

基于谐波抑制的小型化高效率功率放大器设计

刘天韵, 刘少斌

(南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对传统 VHF 波段功率放大器存在的体积大、效率低、谐波干扰严重等问题, 利用集总参数元件设计了一款工作于该波段的小型化、高功率、高效率功率放大器。通过在功率放大器的输出匹配电路中引入多级 LC 谐振网络, 实现了对谐波分量的有效抑制, 提高了功率放大器的线性度和效率, 也改善了电磁兼容性。实物测试结果表明, 该功率放大器的饱和输出功率约为 44.9 dBm, 饱和功率增益为 14 dB, 功率附加效率为 62%, 性能优良, 具有较好的实际工程应用价值, 可广泛应用于航空、航天等领域。

关键词: 功率放大器; 谐波抑制; 高效率; 小型化; VHF 波段

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223374

中文引用格式: 刘天韵, 刘少斌. 基于谐波抑制的小型化高效率功率放大器设计[J]. 电子技术应用, 2023, 49(2): 97-101.

英文引用格式: Liu Tianyun, Liu Shaobin. Design of miniaturized high efficiency power amplifier based on harmonic suppression [J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(2): 97-101.

Design of miniaturized high efficiency power amplifier based on harmonic suppression

Liu Tianyun, Liu Shaobin

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: To overcome conventional VHF power amplifiers' shortcomings of bulky size, low efficiency, and EM interferences due to output harmonics, a miniaturized, high power and high efficiency power amplifier working in VHF band is designed by using lumped parameter elements in this paper. In this work, multiple series LC resonators are introduced into the output matching circuit of the power amplifier, with effectively suppressed harmonic components, improved linearity and efficiency, as well as improved electromagnetic compatibility of the power amplifier. Finally, the physical test results show that the saturated output power of the power amplifier is about 44.9 dBm, the saturated power gain is 14 dB, and the power added efficiency is 62%. With its excellent performance, it has good practical engineering application value and can be widely used in aviation, aerospace and other fields.

Key words: power amplifier; harmonic suppression; high efficiency; miniaturization; VHF band

0 引言

随着无线通信技术的迅速发展, 对于无线通信设备的相关设计要求也越来越高。功率放大器通常位于发射机的最末级, 作为射频传输系统中平均能耗最大的模块之一, 其增益、功率、效率等性能参数已经成为了能很大程度上直接反映系统整体性能的关键性指标^[1]。

如今, 国际上对于高频、高集成化功率放大电路的研究越发火热, 然而在较低频段下却缺乏简单而又性能优良的设计方案。对于 VHF 波段的信号, 由于受到波长的影响, 在该波段内传统的分布式参数电路往往体积庞

大, 不利于小型化设计; 同时, 因信号频率较低, 功率放大器又多工作在饱和状态, 功放的非线性特性将会引入大量的谐波分量, 且该波段内谐波的频率分布十分密集, 不仅会造成基波信号能量的流失, 功率较大的谐波信号也会在各系统间形成强烈的电磁干扰。本文提出了一种 VHF 波段小型化、高功率、高效率、高谐波抑制功率放大器, 利用集总参数元件进行设计, 大幅减小了模块的整体电路面积, 同时利用多级 LC 谐振网络, 增加对谐波分量的抑制, 进一步提高了功率放大器的效率^[2]。

1 仿真设计过程

本文中选用的是 Wolfspeed 公司的 CGH40035F 功率放大晶体管进行设计,中心频点为 160 MHz,所有仿真设计过程均基于先进设计系统(Advanced Design System, ADS)软件实现。

1.1 直流分析与偏置网络的设计

在具体设计功率放大器前,需优先确定一个合适的直流偏置电压,这将直接影响放大器的性能,若静态工作点设置得不合适,则在对交流信号进行放大时就可能会出现饱和和失真(静态工作点偏高)或截止失真(静态工作点偏低)^[3]。如图 1 所示,直接通过 ADS 仿真软件的“FET Curve Tracer”模板对该晶体管模型进行直流扫描,绘制出不同栅极电压下的晶体管伏安特性曲线。

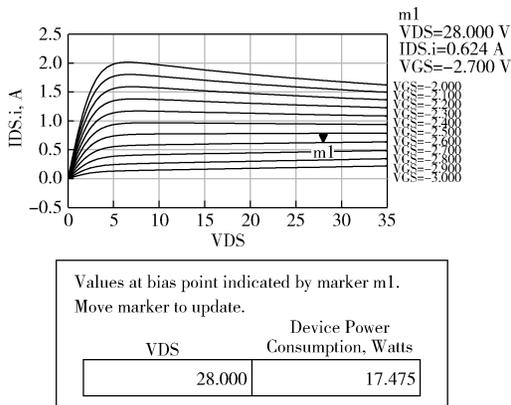


图 1 直流伏安特性曲线

结合参考功放管的数据手册,在该直流扫描结果中进行选取,最终确定 $V_{gs} = -2.7$ V, $V_{ds} = 28$ V,此时静态电流约为 0.624 A。

1.2 稳定性分析

在进行功率放大器的设计时需保证其正常工作时在所要求的工作频段内呈现绝对稳定,若不满足稳定性条件,则放大器在某些情况下会产生自激振荡,导致放大器的增益急剧增大,甚至烧毁晶体管。稳定性的判决一般大致分为两类:绝对稳定和潜在不稳定,绝对稳定是指无论放大器的源阻抗 Z_s 和负载阻抗 Z_L 为任何值时,放大器均能够正常工作。绝对稳定的条件^[4]如下:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |D|^2}{2|S_{11}S_{22}|} > 1 \quad (1)$$

$$\begin{cases} |S_{11}|^2 < 1 - |S_{12}S_{21}| \\ |S_{22}|^2 < 1 - |S_{12}S_{21}| \end{cases} \quad (2)$$

$$D = S_{11}S_{22} - |S_{12}S_{21}| \quad (3)$$

若满足绝对稳定条件 $K > 1$,则表示在此工作条件下放大器处于绝对稳定状态,放大器能够正常稳定工作;若 $K < 1$,则需要对功放管的栅极增加稳定性匹配电路,

从而使晶体管在工作频段内保持绝对稳定。稳定匹配网络中通常需要添加电阻,利用其负载的特性消耗掉多余的能量,防止放大器发生自激振荡,但与此同时也会消耗掉基波信号的能量,因此放大器的稳定状态是以牺牲增益为代价而实现的^[5]。 K 值越大,电路整体的稳定性越高,但也意味着更大的能量消耗,为了兼顾放大器的稳定性和增益,通常保证稳定系数 K 的值略大于 1 即可。

图 2 为功放管自身稳定性的仿真结果,可见在 160 MHz 附近的稳定系数 $K < 1$,其状态并不稳定。

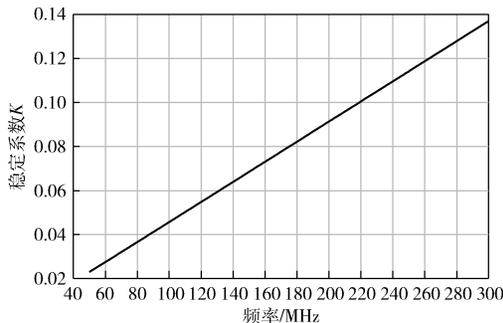


图 2 功放管自身的稳定性仿真结果

图 3 为最终的稳定性网络拓扑结构,其中电阻 R_1 、 R_2 与电容 C_1 、 C_2 共同构成稳定性网络,其稳定性仿真结果如图 4 所示,稳定系数 K 的值在 160 MHz 附近约为 2.0,功放管绝对稳定。

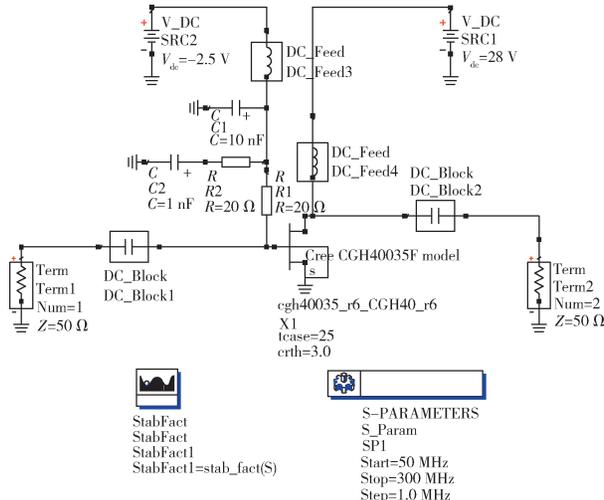


图 3 稳定性网络结构

1.3 负载牵引和源牵引

确定稳定网络电路后,将其带入 ADS 中的 Load-Pull (负载牵引)模板对功放管进行负载牵引仿真,目的是找到能够使功放管在最大输出功率和最佳效率之间取得平衡时的最佳输出阻抗值,然后再将该输出阻抗值带入 Source-Pull (源牵引)模板(同样需要加入稳定网络电

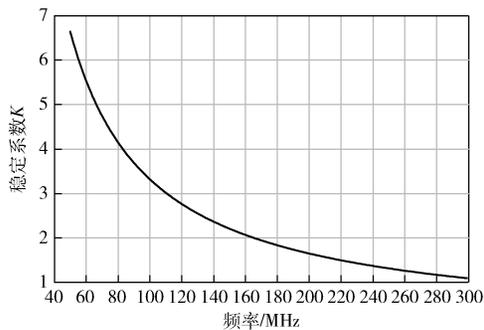


图4 最终稳定性仿真结果

路)进行源牵引,找到对应该输出阻抗情况下的最佳输入阻抗值,之后在二者间反复迭代,直至源牵引和负载牵引的仿真结果中功率和效率的数值趋近相同^[6],此时的输入和输出阻抗即为功放管的最佳匹配阻抗。设置仿真频率为160 MHz,漏极电压28 V,栅极电压-2.7 V,仿真后得到的最佳输入和输出阻抗值分别如图5和图6所示。

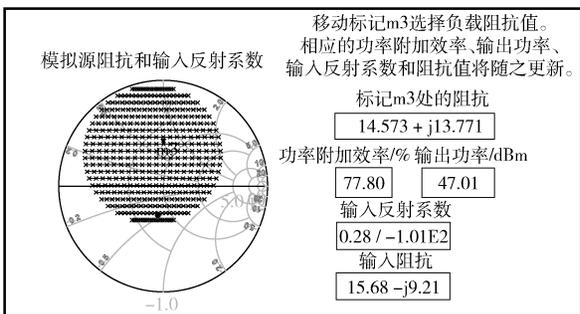


图5 Source-Pull 仿真结果

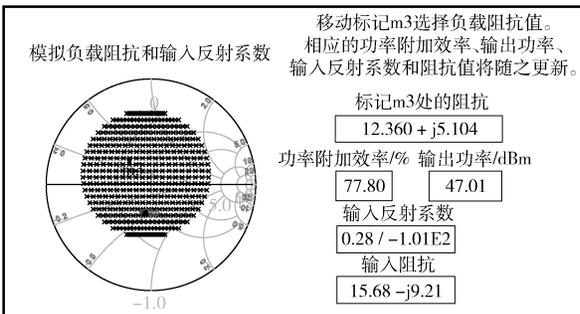


图6 Load-Pull 仿真结果

得到合适的输入和输出阻抗之后,通过ADS的Smith Chart Matching控件,利用Smith圆图对功放管的输入端和输出端进行共轭匹配仿真,得到理想的匹配网络后再用实际的参数模型逐一进行替换从而得到接近于真实的电路结构。

1.4 谐波抑制匹配网络

功率放大器的输出匹配网络^[7]主要用于实现阻抗变换的功能,除了保证功放的输出功率能够尽可能高地向后级传输之外,该匹配网络的相关性能也将直接影响功

率放大器的效率和线性度。因此,本文在功放管的输出阻抗变换网络中进一步加入了谐波抑制电路^[8],实现了对谐波分量的抑制,不仅提高了功率放大器的效率,也有效改善了由大量谐波分量所引起的电磁干扰问题。

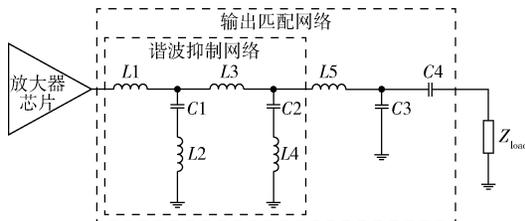


图7 输出匹配网络拓扑结构框图

该输出匹配网络在考虑了二次和三次谐波的前提下,也兼顾了对高次谐波的抑制性能,图7为功率放大器输出端匹配网络的拓扑结构示意图。局部来看, $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$ 、 $L4$ 和 $C1$ 、 $C2$ 共同构成输出端的谐波抑制网络,实现阻抗变换和谐波抑制的功能, $L5$ 和 $C3$ 则主要承担阻抗变换的作用, $C4$ 为隔直电容,不参与匹配。整体来看, $L1$ 、 $C1$ 和 $L3$ 、 $C2$ 和 $L5$ 、 $C3$ 共同构成一个三级低通网络^[9-10],对于基频而言为通带,起到阻抗变换的作用,而对于高次谐波分量而言则构成阻带,由此实现了对高次谐波的抑制。 $C1$ 和 $L2$ 构成一个串联LC谐振网络^[11-12],谐振频率为 $2\omega_0$ (ω_0 表示基波频率),实现了将功放输出端的二次谐波信号对地短路, $C2$ 和 $L4$ 同样也构成一个串联谐振网络,谐振频率为 $3\omega_0$,用于实现将功放输出端的三次谐波信号对地短路。

图8为输出匹配网络中未加入谐波抑制电路时的频谱仿真结果,图9为加入谐波抑制电路后的仿真结果。对比二者可以看出在加入了谐波抑制电路后,功放的输出端对二次谐波和三次谐波分量均具备了较好的抑制能力,同时对于更高次的谐波分量也有一定的抑制效果,功放输出端整体的谐波抑制性能和线性程度得到了显著的提高。

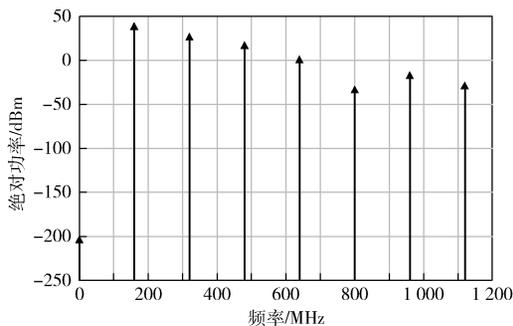


图8 谐波频谱仿真结果(未加谐波抑制)

1.5 电路模型优化及仿真结果

将输入和输出的匹配网络与偏置网络进行整合,得到初步的整体电路仿真模型^[13]。但由于在电路中加入

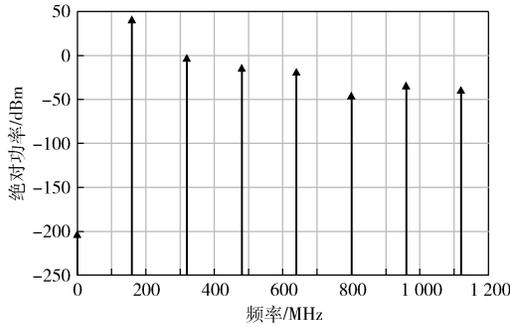


图9 谐波频谱仿真结果(加入谐波抑制)

了各类外围网络之后,电路中各节点的阻抗特性会发生变化,从而偏离原本的最佳匹配状态,因此需要进行不断的调试^[14]。

利用ADS中的Turning控件不断调整各匹配元件的值从而对电路进行优化,最后根据整体电路的大信号仿真结果,得到最终的电路模型如图10所示。

图11为一般电路模型(未加入谐波抑制网络)的大信号仿真结果,图12为本文设计的最终电路模型的仿真结果。通过对比可以看出,在输出匹配网络中加入谐波抑制电路后,该功率放大器的饱和输出功率和功率附加效率均得到了显著的提升。

最终整体电路的仿真结果优良,该功率放大器的饱和输出功率为44.77 dBm,功率增益约为16dB,功率附加效率为75.8%。

2 实物加工与测试

实物装配图如图13所示。

实际电路中均选用高Q值、高功率容量的电容和电感,且自谐振频率均为160 MHz左右,最大限度地保证了设计频段内整体的电气性能,但由于电容、电感的实际参数与仿真模型略有偏差,测试结果较最佳仿真结果

| 输出功率/dBm | 功率增益/dB | 增益压缩/dB | 功率附加效率/% | 直流功耗/W | 最大电流/A | 热耗/W |
|----------|---------|---------|----------|--------|--------|--------|
| 43.288 | 17.538 | 3.676 | 58.121 | 36.063 | 1.288 | 14.288 |

图11 一般电路模型大信号仿真结果

| 输出功率/dBm | 功率增益/dB | 增益压缩/dB | 功率附加效率/% | 直流功耗/W | 最大电流/A | 热耗/W |
|----------|---------|---------|----------|--------|--------|-------|
| 44.777 | 16.239 | 4.576 | 75.840 | 38.592 | 1.379 | 9.323 |

图12 最终电路模型大信号仿真结果

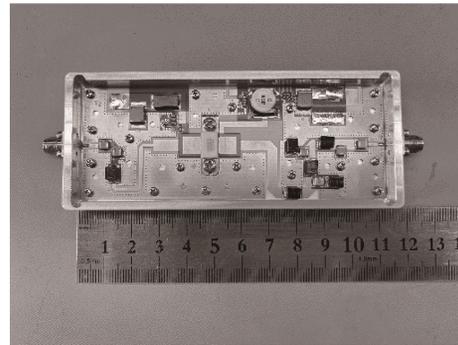


图13 功放模块实物图

而言饱和输出功率略有提升,功率附加效率有所恶化。对实物进行测试,得到的功率和效率曲线如图14所示。

由测试曲线可以看出,当功放输出功率为44.9 dBm时,功率附加效率达到最高,约为62%,此时的功率增益约为14 dB。功率回退10 dB情况下,效率优于50%,此时线性增益约为19 dB。同时,该功率放大模块的整体尺寸仅为114 mm×46 mm×13 mm,满足小型化设计的需要。

表1中列出了本文及相关参考文献中设计的功率放大器的主要性能参数,从对比中可以看出,本文的设计

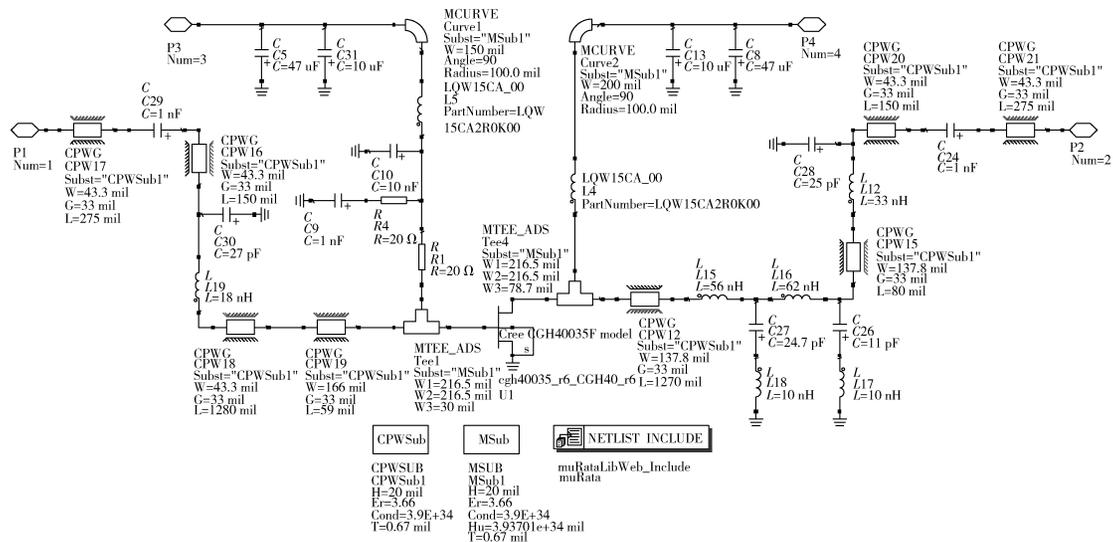


图10 最终电路仿真模型

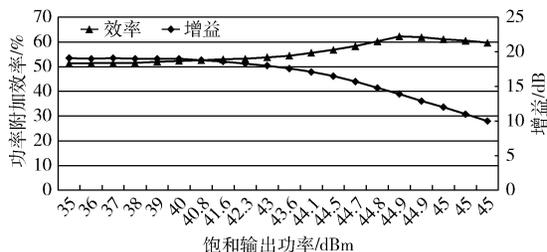


图 14 功率放大模块实测结果曲线图

表 1 本文与其他文献中功放性能的比较

| 参考文献 | 频段/GHz | 功率增益/dB | 输出功率/dBm | 效率/% |
|-------|-----------|---------|----------|-------|
| 文献[1] | 1.8~3.0 | 10.78 | 40.87 | 61.15 |
| 文献[3] | 3.8~4.2 | 12.6 | 46 | 64 |
| 文献[8] | 1.8~2.1 | <11 | 43.5 | 58 |
| 文献[9] | 1.9~2.1 | 31 | 35.5 | 50 |
| 本文 | 0.14~0.18 | 14 | 44.9 | 62 |

能够有效改善功放的性能,并且保证了各项参数间的均衡性,使功放整体的性能得到提升,同时电路设计也简单易行。若继续提高抑制度,功放的性能还能够进一步提升,但相对地,电路体积及复杂度也会随之增加。

3 结论

本文针对传统 VHF 波段功率放大器模组存在的体积大、效率低、谐波干扰严重等问题,基于谐波抑制的方法,设计了一款工作于该波段的小型化、高功率、高效率功率放大器。通过在输出匹配网络中引入 LC 谐振电路,实现了对谐波分量的有效抑制,在降低对外干扰的同时也显著提高了功率放大器自身的效率和线性度,不仅得到了较高的输出功率,发热量也得到了有效控制,性能优良,具有较好的工程应用价值,可广泛应用于航空、航天等领域。

参考文献

- [1] 刘承鑫. 高效率射频功率放大器研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [2] 周健, 杨晓庆, 蒋光明. 基于 ADS 的宽带高效率功率放

大器设计[J]. 现代计算机, 2022, 28(9): 40-44.

- [3] 张书源, 钟世昌. 基于谐波抑制的内匹配高效 GaN 功率放大器设计[J]. 电子器件, 2019, 42(3): 608-612.
- [4] 刘宇航, 谢义方. 一款小型化 S 频段高谐波抑制功率放大器的设计[J]. 电讯技术, 2018, 58(11): 1351-1355.
- [5] 孙园成. 基于 GaN 的新型 F 类功率放大器的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [6] 刘益萍, 曹卫平. 低谐波 S 波段 GaN 功放设计[J]. 无线电工程, 2018, 48(7): 601-605.
- [7] 袁正昊, 于春永. 功率放大器性能受匹配电路谐波特性的影响[J]. 科技创新与应用, 2020(6): 63-64.
- [8] 亓孝博. 微波功率放大器的效率提升及小型化研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [9] 高思鑫, 张晓朋, 高博, 等. 基于 InGaP/GaAs HBT 的高效率高谐波抑制功率放大器[J]. 半导体技术, 2020, 45(12): 957-963.
- [10] 程知群, 栾雅, 贾民仕, 等. 高二次谐波抑制 UHF 波段功率放大器[J]. 杭州电子科技大学学报, 2014, 34(5): 65-68.
- [11] 刘文良. 基于 GaAs_HBT 的功率放大器研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [12] 陈思弟, 郑耀华, 章国豪. 高效率高谐波抑制功率放大器的设计[J]. 电子技术应用, 2015, 41(4): 60-62, 68.
- [13] 张家宇, 常树茂. 基于 ADS 的功率放大器仿真模型设计[J]. 电子科技, 2016, 29(7): 136-138.
- [14] 郑晓玲. F 类功率放大器研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.

(收稿日期: 2022-09-18)

作者简介:

刘天韵(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 微波器件与电路、功率放大器等。

刘少斌(1965-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 微波技术、天线理论与技术等, E-mail: lsb@nuaa.edu.cn.



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所