

宽带功率放大器的ADS仿真与设计研究

刘宁川¹, 彭宇¹, 纪晓辉², 刘宏杰¹

¹中原电子集团有限公司研发三所, 湖北 武汉

²中国电子产业工程有限公司, 北京

收稿日期: 2022年7月24日; 录用日期: 2022年8月13日; 发布日期: 2022年8月24日

摘要

随着军事通信的不断深入发展, 现代军用通信系统正朝着大容量、宽频带、高频谱利用率的方向发展。宽带通信势必会成为未来军事通信的发展主流。本文对宽带功率放大器的选型、设计进行了详细分析和基于ADS仿真软件进行仿真, 对宽带功率放大器设计具有很强的工程理论指导意义。

关键词

宽带, 功率放大器, ADS仿真

ADS Simulation and Design of Broadband Power Amplifier

Ningchuan Liu¹, Yu Peng¹, Xiaohui Ji², Hongjie Liu¹

¹The Third Research, Zhongyuan Electronics Group, Wuhan Hubei

²China Electronics Industry Engineering Company, Beijing

Received: Jul. 24th, 2022; accepted: Aug. 13th, 2022; published: Aug. 24th, 2022

Abstract

With the continuous development of military communication, modern military communication system is developing towards the direction of large capacity, broadband and high frequency spectrum utilization. Broadband communication is bound to become the mainstream of future military communication. In this paper, the selection and design of broadband power amplifier are analyzed in detail and simulated based on ADS simulation software, which has a strong engineering theo-

retical guiding significance for the design of broadband power amplifier.

Keywords

Broad Band, Power Amplifier, ADS Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

宽带功率放大器在战术无线通信、雷达、电子对抗设备等系统中有广泛的应用。作为发射机系统的核心部件，其性能的好坏将影响无线通信的通信时间、通信距离、通信效果等技战术指标。宽带功率放大器不仅要有高输出功率，同时还要具有体积小、效率高、重量轻，可靠性高、成本低等特点[1] [2] [3]。宽带功率放大器的核心器件是功率管[4]，宽带功率放大器的 ADS 仿真与设计有很高的频率，是目前射频功率管方面发展方向[5] [6] [7] [8]，但由于其衬底制备工艺复杂，良率不高，成本居高不下，暂时还没有大量运用到射频功率放大器的设计之中。功率放大器经常工作在大信号状态下，要求在一定频率范围内输出一定的功率，同时还要满足线性度和高效率要求，导致了设计难度较大。如今，采用新型的射频器件和新颖的射频技术，人们已经可以开发多种固态宽带功率放大器来满足各种需求[9]。

2. 功率放大器设计概述

2.1. 功率放大管选型

宽带功率放大器的核心部件是功率放大管，因此功率放大管的选取变得十分重要。很多时候，设计的成败取决于功率管的选取是否合适。若选取的器件不恰当，会给电路设计带来难题，从而导致设计的失败。根据设计经验，功率管的选取一般应遵循以下原则：

1) 电源供电

电源供电是首先必须要考虑的条件之一。设计者不仅要考虑设计的方便性，也要从系统设计的要求来考虑；还要考虑电源变化对功率管性能的影响；以判断选取的功率管是否合适。通常情况下，功率管的标准额定工作电压为 50 V、28 V、12.5 V、7.5 V 等，选取功率管时可以按照需求选取合适的管子。对器件手册中规定的 V_{DSS} 、 $V_{GSSI DSS}$ 等应有深刻的理解。实际设计时应尽量避免极限损害情况的出现，以免造成管子软击穿或永久性损坏。由于 MOS 功率管是一个比较脆弱的器件，防静电能力比较差，对存储、量测、焊接、工作状态的要求都很高，要求严格按照防静电要求对其进行存放、安装、测量等操作。因为累积静电很可能会令管子软击穿造成管子损坏。在保证不超过击穿电压的情况下，可以适当地提高其工作电压。比如某标称 12.5 V 工作电压的功率管击穿电压为 36 V，实际我们在 14.4 V 甚至 18 V 仍可以正常工作，但要考虑功率管在输出功率较大时因匹配不佳而造成的损坏，适当提高工作电压是可行的，但严重超出额定工作电压也是不可取的。在保证输出功率和增益的情况下，功率管也可以降压使用。降压使用的功率管能更稳定地工作。如标称 50 V 的功率管实际工作电压为 28 V，标称 28 V 的功率管实际工作在 26 V 甚至更低到 18 V。降压使用可以降低管子损坏的机率，但也会使功率管的额定输出功率和功率管的效率降低，某些特征指标(比如 IMD)也会降低。从经济性的角度来考虑，功率容量的减小也意味

着效率的降低和成本的增加。

2) 工作频率

工作频率一般是指功率管标称的最高工作频率。低于该频率也可以工作，但在这种情况下，可能会因增益过高导致功率管不稳定，或是因为匹配电路难以设计而导致管子在低频段时不实用。决定工作频率的因素主要与功率管的材料、生产工艺相关。比如 LDMOS、VDMOS 比较适合在高频段工作，而 GaAs FET 则比较适合在微波、毫米波段的性能表现优异。

3) 功率容量

功率容量也是设计时必须考虑的问题之一，功率容量的大小基本决定了功率管的成本，一般情况下都是按照额定输出功率来选取合适的功率管。降低功率管的工作电压，会降低功率容量。在接近饱和输出功率点时效率较高，但此时的线性度也会较差。因此，选取管子时还必须要考虑系统实际的需求(效率、线性度)，依据系统的需求选取合适的管子，设置合适工作点。

4) 增益

增益决定了功率管放大能力。一般情况下，功率管的标称增益都是在额定偏置、额定频率下的增益。增益太高则会容易引起自激而不稳定，增益较低会引起效率很低。依据功率管的特性可知，增益与频率相关，增益会随着频率的增加而降低。

5) 输入/输出匹配

不管是在输入输出阻抗圆图上，还是在某些特定条件下测定的功率管的输入输出阻抗 S 参数观测，阻抗变化比较小的功率管更易于匹配。因此，在选取功率管的时候，必须要考虑到阻抗变化的情况。

6) 仿真模型

目前，由于 EDA 工具应用的比较广泛，设计者可以利用这些工具辅助功率放大器的设计，可以达到事半功倍的效果。这一类的工具主要包括安捷伦的 ADS (Advanced Design System 2021)、AWR 的 Mirco wave Office, Ansoft 的 Designer 等，因此，我们所选取的功率管最好能提供 SPICE 模型或其他非线性模型，以便于使用 EDA 工具的仿真。

2.2. 功率管的阻抗与匹配网络

由于功率管的阻抗是变化的，在不同的条件下也是受不同的因素牵引变化的。比如偏置电压、工作频率、漏极电压、负载阻抗等。因此，对功率管的阻抗进行分析是十分必要的。在低频使用时，管的输出阻抗相对于频率高端一般是比较高的，这是由于封装和功率管的固有属性决定的。若按照负载线的理论来计算，功率管在低频使用时其输出端的阻抗同利用负载线计算出来的相比，其值的大小也是相对偏高的。随着工作频率的提高，输出电容、反向传输电容等寄生电容会发生变化，这些寄生电容会产生漏电流，而应该被正常放大的电流会变少，因此，所有的放大管都表现为低频工作时的增益较高，高频工作时的增益会变低。这些寄生电容在负载阻抗上的变化表现在会使输出负载线降低，饱和输出功率变小，功率增益变小。根据经验，超过一倍频程时，优化的负载阻抗将下降 2 个因数。这就是说如果低频工作时的负载线 6 欧姆，高频工作时的这个负载阻抗可能会降到 3 欧姆。若阻抗匹配网络设计得不合适，在频率的最高端和最低端都会因输出驻波比严重恶化，增益降低，输出功率变小甚至无法正常工作。因此阻抗匹配网络的设计也是功率放大器设计的关键技术难点，

一般而言，宽带功率放大管的输入输出阻抗变化较大，因此匹配网络的设计是功率放大器设计中极其重要的工作。电感、电容谐振网络具有选频特性，但是这类网络的带宽很窄，不能满足宽带功率放大器电路的要求。因此需要寻求一种带宽很宽的匹配网络，传输线变压器具有这一特性，是宽带电路设计中较为常见的一种形式。传输线变压器宽带匹配是使用元器件固有的物理长度、电缆的阻抗特性、集总

元件的特性、磁材料的阻抗特性等综合起来达到最佳的阻抗匹配特性。传输线变压器是将传输线绕在磁环上构成的。传输线可以采用同轴电缆，带状传输线、双绞线或高强度的漆包线；磁芯采用高频铁氧体磁环(MXO)或镍锌(NXO)材料。频率较高时，采用镍锌材料。磁环直径小的只有几毫米，大的有几十毫米，磁环直径的选择与功率大小有关，一个 15 W 的功率放大器需要采用直径为 10 mm 到 20 mm 的磁环。传输线变压器的上限频率可以达到几千兆赫。

2.3. 功率放大器的设计要领

功率放大器的设计牵涉到诸多问题。在要求的带宽内，要得到较大的输出功率。选取功放管时，参考 2.1 章节的原则选取合适器件，各个指标参数还要留有适当的余量。由于功率放大器的输出功率比较大，而效率通常都不是很高，一部分功率转化为热量，温度过高时，功率放大器将不能正常地工作。因此，散热也是一个非常重要的问题。各级放大器的工作状态的合理选择也是十分重要的。为了兼顾效率和线性度，通常采用 AB 类工作状态。功放电路的设计应当尽可能简化，以降低故障率和便于调试。功放通常是由多级放大电路组成的，做好级间匹配以保证功率的有效传输也是十分重要的。宽带功放的匹配电路设计比较繁琐。设计匹配电路时要综合考虑各方面的影响。

3. 基于 ADS 仿真的设计过程

在使用 ADS 进行仿真设计的过程中，模型研究是进行电路仿真和系统仿真的一个重要组成部分。功率放大器的模型主要有两种类型的模型：一种是用于电路仿真的物理模型，一种是用于系统级仿真的行为模型。功率管经常工作在大信号非线性状态。建立一个正确、适当的模型，对于研究功率放大器是十分重要的。放大管的大信号 Spice 模型如图 1 所示，大信号模型的建立使得功率放大器的精确仿真成为现实。

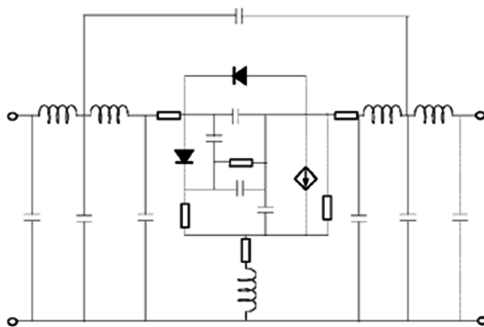


Figure 1. SPICE model of power amplifier tube

图 1. 功率放大管的 SPICE 模型

3.1. ADS 仿真模型

ADS 设计环境只是提供了一个很好的开发环境。虽然会附带部分元器件仿真模型，但这并不包含所有的元器件模型，很多情况下，我们并不能在元器件库中找到我们所需要的模型。其主要原因是不同的仿真对模型的要求不尽相同，比如器件库中的 SP 模型只能用来仿真 S 参数模块，而不能进行 DC 参数仿真和 AC 参数仿真；而谐波平衡仿真(HB)必须调用 spice 模型或其他形式含有器件完整性能参数的模型。另一个重要原因是一些半导体器件厂商出于对自身知识产权的保护，并不愿意将提供最新产品的仿真模型(防止反向工程)，因此，我能找到的可以用来仿真模型比较少。要用 ADS 软件进行电路设计的仿真，首先必须建立正确完整的元器件模型。由于器件的模型是一切仿真的依据，模型是否精确，也关系到仿

真结果的是否可信。目前常使用到的大多是线性仿真和非线性仿真，使用最多的模型大多是 spice 模型和 S 参数模型，线性仿真大适用于小信号电路的仿真，在接收电路中线性放大使用较多；非线性仿真适用于大信号电路的仿真，在功率放大电路中使用较多。比较常见的模型多为 spice。非线性仿真可以得到增益压缩、功率输出、效率、谐波等测试数据。在精度要求不是很高的情况下，互调指标也是可以仿真的。实际仿真的时候，仿真出来的结果与实际工作时的情况相差在 5% 左右。5% 的误差的在增益压缩和效率的测量中都是可以接受的。但是在对线性度极为敏感的互调指标的仿真测试的过程中，这样的误差是不能容忍的。因此，建模是一个十分复杂的过程，模型的精确程度决定了仿真的精度，因此非线性仿真是十分费时费力的，但这也是做大信号仿真设计唯一选择。

3.2. 电路设计与仿真

功率放大器的原理图设计一般比较简单，常用的方法为参照 Datasheet、和一些经验来完成。本文中，我们依据本文 2.1 章节的原则选择了 POLYFET 公司的 28 V 的功率管 SP201 作为本设计的核心器件。这种管子具有 ADS 完整的仿真模型，并且还具有 Artwork 的版图，能运用 ADS 进行仿真。

1) 设置合适工作点

使用 ADS 软件对功率管 SP201 扫描 I-V 曲线，得到的结果如图 2 所示：

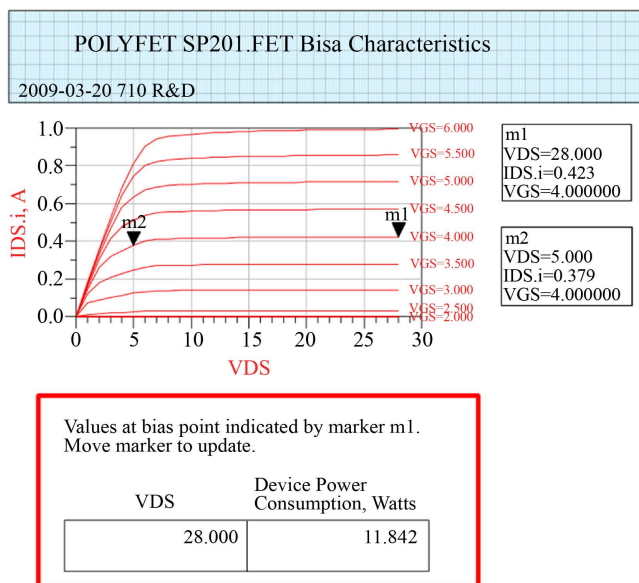


Figure 2. I-V curve simulation of SP201

图 2. SP201 的 I-V 曲线仿真

2) 电路的仿真要领

电路设计中有源器件的线性仿真必须是工作在线性工作区之内(较低的电压、较低的功率)。线性仿真的指标测试和参数扫描是不需要依靠功率输出的。这种仿真可以有两种方法来实现。第一种方法是使用非线性模型来实现非线性仿真。把静态工作点设置在标称的条件下，使用仿真的功率输入大小设置在较低的水平，保证电路处于线性工作状态。非线性仿真可以得到增益压缩、功率输出、效率、谐波等测试数据。非线性仿真首先必须考虑优化负载线的阻抗设计。计算出负载线并依据它对放大器做优化设计。一旦负载线被设计确定以后，就可以进行大信号仿真设计了。我们可以依照经验设计输入输出的阻抗匹配部分。因为输入输出的回波损耗是可以通过仿真得到的(实践中我们还可以通过网络分析仪测试得到。

当然，使用网络分析仪测得的是小信号参数，小信号参数与大信号 S 参数还是有较大的差异的)。依据回波损耗的大小，我们可以很容易得到输入、输出阻抗的大小并对他进行阻抗匹配的优化设计。电路的设计方案确定以后，下一步就是非线性仿真。在做非线性仿真设计时，建议首先最好要使用较低的输入功率电平来检查小信号增益、增益平坦度、输入端的回波损耗等，输入端的回波损耗可以使用调谐功能来模拟小信号工作时各种失配状态下的情况。因为与其他端口匹配时，随着功率的增加，这一特性将发生变化。不要试图对输出端的回波损耗进行调谐，因为负载线的调谐是考核功率感应产生的。如果小信号下的功率增益、回波损耗均能达到比较满意的状态，慢慢地增大输入功率的电平水平直到功率增益开始压缩，典型的功率增益压缩一般出现在频段的中间或是频段的高端。高功率优化的目标是在数个或者数十个频程内获得比较平坦的增益压缩点。手动调谐和使用 ADS 调谐自动优化都很容易达到这一目标。手动调谐优化是一个最佳的途径，因为手动调谐可以发现在什么时候将发生非线性。现代比较优秀的 EDA 仿真工具和先进的计算机运算能力使得非线性仿真也能像线性仿真一样迅速快捷。而且实时的非线性调谐仿真也很容易实现。在优化负载线设计中，输入端的阻抗匹配优化将可以得到较好的回波损耗。但是输出端的负载线匹配调谐所带来的性能优化是非常有限的。

3) 基于 ADS 的放大器的设计与仿真

选用 POLYFET 公司的 SP201 功率管。该类功率管的额定工作电压为 28 V，SP201 的额定输出功率为 4 W，由于 SP201 的输入输出阻抗变化比较小，易于实现宽带匹配，并且 POLYFET 公司提供了该器件的 ADS 非线性模型。使用 ADS 可以很方便地进行仿真分析，得到各项关键技术指标如下：

- 两级增益为 24 dB、P 1 dB = 2.5 W 其电路图如图 3 所示

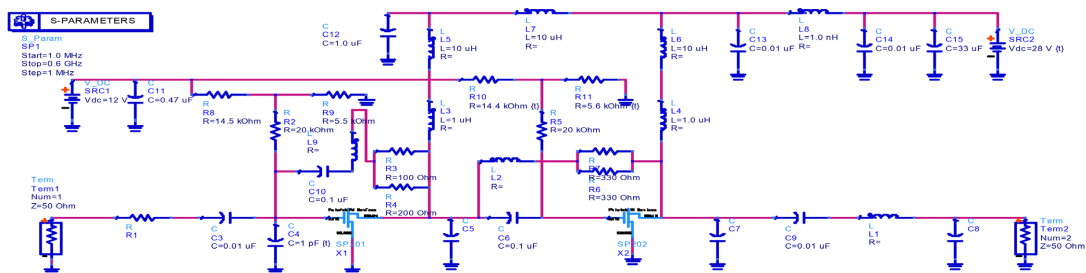


Figure 3. Circuit diagram of 1~520 mhz 2 W power amplifier
图 3. 1~520 mhz 2 瓦功率放大器电路图

- 仿真小信号 S 参数得到的增益如图 4 所示

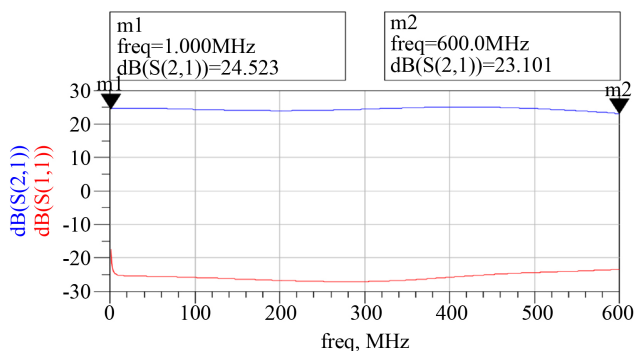


Figure 4. Small signal gain and input return loss
图 4. 小信号增益及输入回波损耗

- 使用 ADS 进行谐波仿真分析结果如表 1 所示

Table 1. Gain and harmonic simulation analysis**表 1.** 增益与谐波仿真分析

Freq (MHz)	Pin (dBm)	Gain (dB)	2 次谐波(dBc)	3 次谐波(dBc)
1	8.7	24.3	-40	-41
25	8.6	24.4	-45	-41
50	8.7	24.3	-45	-42
75	8.7	24.3	-45	-43
100	8.8	24.2	-47	-44
200	9.3	23.7	-51	-36
300	8.8	24.2	-35	-43
400	8.2	24.8	-39	-54
500	8.7	24.3	-45	-63
525	9	24	-45	-64
600	10.3	22.7	-45	-66

Vd = 28 V Vgs1 = 3.3 V Vgs2 = 3.36 V IDQ1 = 222 mA IDQ2 = 490 Ma
Pout = 2w (33 dBm)

仿真结果分析：两级放大的增益约为 24 dB，400 M、425 M 处出现增益极大值 24.8 dB；600 M 处出现增益极小值 22.7 dB，高低端增益相差 2.1 dB；二次谐波 ≤ -34 dBc；三次谐波 ≤ -35 dBc。

- 使用 ADS 进行互调仿真分析的结果如表 2 所示

Table 2. Intermodulation index simulation analysis**表 2.** 互调指标仿真分析

Freq (MHz)	Pin (dBm)	Pout (F1)	Pout (F2)	IMD3 (2F1 - F2)	IMD3 (2F2 - F1)
1	5.6	29.8	29.8	-36.9	-37
25	5.4	29.8	29.8	-37.8	-37.9
50	5.5	29.8	29.8	-37.6	-37.7
75	5.6	29.8	29.8	-37.5	-37.5
100	5.8	29.8	29.8	-36.6	-36.7
200	6.2	29.7	29.7	-33.2	-33.4
300	5.7	29.6	29.6	-32.7	-32.6
400	5.1	29.7	29.7	-31.2	-31.2
500	5.5	29.6	29.6	-31.2	-30.1
525	5.9	29.7	29.7	-30.9	-30.7
600	7.1	29.5	29.5	-30.4	-30.5

测试对应出 4 W 时的 PEP 互调指标：双音输入，单音分量的输入功率驱动放大电路输出 30 dBm

输出 4W PEP 时的三阶互调指标 $IMD3 \leq -30$ dBc, 在频率高端 600 M 指标最差。而输出 2W PEP 时的三阶互调指标 $IMD3 \leq -40$ dBc。通过 ADS 仿真可以看到, 该电路在输出 2 W 线性功率时对应的线性度是令人满意。

4. 结论

本文对战术通信频段的宽带功率放大器进行研究, 阐述了宽带固态功率放大器的仿真与设计。详细地分析了如何选取合适的器件、如何建立器件模型、如何使用 ADS 进行仿真等, 并通过基于 ADS 对功放进行了实例仿真。对宽带功率放大器设计具有很强的工程理论指导意义。在本文设计中, 考虑到研发成本, 未做出具体的实物产品, 后续读者对其感兴趣可以参考本文数据进行实物设计。

参考文献

- [1] Inder J. Bahl. 射频与微波晶体管放大器基础[M]. 鲍景富, 孙玲玲, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [2] 赵夕彬. 射频宽带大功率放大器模块[J]. 半导体技术, 2015, 28(2): 65-67.
- [3] 陈艳华, 等. ADS 应用详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
- [4] 张哲. 基于 GaN 芯片的 S 波段宽带功率放大器的设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [5] Amiri, E., Joodaki, M., Forouzanfer, M., et al. (2020) A Distributed Power Amplifier Design with a High Power Gain. 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tabriz, 4-6 August 2020, 1-4.
- [6] Qiu, Y.J., Xu, Y.H., Xu, R.M., et al. (2013) Compact Hybrid Broadband GaN HEMT Power Amplifier Based on Feedback Technique. *Electronics Letters*, **49**, 372-374. <https://doi.org/10.1049/el.2012.3910>
- [7] Meng, X., Yu, C., Liu, Y., et al. (2017) Design Approach for Implementation of Class-J Broadband Power Amplifiers Using Synthesized Band-Pass and Low-Pass Matching Topology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **65**, 4984-4996. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2711021>
- [8] 清华大学《微带电路》编写组. 微带电路[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 108-183.
- [9] 刘茂林, 王斌, 李冉, 等. 基于阶梯阻抗变换器的宽带功率放大器设计[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(5): 479-484.