了新的 4.2 GHz 谐振点, 有效拓展了带宽; 同时, 通过在偶极子臂内侧新加载一对偶极子, 激发出 5.0 GHz 谐振频段。图 2 (c) 天线 III 在天线上下两端引入“T”形结构, 实现天线单元结构上下更好的对称, 易于产生全向辐射; 从图 3 可以看出, 天线在 5.0 GHz 谐振点附近的带宽变宽, 表明“T”形结构也可以改善天线的阻抗匹配特性。

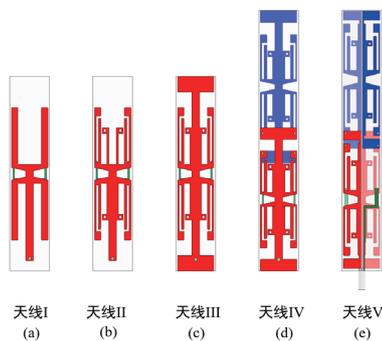


图 2 天线 I-V 设计流程

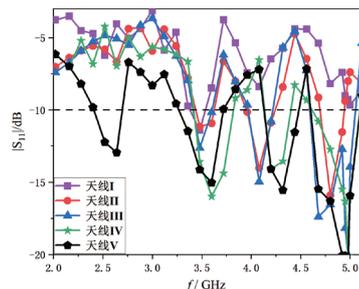


图 3 天线 I-V 反射系数图

在天线 III 基础上, 增加一个偶极子天线单元, 在介质基板上两面交错排列, 两个偶极子单元通过四个短路探针相连, 形成同轴共线的两单元偶极子天线阵列, 如图 2 (d) 天线 IV 所示。通过串联馈电方式, 调整正反面上单元间的间距, 使得上下层交错连接的偶极子臂之间的相位转换调整至 180° , 从而实现偶极子臂之间电流同相。

图 2 (e) 中的天线 V 是将两副同轴共线偶极子阵列天线 IV 在空间中交叉正交组合, 构成了最终状态的三维全向偶极子天线 V; 从图 3 中可以看出, 从天线 IV 变化到天线 V, $|S_{11}|$ 带宽明显变宽, 且增加了一个新的 2.6 GHz 谐振频段。从图 4 (a) 可以看出, 在中心频点 2.6 GHz 时, 天线 IV 共地部分的电流方向相反, 该部分没有形成有效的辐射。而在天线 V 三维立体结构中多偶极子阵元共同耦合作用下, 在 2.6 GHz 时, 共地部分的电流方向相同, 形成了有效的辐射, 如图 4 (b) 所示。

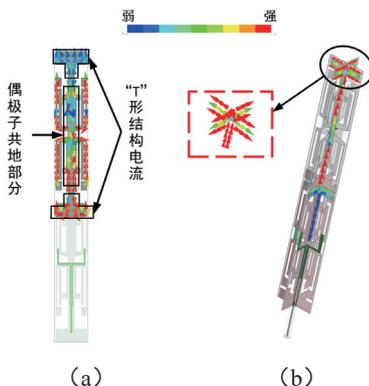


图 4 天线 IV 和天线 V 在 2.6 GHz 电流分布

3 天线参数分析

图 5 给出了“T”形结构长度 L_t 的变化对天线 $|S_{11}|$ 性能的影响。从图中可以看出,随着“T”形结构长度 L_t 从 8.0 mm 到 9.0 mm,再增加到 10.0 mm,天线的带宽先变好后变差。本文选择 $L_t=9.0$ mm,此时天线获得最大带宽和较好的阻抗匹配。

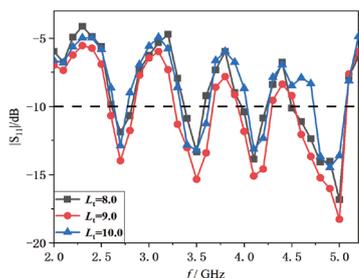


图 5 参数 L_t 对天线 $|S_{11}|$ 的影响

图 6 给出了偶极子臂上蚀刻“L”形长槽的宽度 W_s 对天线 $|S_{11}|$ 性能的影响。从图中可以看出,随着 W_s 的增加,主要影响着 3.5 GHz 和 4.2 GHz 附近的谐振频率,宽度 W_s 增加使 $|S_{11}|$ 带宽向低频偏移。经过优化,取 $W_s=2.5$ mm 作为最优值。

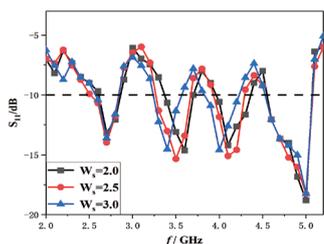


图 6 参数 W_s 对天线性能影响

4 天线测量结果

根据表 1 中仿真优化的尺寸参数,加工制作了天线实物,如图 7 所示。

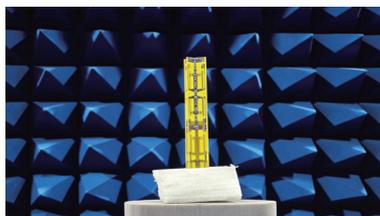


图 7 天线实物图

采用矢量网络分析仪测试了天线 $|S_{11}|$ 性能,并与 HFSS 仿真结果进行了对比,如图 8 所示。从图中可以看出,实测 $|S_{11}| \leq -10$ dB 的带宽范围为 2.43~2.68 GHz、3.36~3.61 GHz、4.13~4.43 GHz 和 4.80~5.10 GHz,覆盖了 Sub-6 GHz 下 5G 通信频段。仿真与实测结果较好吻合,其差异主要来源于仿真、加工等误差。

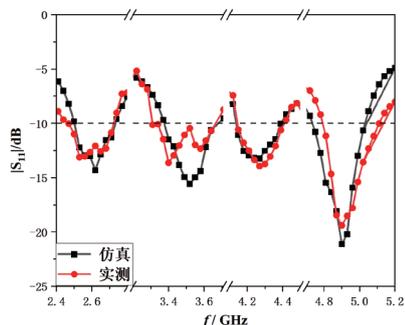


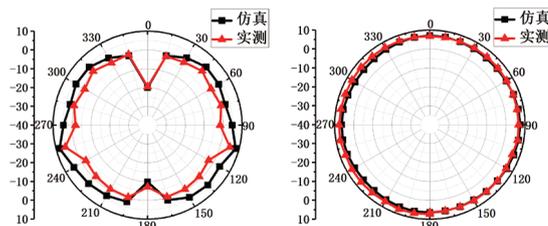
图 8 天线仿真和实测 $|S_{11}|$ 曲线图

在 MVG-SG24 微波暗室测试了天线的增益辐射方向图,图 9 给出了测试场景。

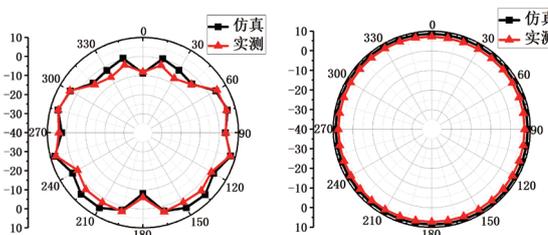


图 9 天线测试环境

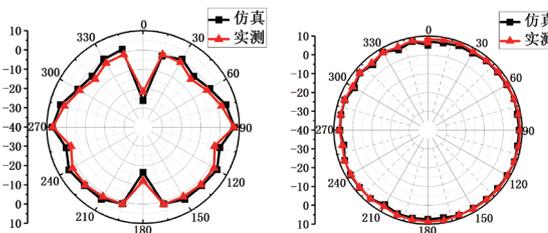
图 10 展示了天线在 2.6、3.5、4.2 和 4.9 GHz 频率点的仿真与实测 E 面和 H 面辐射方向图。观察图 10 可以发现,天线 E 面和 H 面的实测与仿真结果吻合较好。



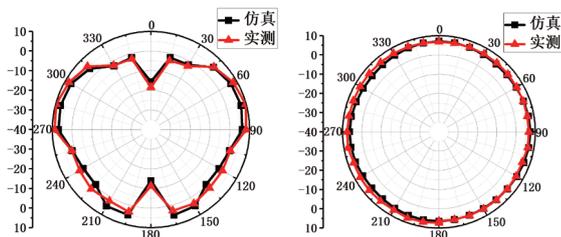
(a) $f=2.6$ GHz E 面和 H 面



(b) $f=3.5$ GHz E 面和 H 面



(c) $f=4.2$ GHz E 面和 H 面



(d) $f=4.9$ GHz E 面和 H 面

图 10 不同工作频率天线仿真和实测方向图

5 结论

本文提出了一种可应用于 5G 通信的多频段高增益全向天线。通过两副交叉正交放置的偶极子阵列天线，形成了一种同轴共线的三维偶极子天线结构，在尺寸 $250\text{ mm} \times 38.2\text{ mm} \times 38.2\text{ mm}$ 情况下，实现在 Sub-6 GHz 下覆盖 5G 通信频段，各频段天线峰值增益均高于 7 dBi，不圆度均低于 2.5 dB。该天线印制于 FR4 介质基板，具有制造成本低、多频段、高增益、全向性好等优点，在多种场景中具有较高的应用价值。

参考文献:

[1] 张章. 面向 5G 应用的高性能全向覆盖天线研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2022.

[2] 方紫薇. 高性能全向天线的研究与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

[3] 陈唐. 面向新一代无线移动通信系统中的基站天线研究与设计 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.

[4] ZHU Y Y, WANG J P, CHEN J X, et al. A compact wideband dual-polarized antenna using monolithic dielectric for 5G base station application[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2022, 21(9):1717-1721.

[5] SHISHKIN M S. Wideband high-gain dual-polarized antenna for 5G communications[C//OL]// 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). Piscataway: IEEE, 2021[2024-05-11]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9647464>. DOI:10.1109/APEIE52976.2021.9647464.

[6] LIN Y C, WONG S W, HE Y J, et al. Parasitic elements loaded coplanar dual-band dual-polarized 2/3/4/5G base station antenna[C//2022 IEEE 12th International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Piscataway: IEEE, 2022: 121-123.

[7] HU Q Y. Suitable for 2.45 GHz and 5G compact dipole rotating antenna[C//2021 16th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). Piscataway: IEEE, 2021:200-205.

[8] LU J H, YOU S W, CHIN H M. Planar dual-band dipole array for LTE/WiMAX access points international symposium on antennas and propagation conference proceedings[C//2014 International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings. Piscataway: IEEE, 2014:329-330.

[9] LIU S, LIU Y, JIA Y T, et al. Omni-directional high gain dipole array antenna for WLAN application[C// 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Piscataway: IEEE, 2019:1-3.

[10] LUO X, HE Y J, LI W T, et al. A multi-band high-isolation MIMO antenna for 5G mobile phone[C//OL]// 2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Piscataway: IEEE, 2023[2024-06-11]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10276462>. DOI: 10.1109/ICMMT58241.2023.10276462.

[11] REN Z Y, WU S J, ZHAO A P. Triple band MIMO antenna system for 5G mobile terminals[C//2019 International Workshop on Antenna Technology (IWAT). Piscataway: IEEE, 2019: 163-165.

[12] ZENG J T, LUK K M. Single-layered broadband magnetolectric dipole antenna for new 5G application[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2019, 18(5):911-915.

【作者简介】

魏诚实(2000—),男,福建莆田人,硕士研究生,研究方向:通信天线设计。

袁家德(1974—),男,江苏灌云人,博士,教授,研究方向:通信天线、射频识别等。

(收稿日期: 2024-12-11)