

# L频段宽带 GaN 芯片高功率放大器设计

张 忍 刘彦北

(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

**摘要:** 针对当前无线通信系统中射频功率放大器工作带宽窄、输出功率和附加效率低的缺点,本文基于 CREE 公司的 GaN 功率管设计了一款新型的 L 频段宽带大功率射频功率放大器。用源牵引和负载牵引技术测得工作频段内最佳输入输出阻抗,再通过集总参数元件与微带线结合的方法设计宽带匹配网络,并对放大器功率、效率以及谐波分量等指标进行测试。测试数据表明,当放大器工作在 L 频段 300 MHz 带宽内(相对工作带宽为 27.7%),输入功率为 34 dBm 的连续波(CW)时,其输出功率可达 50.4 dBm(108 W),附加效率不低于 48%,平坦度为  $\pm 0.1$  dB。因此,本文设计的 GaN 射频宽带功率放大器具有带宽宽、效率高、功率大的特点,具备应用价值。

**关键词:** 射频功率放大器;匹配网络;附加效率;氮化镓(GaN)

**中图分类号:** TN722 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Design of broadband amplifier with GaN power device in L band

Zhang Ren Liu Yanbei

(School of Electronic Information Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of narrow working band and low output power and power-added efficiency in current wireless communication system, this paper proposes a new type of the broadband high power amplifier in L Band designed by GaN device made by CREE. A method based on source-pull/load-pull simulation has been used to find optimum source and load impedances. Then using an approach of mixing of microstrip line and capacitor, wideband matching networks is designed. Large-signal measurement results show that when the input power is 34 dBm among the band of 300 MHz in the L-band (relative operating bandwidth is 27.7%), the output power is higher than 50.4 dBm (108 W), the power-added efficiency (PAE) is over 48% and the plainness is  $\pm 0.1$  dB at the whole working band. The data indicates that the power amplifier based on GaN has the advantages of wide band, high efficiency and output power.

**Keywords:** radio frequency power amplifier; matching networks; power-added efficiency (PAE); GaN

## 1 引言

当前射频和微波功率放大器广泛地应用在雷达、卫星通信、电子军事对抗以及导航等系统中,是无线通信系统非常重要的设备之一<sup>[1]</sup>。随着用户对无线通信系统传输距离越来越长、传输信息量越来越大以及调制方式改进的需求,高效率、大功率、小型化是射频和微波功率放大器发展的必然趋势<sup>[2]</sup>。

以 GaN 为代表的第三代宽禁带半导体材料,除了具有高击穿电压、较高电子迁移率的特点之外,还能够与其他 III-N 化合物材料形成异质结,可以用来制作高电子迁移率晶体管(HEMT)。相比于第一代和第二代半导体材料制作的晶体管,其具有高功率密度、高效率以及

工作频带宽等优势,更加适合应用于军事以及民用微波无线通信设备中<sup>[3-4]</sup>。因此,如何使用 GaN HEMT 设计出高效率、大功率的宽带功率放大器已成为目前一个重要的研究领域。

本文针对无线通信系统对功率放大器低功耗、高效率、大功率的要求,基于 GaN 晶体管 CGH40120F 设计了一款工作在 L 频段,带宽可达 300 MHz 的功率放大器,主要进行了稳定性测试、晶体管阻抗测量、设计功率匹配电路等方面。最终结果显示,放大器工作在 L 频段内,输出功率可达 108 W、附加效率不低于 48%,输入电压驻波比小于 1.5,输入输出阻抗匹配至标准 50  $\Omega$ 。

## 2 放大电路设计

### 2.1 放大器设计思路

射频功率放大器设计不同于低频电路,其需要考虑一些特殊的因素,尤其是入射电压波和入射电流波与有源器件的匹配,以便降低电压驻波系数<sup>[5-6]</sup>。故本文设计时首先设置晶体管的静态工作点以及搭建偏置电路,再进行稳定性分析,让放大器满足绝对稳定条件,继而通过仿真软件测出功率管输入和输出阻抗,并设计得到输入和输出匹配网络;最后加工制作电路板、调试以及优化。

### 2.2 静态工作点

静态工作点决定了放大器工作在何种状态。静态工作点不同的时候,功率管的大信号特性和小信号特性均不相同,在不同的频段下,器件的特性也不一样。所以,依据功率管的电流-电压( $I-V$ )静态曲线在需要的工作频段内选择稳定的静态工作电压和设计偏置网络是十分重要的<sup>[7]</sup>。根据图 1 的  $I-V$  静态曲线,选取漏极电压  $V_{DS} = 28$  V,栅极电压  $V_{GS} = -2.7$  V 作为功率管的静态工作电压。

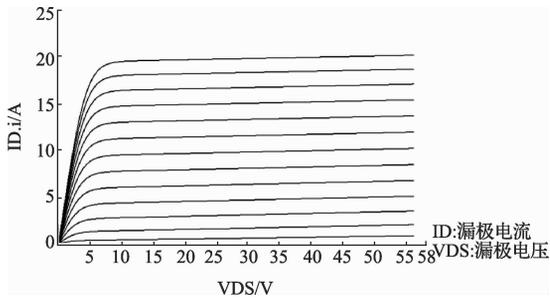


图 1 功率管静态曲线

### 2.3 偏置网络和稳定性设计

选定静态工作点后,接下来设计电路的偏置网络。所设计的偏置网络应该让直流信号顺利从直流源到达功率管漏极和栅极,同时防止因输入阻抗不够大而引起交流功率泄漏,即避免直流偏置电路影响交流电路各部分阻抗特性<sup>[8]</sup>。偏置网络和信号传输线可以视为一个三端口网络。根据式(1),若微带线电长度为 90 度,即微带线长度为射频信号波长的 1/4 时,从射频信号端向直流源看去,理想情况下输出阻抗为  $\infty$ ,从而对射频交流信号起到很好的隔离作用。此时,直流信号可以为晶体管提供偏置电流。

$$Z_{in}(d = \lambda/4) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4})}{Z_0 + jZ_L \tan(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4})} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \quad (1)$$

式中:  $Z_{in}$  是输入阻抗;  $Z_L$  是输出阻抗;  $Z_0$  是微带线特征阻抗。

在设计匹配网络之前,放大器电路还必须满足的首要条件是在整个频段内的稳定性。若功率管在工作频段内处于非稳定状态,射频电路将在某些工作频点产生振荡,将导

致严重的后果。当输入段反射系数  $|\Gamma_{in}| = |\frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}| >$

1,表明电路处于非稳定状态,则有  $\text{Re}(Z_{in}) < 0$ 。据以上分析,增加功率管稳定性的一个方法是在其输入端口串联或并联一个电阻。该电阻必须抵消掉  $\text{Re}(Z_{in})$  的负值成分,从而使得电路达到稳定,且稳定因子大于 1,稳定因子表达式如下:

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}||S_{21}|} > 1 \quad (2)$$

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| < 1 \quad (3)$$

式中:  $k$  是稳定因子,  $S_{ij}$  是为  $S$  参数( $i, j = 1, 2$ )。

在不加任何电路时候,本文所使用的 GaN 功率管不是绝对稳定的,可能存在使电路不稳定的频点,产生自激现象,导致放大器无法正常工作。因此,在实际设计电路中,采用串联电阻的方法。在输入端串联一个 RCL 电路,使得电路在工作频段内达到稳定,得到的稳定系数如图 2。

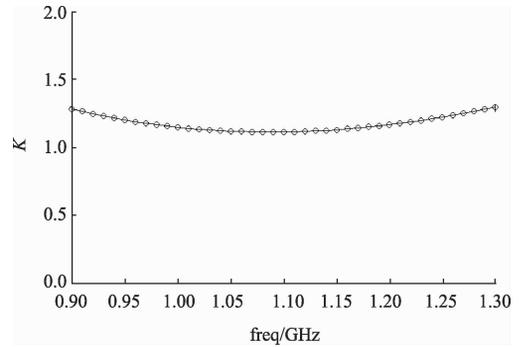


图 2 电路稳定系数  $K$

### 2.4 匹配电路设计

对于功率管而言,要对输入端和输出端分别设计匹配电路。其中输入阻抗匹配网络主要作用是降低射频模块的输入驻波比和增加输出信号的带内平坦度,输出阻抗匹配网络主要作用是降低损耗和高次谐波分量、控制输出功率和效率。在设计阻抗匹配电路时,必须注意避免匹配电路的回波损耗过大,一般设计标准回波损耗  $S_{11}$  和  $S_{22} < -10$  dB。

本设计中带宽  $BW = 300$  MHz,中心频率  $f_c = 1.1$  GHz,其相对工作带宽  $BW/f_c = 27.3\%$ 。射频电路模块的相对工作带宽高于 15% 时,该电路属于宽带模块,所以本设计的匹配电路不能利用简单的窄带阻抗匹配方法设计匹配网络,需要采用多级匹配的宽带阻抗匹配方法设计匹配网络。

根据最大功率传输理论,在源阻抗和负载阻抗互为共轭时,即  $Z_s = Z_{out}^*$  或  $\Gamma_s = \Gamma_{out}^*$ ,实现了最大的功率传输。匹配电路采用多节集总参数元件和分布参数元件混合使用的宽带匹配方法,电路包括若干段串联传输线以及间隔配置的并联电容。电路采用多节网络的优势是降低了 Q 值,扩

展工作频段,从而满足宽带设计要求。

根据以上宽带匹配电路设计分析,同时采用切比雪夫宽带匹配,设计了输入输出阻抗匹配电路,图 3 是输入阻抗

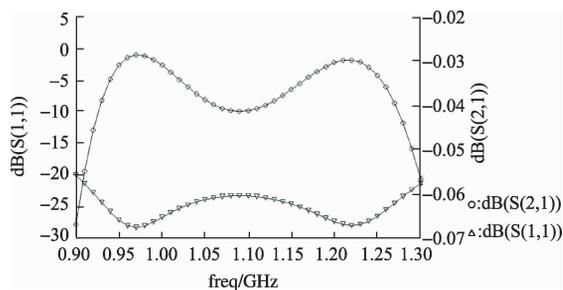


图 3 输入阻抗匹配网络的传输损耗和回波损耗

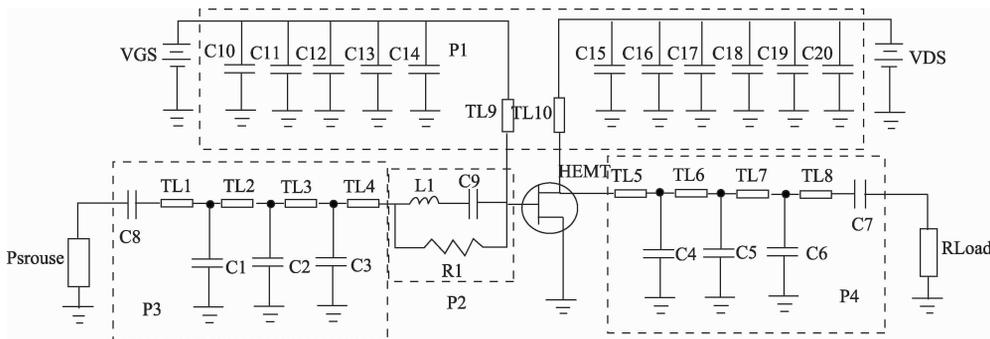


图 4 功率放大器整体电路

## 2.5 实验结果

放大器设计中使用了微带线进行匹配,然而微带线参数及其性能与电路板材、基板厚度、介电常数等因数有关。经过综合考虑,本设计使用 FR-4 板材制作电路板,其中微带线相对介电常数  $E_r$  为 4.2,微带线金属层厚度  $T$  为 2.8 mil,基板厚度  $H$  为 33.6 mil,阻抗匹配电路中使用 ATC 公司生产的型号为 600f/600s 系列高 Q 值 NPO 介质射频电容。

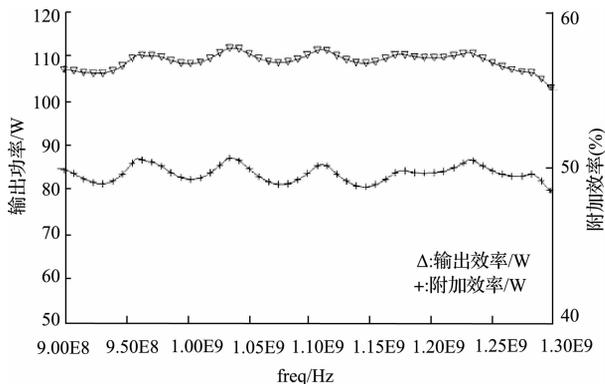


图 5 输出功率和附加效率

图 5 为在栅极工作电压  $-2.7$  V,漏极工作电压 28 V,

匹配网络的传输损耗和回波损耗曲线。其中传输损耗  $S(2,1)$  接近于 0 dB,说明该匹配网络为无损耗网络,很大程度上并不消耗功率。

将输入输出阻抗匹配电路设计好之后,并将之前设计的偏置电路、稳定电路与功率管级联,形成最终的放大器整体电路如图 4。其中虚线框 P1 为偏置电路,其中 TL9 和 TL10 为  $1/4$  波长微带线,起到了阻抗变换作用,偏置电路中的旁路电容的主要作用是滤波,滤除直流源中毛刺<sup>[9]</sup>。P2 是稳定电路,是功率管在全频段内工作在绝对稳定的状态。P3 和 P4 分别是输入输出阻抗匹配电路,将晶体管的输入阻抗和输出阻抗匹配值标准参数阻抗  $50 \Omega$ ,并使得晶体管达到最大输出功率和附加效率,同时具有较好的输出平坦度和线性度。

输入信号为 35 dBm 的连续波(CW)条件下,放大电路在 L 频段的输出功率和附加效率在 300 MHz 工作频段内,输出功率在 50.4 dBm(110 W)左右,平坦度为  $\pm 0.1$  dB,附加效率  $> 48\%$ 。

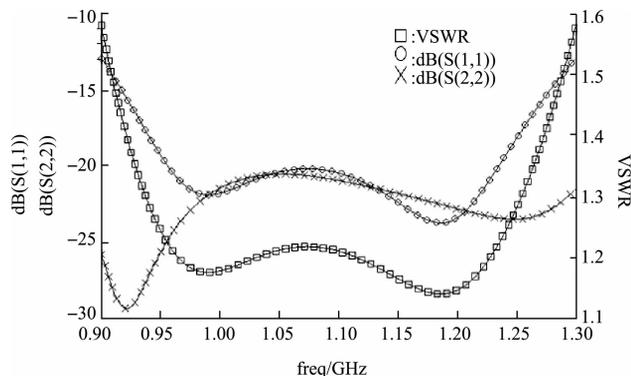


图 6 功率放大器小信号测试结果

图 6 数据表明了功率放大器的小信号测试指标。可看出输入端回波损耗  $S_{11}$  和输出端回波损耗  $S_{22}$  参数在 0.95~1.25 GHz 全频段内均小于  $-20$  dB,达到一般设计所要求小于  $-10$  dB 的标准。放大电路的输入电压驻波比(VSWR)全频段内小于 1.5,表明反射的功率较少。

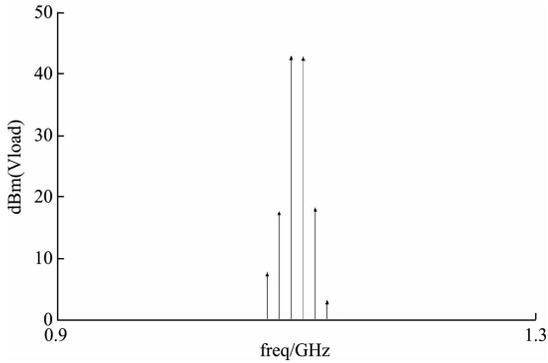


图 7 谐波分量

图 7 为对放大器进行了双音信号测试的三阶互调分量和五阶互调分量。在输入信号为 30 dBm 且中心频率为 1.1 GHz 的双音连续波 (CW) 条件下,其三阶互调抑制为 25 dBc,五阶互调抑制接近 40 dBc,该数据表明射频电路具有良好的线性度指标。若要继续提高电路的线性度,可采用预失真等线性化方案<sup>[10]</sup>。

### 3 结 论

本文用第三代半导体材料 GaN 宽禁带功率器件设计了一款工作在 L 频段的大功率高效率功率放大器。先对功率管直流测试,确定其静态工作点,再设计偏置电路和稳定电路,确保功率管在整个频段内均处于绝对稳定,以免产生自激震荡等严重后果。并使用源牵引和负载牵引技术设计输入输出阻抗,再采用微带线和电容结合的方式设计宽带阻抗匹配网络。本文基于 GaN 功率管设计的射频宽带功率放大器具有宽带宽、高效率、高线性度、大功率等特点,符合当今大容量、高传输速率无线通信系统的要求。

### 参考文献

- [1] GUSTAFSSON D, ANDERSSON C M, HELLBERG R, et al. A 44 dBm 1.0 - 3.0 GHz GaN power amplifier with over 45% PAE at 6 dB back-off [C]. Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International, IEEE, 2013: 1-4.
- [2] ARNOUS M T, BATHICH K, PREIS S, et al. 100 W

highly efficient octave bandwidth GaN-HEMT power amplifier [C] // 2012 19th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), IEEE, 2012, 1: 289-292.

- [3] 林茂六. 射频微波功放器件非线性记忆效应测量与行为建模技术的新进展 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014(2): 113-122.
- [4] ARNOUS M T, SAAD P, PREIS S, et al. Highly efficient and wideband harmonically tuned GaN-HEMT power amplifier [C] // 2014 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON), IEEE, 2014: 1-4.
- [5] JARDEL O, OLIVIER M, LANCEREAU D, et al. A 30W, 46% PAE S-band GaN HEMT MMIC power amplifier for Radar applications [C] // Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2012 7th European, IEEE, 2012: 639-642.
- [6] SAAD P, FAGER C, CAO H, et al. Design of a highly efficient 2 - 4-GHz octave bandwidth GaN-HEMT power amplifier [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(7): 1677-1685.
- [7] 张方迪, 张民, 叶培大. 一种 GaN 宽禁带功率放大器的设计 [J]. 现代电子技术, 2010, 33(13): 45-47.
- [8] 曹雄斐, 杨维明, 张瑞, 等. 基于 ADS 的 LDMOS 功率放大器设计与仿真 [J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2014, 36(4): 317-322.
- [9] 薛鹏, 彭黎辉. 杂散电容对交流法微电容测量电路噪声特性影响的分析 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 284-288.
- [10] 菊卫东, 汪蕾, 王宇明, 等. 星用 S 频段 20W 高增益线性化功率放大器的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014(8): 850-856.

### 作者简介

张忍, 1991 年出生, 硕士生在读, 天津大学电子信息工程学院, 主要研究射频电路设计, 嵌入式电路设计等。

E-mail: zrzy@tju.edu.cn