

DOI: 10.11991/yykj.201911008

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20200724.1637.006.html>

一种 2.45 GHz 谐波抑制有源集成天线设计

刘露, 刘长军

四川大学电子信息学院, 四川成都 610064

摘要:针对现代无线通信系统日趋高性能的需求,设计了一种工作频率为 2.45 GHz 的有源集成发射天线。该有源集成发射天线将功率放大器与一个无源方形微带贴片天线直接集成在一体,省去了传统的 $50\ \Omega$ 连接线;功率放大器利用小信号 S 参数进行设计,实现了最大输出功率 30.1 dBm;方形辐射贴片对角线处开槽的结构设计,使天线的输入阻抗在谐波频率上近似为纯虚部阻抗;4.9 GHz 频率处 $|S_{11}| > -1.9\ \text{dB}$,达到了抑制天线二次谐波辐射的效果。通过测试分析,证明了该有源天线在无线通信发射系统中的可行性和优越性。

关键词:有源网络;功率放大器;贴片天线;S 参数;小型化;宽带;谐波抑制;电磁兼容;阻抗匹配

中图分类号:TN827.1

文献标志码:A

文章编号:1009-671X(2020)04-0037-05

A 2.45 GHz harmonic suppression active integrated antenna

LIU Lu, LIU Changjun

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: An active integrated transmitting antenna at 2.45 GHz is designed to meet the increasingly high-performance requirements of modern wireless communication systems. The proposed active integrated antenna (AIA) is the direct integration of a power amplifier and a square microstrip patch antenna without a conventional $50\ \Omega$ connecting line. The power amplifier is designed by using small signal S-parameters so as to realize its maximum output power of 30.1 dBm. Slotted structural design at the square radiating patch diagonals makes the antenna's input impedance approximate to pure imaginary impedance at the second harmonic frequency. At the second harmonic frequency of 4.9 GHz, $|S_{11}|$ is greater than $-1.9\ \text{dB}$, indicating that the second harmonic radiation is suppressed successfully. Measurement and analysis prove the feasibility and superiority of this active antenna in wireless communication transmission systems.

Keywords: active network; power amplifier; patch antenna; S-parameters; miniaturization; broadband; harmonic suppression; EMC; impedance matching

近年来,有源天线已经成为了人们越来越感兴趣的领域。在 5G 通信系统发展的驱动下,天线有源化、小型化和一体化趋势越加明显^[1-3]。有源集成天线(active integrated antenna, AIA)是一种能与有源非线性射频器件(如功率放大器、低噪声放大器或振荡器等)集成在一起的天线^[2]。天线同时作为辐射器和放大器的匹配负载,在保证系统性能的前提下,大幅度减小了系统尺寸^[3-4]。天线加入有源网络可有效地拓展阻抗带宽,改善稳定性^[5-7],有源电路部分提供了功率增益,从而

提高了天线的等效增益^[8-9];文献[10-14]中的天线采用谐波抑制结构设计,不仅提高了系统的电磁兼容性,还提高了功放的功率附加效率(power added efficiency, PAE),减小了系统总功耗。这些设计对谐波有较好的抑制效果,但结构相对复杂、不易加工。

本文提出一种简洁的谐波抑制天线结构,有源天线整体结构紧凑,并且实现了良好的谐波抑制效果。功率放大电路基于小信号 S 参数进行了匹配网络设计。实验测量了该有源天线输入端口驻波比和辐射方向图,验证了其优良的特性。

1 功率放大器设计

功率放大器是无线发射系统中的关键部分,它的功率输出能力和稳定性会影响到整个系统的

收稿日期:2019-11-07. 网络出版日期:2020-07-24.

基金项目:国家自然科学基金项目(61931009).

作者简介:刘露,女,硕士研究生;
刘长军,男,教授,博士生导师.

通信作者:刘长军, E-mail: cjlju@scu.edu.cn.

传输性能。因此,有必要先对功放电路进行单独设计验证。本设计选用富士通公司的一款功率管,型号为 FLL101ME。它是工作在 L-S 波段的宽带 AB 类 GaAs 场效应管,最大输出功率典型值为 29.5 dBm,效率为 47%,适用于基站应用,符合设计要求。

在设计功放时为了得到最大功率输出,通常让功率管工作在饱和状态。理想情况下,应该利用功率管的大信号非线性模型设计电路。然而该器件厂商并没有提供大信号模型。因此需要根据功率管小信号 S 参数进行功放电路匹配网络设计。

1.1 功率管参数提取

首先需要确定功率管的输出阻抗。为了准确计算出最佳输出阻抗 Z_L ,应该尽可能将管子的所有参数都计入,包括最佳输出阻抗实部 R_L 、与负载并联的电容 C_{ds} 和封装产生的寄生参数 R_{dq} 、 L_{dq} 。参照该功率管数据手册提供的 $I-V$ 特性曲线,根据式 (1),可以确定管子的最佳输出阻抗实部 R_L 为 45.5Ω 。

$$R_L = 2(V_d - V_s) / 1.2I_{dss} \quad (1)$$

式中: V_d 为漏极工作电压; V_s 为 $I-V$ 特性曲线的拐点电压; I_{dss} 为栅源电压等于零时的漏极电流。将数据手册提供的 S 参数数据与 MESFET 小信号等效电路模型进行拟合。经过仿真优化提取到寄生元件值 $C_{ds} = 1.1 \text{ pF}$, $R_{dq} = 0.5 \Omega$, $L_{dq} = 0.8 \text{ nH}$, 最终确定该功率管最佳负载阻抗 Z_L 约为 $(29+j9.7) \Omega$ 。

1.2 匹配网络及稳定性设计

功放的输入匹配电路影响增益,输出匹配电路影响输出功率和效率。因此,设计输出匹配电路要依据最大功率传输匹配的原则。先根据管子的最佳负载阻抗 Z_L 设计输出匹配电路,之后再设计输入匹配电路。此时,输出电路已经满足最大功率输出匹配,后期在进行整体电路优化时,输出匹配电路的各项参数不再改变。

设计直流偏置电路时,应尽量减小其对主电路微波特性的影响,避免微波沿着偏置电路泄漏以及外界干扰进入主路。本设计采用四分之一波长短路微带线来实现。微带线终端通过去耦电容接地,有效地扼制了射频信号泄漏到直流供电端口。

在设计功率放大器时,稳定性系数 K 也是一个很重要的指标。当 $K < 1$ 时,功放电路不稳定,可能会导致自激,严重情况会烧坏功率管。稳定性设计有很多种形式,本设计采用输入匹配电路并联一条终端接 10Ω 电阻的 $\lambda/4$ 分支线来实现。加入稳定性电路后的仿真结果如图 1、2 所示,中心频率 2.45 GHz 电路增益为 14.6 dB, $|S_{11}| < -51 \text{ dB}$ 。功放在整个 S 波段内稳定性系数 $K > 1$, 电路绝对稳定。

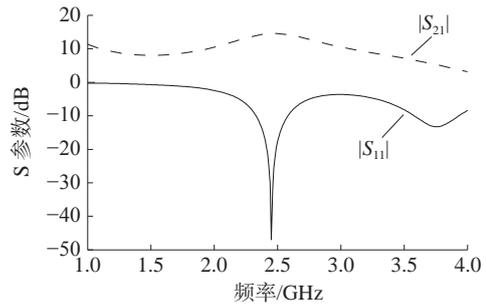


图1 优化后的 S 参数

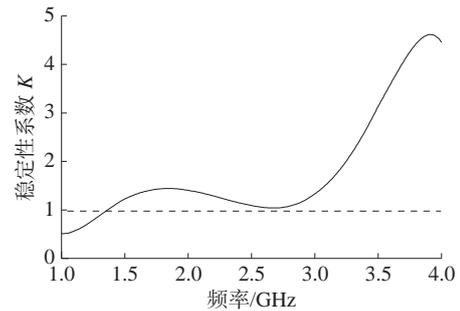


图2 优化后的稳定系数 K

1.3 加工实测

功放加工实物如图 3 所示。测试时首先调整直流偏置,使功放工作在 AB 类,此时管子的静态工作点漏级电压 $V_{ds} = 10 \text{ V}$, 漏级电流 $I_{ds} = 0.12 \text{ A}$ 。

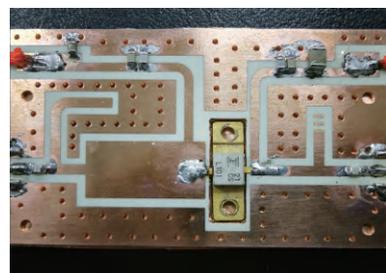


图3 功放加工实物

图 4 为功放实测结果。最大输出功率 30.1 dBm, 增益 10.2 dB, 功率附加效率 (PAE) 57.4%。实测结果验证了提取功率管参数的准确性,功放整体性能实现良好,为后面有源集成天线的匹配网络设计提供了数据参考。

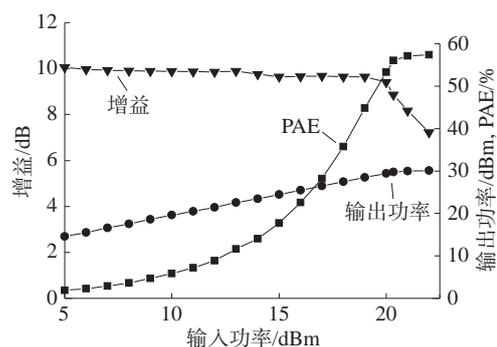


图4 功放测试结果

2 谐波抑制天线设计

在有源天线设计中, 有源非线性器件的引入会产生高次谐波辐射, 从而影响系统性能。传统解决方法是在天线与有源器件之间增加抑制谐波的滤波器。但这种结构会增加天线尺寸, 并引入不必要的损耗^[15]。

谐波抑制天线是将天线与滤波器合二为一, 天线同时作为辐射器和谐波抑制滤波器, 有效降低了系统设计的复杂度和损耗^[16]。首先设计了一个中心频率 2.45 GHz 的正方形贴片天线。板材选用 FR4, 介电常数 4.6, 厚度 1 mm。端口激励阻抗设置为 29 Ω 而不是传统的 50 Ω, 接近功放的输出最佳负载阻抗 Z_L , 便于集成时进一步调匹配。最终得到辐射贴片尺寸为 28.8 mm × 28.8 mm。

通过仿真 4.9 GHz 频率处贴片表面电流分布, 发现对角线是二次谐波电流流动的重要路径。这表明对贴片对角线处电流进行适当的干扰, 可达到抑制二次谐波的目的。在贴片对角线上创建 4 个狭缝, 从而切断二次谐波电流流向。通过对狭缝尺寸进行优化, 可达到最佳谐波抑制效果, 而天线的基波电流分布几乎不受影响。谐波抑制天线在 4.9 GHz 频率下的表面电流分布如图 5 所示。

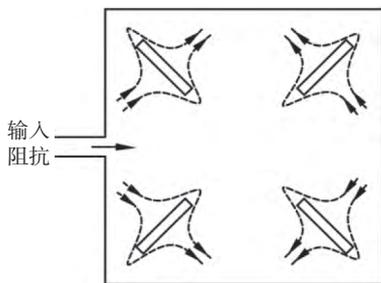


图5 二次谐波电流分布

谐波抑制天线输入阻抗随频率变化曲线如图 6 所示。天线基波阻抗接近功放输出最佳负载阻抗。在 4.9 GHz 频率附近的宽频带内, 阻抗实

部接近于零, 为放大器提供近似等于纯虚部的负载阻抗, 从而有效地抑制了二次谐波辐射^[17]。

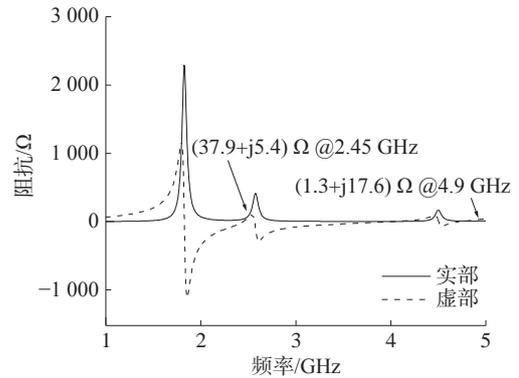


图6 天线输入阻抗随频率变化曲线

3 有源集成天线 (active integrated antenna, AIA) 设计

3.1 仿真设计与对比

将谐波抑制天线的 S 参数导入仿真软件, 与功放输出端连接, 进行整体匹配网络调节。图 7 为有源集成天线的仿真原理图。

谐波抑制天线与有源集成天线的 S 参数仿真结果对比如图 8 所示。对比无源天线, 加入有源网络可进一步改善阻抗匹配^[18-20]。有源天线 2.45 GHz 频率处 $|S_{11}| < -47$ dB, 4.9 GHz 频率处 $|S_{11}| > -1.2$ dB, 并且在 4.68~5.25 GHz 范围内 $|S_{11}|$ 均高于 -1.5 dB, 二次谐波得到了较好的抑制效果。

3.2 加工实测

有源集成发射天线加工实物如图 9 所示。整个板子尺寸约 100 mm × 60 mm。图 10 是天线 $|S_{11}|$ 实测结果。实测天线基波谐振频率为 2.45 GHz, 与仿真结果吻合。4.9 GHz 频率处 $|S_{11}| > -8.1$ dB, 二次谐波得到了抑制。图 11 为有源集成天线的辐射方向图。根据贴片天线增益和放大器的功率增益得到该有源天线增益为 12.7 dB。

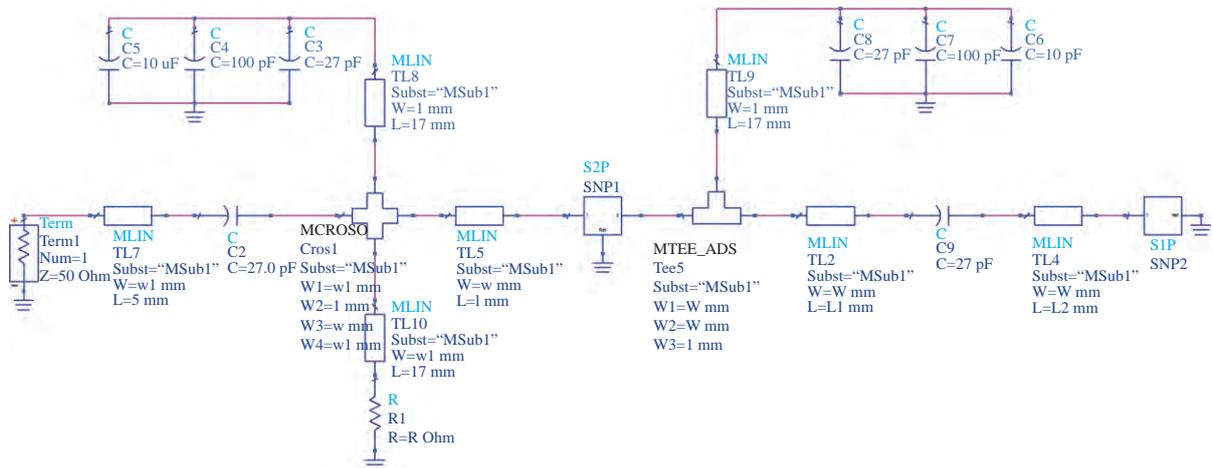


图 7 有源集成发射天线原理

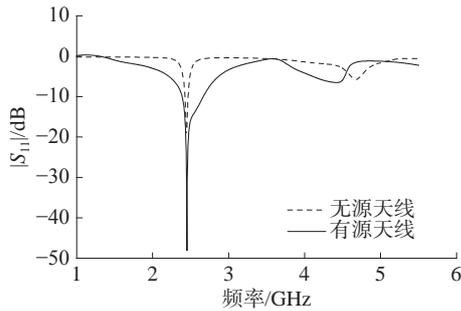


图8 S 参数仿真结果对比

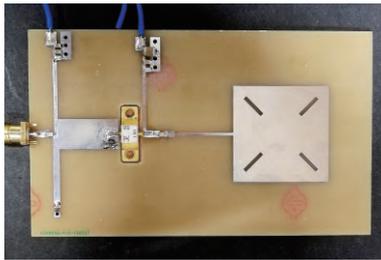


图9 AIA 加工实物

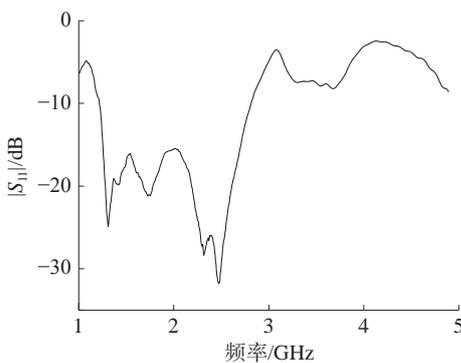


图10 实测 S 参数

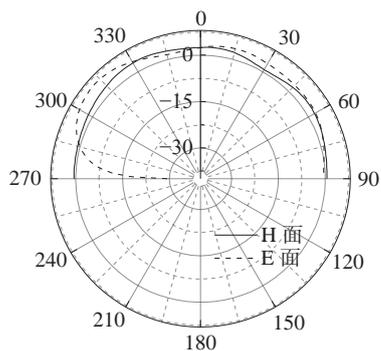


图11 实测辐射方向图

4 结论

实现了一种工作在 S 波段的有源集成发射天线。

1) 功放输出直接匹配天线, 省去了传统 50 Ω 连接线, 无源天线同时作为辐射器和功放的输出调谐网络, 整体有源集成天线结构紧凑。

2) 有源部分提供了功率增益, 从而提高了有源天线的等效增益, 并有效改善了系统稳定性。

3) 天线的谐波抑制结构, 提高了功放的 PAE, 提高系统的电磁兼容性。

将有源天线的辐射单元设计成圆极化结构, 输出匹配网络加入三次谐波抑制结构, 可进一步提高系统性能。这种有源集成发射天线在无线局域网 (wireless local area network, WLAN) 上有很好的应用前景。

参考文献:

[1] 刘宁, 袁宏伟. 5G 大规模天线系统研究现状及发展趋势 [J]. 电子科技, 2015, 28(4): 182.

[2] 崔灵菲, 吴秉琪, 刘长军. 一种用于 GPS 卫星导航的四臂螺旋圆极化印刷天线 [J]. 应用科技, 2019, 46(6): 16-19.

[3] 李玲玲, 冯全源, 邱培熠. 一种适用于 WLAN 和 WiMAX 的三频圆极化开缝天线 [J]. 应用科技, 2020, 47(1): 31-36.

[4] CHANG K, YORK R, HALL P, et al. Active integrated antennas[J]. IEEE trans microwave theory tech, 2002, 50(3): 937-944.

[5] ARPUTHARAJ T, SENTHIL S M, AROCKIA J S, et al. Design of low noise active integrated antenna[C]// Pan African International Conference on Information Science, Computing and Telecommunications . Lusaka, Zambia, 2013: 66-69.

[6] RADISIC V, QIAN Y, ITOH T. Class F power amplifier integrated with circular sector microstrip antenna[C]// 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Denver, USA, 1997: 687-690.

[7] 李文兴, 冯志伟, 李亭. 基于负阻变换有源接收天线的稳定性研究 [J]. 应用科技, 2010, 37(4): 23-26.

[8] 张昕, 张亮. 微带有源天线设计 [J]. 应用科技, 2009, 36(5): 35-38.

[9] SHIH T Y, BEHDAD N. Wideband, non-foster impedance matching of electrically small transmitting antennas[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2018, 66(11): 5687-5697.

[10] 赵国研. 宽带有源发射天线的技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.

[11] 郑晓斌. 有源天线在无线通信领域的应用 [J]. 信息通信, 2013, 6: 224-225.

[12] 崔鹏, 陈凯亚, 廖成. 5.8 GHz 具有谐波抑制功能的天线设计 [J]. 通信技术, 2018, 51(2): 476-480.

[13] RADISIC V, QIAN Y. Novel architectures for high-efficiency amplifiers for wireless applications[J]. IEEE trans microwave theory tech, 1998, 46(11): 1901-1909.

[14] GENC A, TURPIN T, YASIN T, et al. Active integrated meshed patch antennas for small satellites[J]. Microwave and optical technology letters, 2012, 54(7): 1593-1595.

[15] VARMA V R, RAKESH R, GIRISH U S, et al. Design

- and simulation of an RF power amplifier integrated harmonic suppression antenna for WiMAX applications[C]// International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). Coimbatore, India, 2017:1-4.
- [16] 李路, 刘一麟, 李君, 等. 一种具有谐波抑制功能的圆极化天线设计 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(2): 298-301.
- [17] KIM H, YOON Y J. Microstrip-fed slot antennas with suppressed harmonics[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2005, 53(9): 2809-2817.
- [18] 张嘉. 中短波有源天线阻抗匹配场路协同仿真评估 [J]. 中国无线电, 2016(8): 35-39.
- [19] SALAS-NATERA M A, RODRIGUEZ-OSORIO R M, DE HAROL. Procedure for measurement, characterization, and calibration of active antenna arrays [J], IEEE trans on instrumentation and measurement, 2013, 62(2):377-391.
- [20] ALBARRACIN-VARGAS F, GONZALEZ-POSADAS V, SEGOVIA-VARGAS D. Noise advantage measurement of a small antenna, actively matched with a non-Foster form [C]// European Microwave Conference (EuMC). Madrid, Spain, 2018:1121-1124.

本文引用格式:

刘露, 刘长军. 一种2.45 GHz谐波抑制有源集成天线设计 [J]. 应用科技, 2020, 47(4): 37-41.

LIU Lu, LIU Changjun. A 2.45 GHz harmonic suppression active integrated antenna[J]. Applied science and technology, 2020, 47(4): 37-41.

(上接第31页)

- [13] HAN Gao, ZHANG Yanmei, GUO Haichao. A compressive sensing algorithm using truncated SVD for three-dimensional laser imaging of space-continuous targets[J]. Journal of modern optics, 2016, 63(21): 2166-2172.
- [14] UNGI T, ABOLMAESUMI P, JALAL R, et al. Spinal needle navigation by tracked ultrasound snapshots[J]. IEEE transactions on biomedical engineering, 2016, 59(10): 2766-2772.
- [15] 许奇, 王华彬, 周健, 等. 用于目标跟踪的智能群体优化滤波算法 [J]. 智能系统学报, 2019, 14(4): 697-707.
- [16] 王伟, 胡子英, 岳佳男. 高效的MIMO雷达运动目标三维成像方法 [J]. 通信学报, 2019, 40(7): 38-47.
- [17] OLIVEIRA T, AGUIAR A P, ENCARNACAO P. Moving path following for unmanned aerial vehicles with applications to single and multiple target tracking problems[J]. IEEE transactions on robotics, 2016, 32(5): 1062-1078.
- [18] ZENG Y L, LAN J H, ZOU J L. Research on infrared dim-small target tracking algorithm with template sliding confidence constraint[J]. Acta armamentarii, 2017, 38(9): 1771-1778.
- [19] 苏贇, 王挺, 姚辰, 等. 基于合作目标的无人机目标跟踪方法 [J]. 机器人, 2019, 41(4): 425-432.
- [20] 李东方, 邓宏彬, 潘振华, 等. 基于改进蛇形曲线的蛇形机器人在流场中避障的轨迹跟踪控制律 [J]. 机器人, 2019, 41(4): 433-442.
- [21] NIEDFELDT P C, BEARD R W. Convergence and complexity analysis of recursive-RANSAC: a new multiple target tracking algorithm[J]. IEEE transactions on automatic control, 2016, 61(2): 456-461.

本文引用格式:

李晓峰, 邢金明. 融合时空多特征表示的运动人体目标跟踪算法 [J]. 应用科技, 2020, 47(4): 26-31, 41.

LI Xiaofeng, XING Jinming. Tracking algorithm of a moving human body target using multi-feature representation of fused time and space[J]. Applied science and technology, 2020, 47(4): 26-31, 41.