

射频功率放大器稳定性的分析与设计

韩 月^{1,2}, 丛密芳¹, 李 科¹, 杜 寰¹

(1 中国科学院 微电子研究所 新技术开发部, 北京 100029;

2 中国科学院大学, 北京 101408)

摘 要: 射频功率放大器的稳定性极大的影响了通信系统性能的可靠性, 是通信系统中的重要组件. 基于自主研发的 RF-LDMOS 器件, 利用 ADS 软件设计了一款射频功率放大器, 并研究了其稳定性. 采用在栅极增加 R-C 并联电路的方法, 改善功率放大器在 100~200 MHz 之间的稳定性. 实验结果表明, R-C 并联网络的阻抗在低于转折频率时为电阻型, 高于转折频率时为电容型, 因此在低频可以降低不需要的增益, 而对工作频带内的增益和驻波性能没有明显影响. 改善后的功率放大器在 100~200 MHz 频段增益达到 17.4 dB 以上, 可稳定输出 37.4 dBm 以上功率.

关键词: 射频功率放大器; RF-LDMOS; 稳定性; R-C 并联电路

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)10-0072-03

The Study and Design of the Stability of RF Power Amplifier

HAN Yue^{1,2}, CONG Mi-fang¹, LI Ke¹, DU Huan¹

(1 The New Technology Development Department, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: The RF Power Amplifier is an important component, whose stability can greatly affect the reliability of the communication system. Based on the self-designed RF-LDMOS device, a RF power amplifier was designed by ADS and its stability was studied. The R-C parallel circuit was added in the gate to improve the stability of the power amplifier in the 100MHz-200MHz band. Experience shows that the R-C parallel circuit performed as resistance when the frequency was under the transition frequency and performed as capacitance to the contrary. As a result, the R-C parallel circuit can effectively reduce the gain in low frequency with having no influence in the working frequency. The improved power amplifier has a stable gain of more than 17.4 dB in the 100 MHz-200 MHz band, and the output power of over 37.4 dBm.

Key words: RF power amplifier; RF-LDMOS; stability; The R-C parallel circuit

1 引言

射频功率放大器广泛应用于通信系统, 是实现信号放大功能的重要组件. 它的研制需要满足各项指标, 其中稳定性是非常重要的一环. 射频功率放大器作为高频信号放大器, 其内部无源元件的寄生效应已经比较明显; 同时信号在放大器内部传输时, 也存在信号源阻抗或负载阻抗与放大器网络不匹配的情况. 受这些因素的影响, 射频功率放大器很容易形成正反馈导致自激振荡, 甚至会导致设备损坏. 因

此在设计放大器时, 需要提前对射频功率放大器的稳定性进行分析与判定, 避免不必要的损失^[1]. 本文研究了稳定性判定理论^[2], 基于中科院微电子所自主研发的 RF-LDMOS 设计了一款射频功率放大器^[3], 同时采用了栅极并联 R-C 电路的方法改善功率放大器的稳定性.

2 稳定性的基本理论

2.1 稳定性判定圆

功率放大器可通过图 1 的示意图来分析, 其中

Γ_S 是信号源反射系数, Γ_{in} 是输入反射系数, Γ_{out} 是输出反射系数, Γ_L 是负载反射系数。

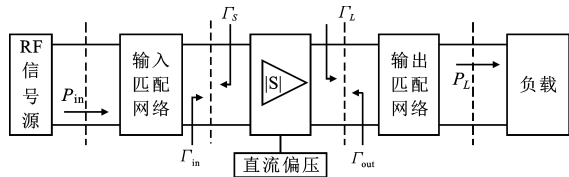


图1 单级功率放大器示意图

功率放大器稳定意味着反射系数的模小于1, 根据反射系数与S参数关系, 可以得出:

$$|\Gamma_L| < 1 \quad (1)$$

$$|\Gamma_S| < 1 \quad (2)$$

$$|\Gamma_{in}| = \left| \frac{S_{11} - \Gamma_L \Delta}{1 - S_{22} \Gamma_L} \right| < 1 \quad (3)$$

$$|\Gamma_{out}| = \left| \frac{S_{22} - \Gamma_S \Delta}{1 - S_{11} \Gamma_S} \right| < 1 \quad (4)$$

式中, $\Delta = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21}$, 将以上式中所有参数改写成复数形式, 可导出输出端口稳定性判定圆和输入端口稳定性判定圆。以输出端为例, 如图2所示输出端稳定性判定圆: 如果 $\Gamma_L = 0$, 则 $|\Gamma_{in}| = |S_{11}|$, 因此在 $|S_{11}| < 1$ 时, 原点 ($\Gamma_L = 0$ 点) 为稳定区的一部分。同理可得输入端稳定性判定圆。

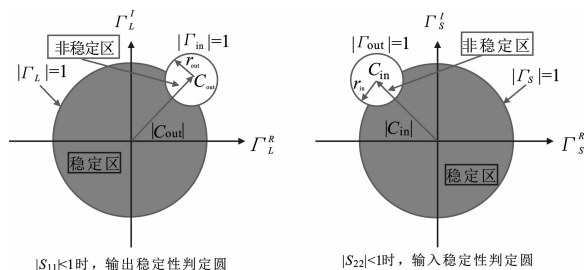


图2 稳定性判定圆及稳定区域

2.2 绝对稳定性条件

由图2可知, 在 $|S_{11}| < 1$ 和 $|S_{22}| < 1$ 的情况下, 当 $||C_{in} - r_{in}| > 1$, $||C_{out} - r_{out}| > 1$ 时, 放大器绝对稳定。由此导出稳定性因子 K 和 B_1 , 即当 $K > 1$ 和 $B_1 > 0$ 同时成立, 则满足绝对性稳定条件:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2 |S_{12}| |S_{21}|} > 1 \quad (5)$$

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 > 0 \quad (6)$$

另一种绝对稳定条件是表征史密斯圆图的原点至 Γ_L 或 Γ_S 平面上稳定性判别圆的最小距离, 分别表示为 μ 因子和 μ' 因子, 即 $\mu > 1$ 或 $\mu' > 1$ 时, 满足绝对性稳定条件:

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - S_{11}^*| + |S_{12} S_{21}|} > 1 \quad (7)$$

$$\mu' = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - S_{22}^*| + |S_{12} S_{21}|} > 1 \quad (8)$$

3 稳定功率放大器的方法

由上文得知, 射频功率放大器在反射系数大于1的情况下处于不稳定的状态。已知 $\Gamma_{in} > 1$, $\Gamma_{out} > 1$ 可以改用输入输出阻抗表达:

$$|\Gamma_{in}| = \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| > 1 \quad (9)$$

$$|\Gamma_{out}| = \left| \frac{Z_{out} - Z_0}{Z_{out} + Z_0} \right| > 1 \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可以看出非稳定状态有 $\text{Re}\{Z_{in}\} < 0$ 和 $\text{Re}\{Z_{out}\} < 0$ 。因此, 可以通过在不稳定端口增加一个串联或者并联电阻来改变网络的稳定性。如在栅极串联一个电阻, 这种方式可以使器件在所有频率上稳定, 但同时会降低所有频率的增益^[4]。因此可以考虑在电阻端串并联电容电感, 来改善稳定电路的频率特性, 如图3中。

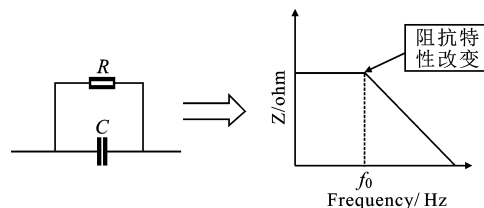


图3 栅极R-C并联稳定电路及其阻抗特性

图3表示, 对于R-C并联电路具有这样的阻抗特性: 令电阻阻抗和电容阻抗绝对值相等, 求出 f_0 即为此电路的转折频率。当输入信号频率小于 f_0 时, 电路呈现电阻性, 在功率放大器的栅极可以降低反馈引起的增益, 改善稳定性; 当输入信号频率大于 f_0 时, 电路呈现电容性, 因此电路对高频处的增益影响较小。

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (11)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (12)$$

4 射频功率放大器稳定性设计

基于中科院微电子研究所自主研发的RF-LDMOS器件设计了一款射频功率放大器, 在器件的栅极加入了R-C并联稳定电路。该器件型号为WX05, 工作在 $V_{DS} = 7.5 \text{ V}$, $V_{GS} = 2.2 \text{ V}$ 的状态下。经过实测并利用ADS软件的S参数去嵌入功能, 可以得到器件的小信号S参数^[5]。该放大器电路仿真原理图如图4所示, 对其进行稳定性仿真分析^[6]。

研究图4中LDMOS器件栅端的 R_s 和 C_s 组成

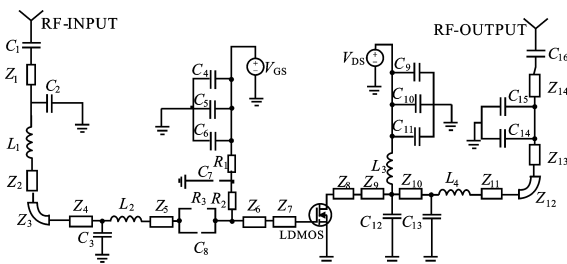


图4 射频功率放大器电路仿真原理图

的并联电路对功率放大器稳定性的影响。

首先,去掉电路中的栅极 $R-C$ 并联电路,仿真结果如图5所示。在 $100 \sim 200$ MHz 频段内, $K < 1$ 同时 $B_1 > 0; \mu < 1$, 放大器不能绝对稳定。同时频率越低, K 因子和 μ 因子越小。在输出稳定性判定圆上可以看出:随着频率越高,稳定性判定圆越远离史密斯圆图,意味着放大器越趋于稳定,与 K 因子, μ 因子曲线相互照应。

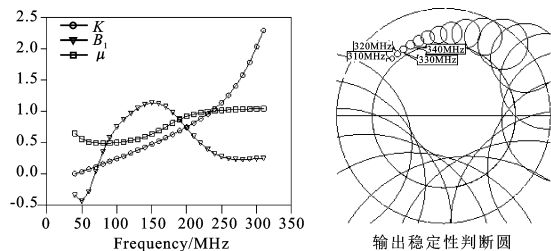


图5 无栅极稳定电路的稳定性仿真结果

固定 C_8 电容值为 47 pF , 改变不同的 R_3 电阻值, 研究电阻值改变对稳定电路效果的影响。图6中 B_1 因子显示在 $100 \sim 200$ MHz 之间 $B_1 > 0$ 始终成立, 所以只需要研究 K 因子在所需频段内是否大于1即可。由图6中的 K 因子可以看出: $R_3 = 10 \Omega$ 时, 电阻值太小, 降低增益效果不明显, K 因子在 $100 \sim 200$ MHz 频段内存在小于1的部分, 不能绝对稳定; R_3 增大到 50Ω , 放大器可以绝对稳定; 继续增大 R_3 的电阻值到 100Ω , K 因子又开始出现小于1的部分。这是由于电阻值增大降低增益, 降低 f_0 这两方面影响, 而 f_0 过低则无法改善大于 f_0 频段的振荡, 因此电阻值不应过大。

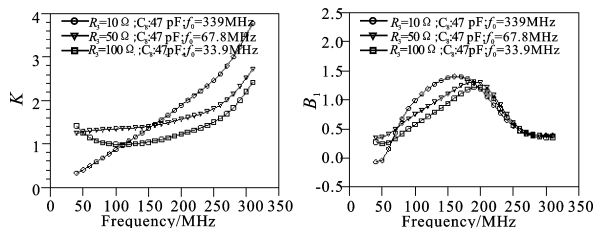


图6 固定电容值, 改变电阻值仿真结果

最后, 固定 R_3 电阻值为 50Ω , 改变 C_8 电容值大

小研究其对稳定性的影响。结果如图7, $B_1 > 0$ 始终成立, 所以只需要研究 K 因子在所需频段内是否大于1即可。由图7的 K 因子可以看出: 当电容值过大时, f_0 过小, 则高于 f_0 频段的增益无法通过电阻降低, 其稳定性无法改善; 电容值过小时, 由于 f_0 过大, 则在所需要的频段内 $R-C$ 电路均表现为电阻, 导致放大器增益降低过多, 影响放大器性能。

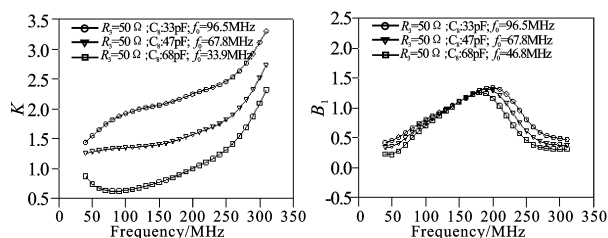
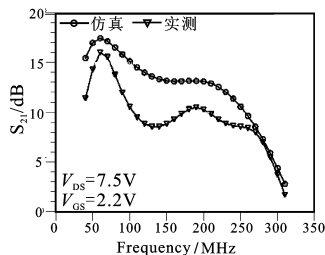
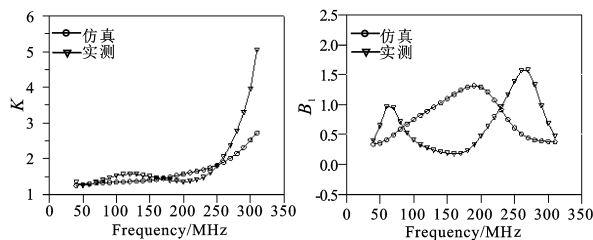


图7 固定电阻值, 改变电容值仿真结果

5 射频功率放大器实物测试

使用图4的仿真电路图设计PCB板, 实现射频功率放大器功能, 验证栅极 $R-C$ 并联电路对射频功率放大器的稳定效果。仿真与实测的 S 参数对比如图8, K 因子、 B_1 因子对比如图9。

图8 仿真与实测 S_{21} 对比图9 仿真与实测 K 因子对比

由图8图9中可知, 设计的功率放大器与软件仿真小信号 S 参数的趋势以及 K 因子的趋势相同; K 因子在所需频段内大于1, 同时 B_1 因子在所需频段内大于0, 因此功率放大器绝对稳定。仿真与实测二者之间的差异主要是由电容电感元件的误差值以及焊接引入的寄生参数导致的。

(下转第79页)

Systems, 2016, 30(2):735-746.

[6] Huang V L, Suganthan P N, Liang J J, Comprehensive learning particle swarm optimizer[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2006, 21(2): 209-226.

[7] Zhang Q, Li H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm[J]. IEEE Transactions on evolutionary computation, 2007, 11(6): 712-731.

[8] Chen J, Lin Q, Ji Z, A hybrid immune multi objective optimization algorithm[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 204(2): 294-302.

[9] Martlnez S Z, Coello C C A, A multi-objective particle swarm optimizer based on decomposition[C]//Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation. Dublin, Ireland, ACM, 2011: 69-76.

[10] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on evolutionary computation, 2002, 6(2): 182-197.

[11] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.

作者简介:

陈跃刚 男, (1977-), 博士(后), 副教授, 硕士生导师. 研究方向为决策优化、城市经济.

许 奕(通讯作者) 男, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为多目标进化算法及应用. E-mail: xuyi0100@126.com.

(上接第 74 页)

通过实测验证,设计的射频功率放大器性能见表 1. 在 100~200 MHz 可稳定输出 37.4 dBm 以上功率值,增益达到 17.4 dB 以上,效率 57% 以上. 实验表明栅极 R-C 并联电路可有效改善射频功率放大器的稳定性,符合设计预期.

表 1 射频功率放大器实测性能

参数	138 MHz	157 MHz	172 MHz
输出功率/dBm	37.4	37.5	38.4
增益/dB	17.4	17.5	18.4
漏极效率/%	57.7	61.0	68.3

6 结束语

本文研究了射频功率放大器的稳定性判定理论,并通过仿真和实例对其判据进行了验证;同时研究了栅极 R-C 并联电路作为稳定电路的阻抗特性,通过控制变量法分别研究了不同电阻值与不同电容值对稳定电路作用的影响,并引入了 R-C 并联电路的转折频率 f_0 用来分析 R-C 稳定电路的特性. 通过研究可知:转折频率 f_0 决定了 R-C 电路的阻抗特性,从而影响着此类稳定电路的稳定效果,对射频功率放大器稳定性电路的设计具有指导意义.

研究中忽略了加入 R-C 并联电路后对匹配电路的影响,实际应用中需要将此方面纳入考虑中.

参考文献:

[1] 吕剑锋,孙虹. 射频功率放大器的稳定性分析[J]. 国外电子测量技术, 2005, 24(7): 11-14.

[2] Reinhold Ludwig, Gene bogdanov. RF circuit design-theory and applications[M]. 2 nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.

[3] 王帅. RF-LDMOS 器件研究和功率放大器设计[D]. 北京:中国科学院微电子研究所, 2013.

[4] 马立宪. LDMOS 微波宽带功率放大器设计[D]. 安徽:安徽大学, 2011.

[5] Glenn Collinson, Marty Jones. A novel technique for measuring small signal S-parameters of an RF/microwave transistor, power amplifying stage for use in power amplifier stability analysis[J]. International Microwave Symposium Digest, 1993(3): 1255-1258.

[6] 徐兴福. ADS2011 射频电路设计与仿真实例[M]. 北京:电子工业出版社, 2014.

作者简介:

韩 月 男, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为 LDMOS 射频功率放大器设计. E-mail: hanyue@ine.ac.cn.

丛密芳 男, (1984-), 助理研究员. 研究方向为 LDMOS 射频功率放大器设计.

李 科 男, (1977-), 高级工程师. 研究方向为 LDMOS 射频功率放大器设计.

杜 寰 男, (1963-), 研究员. 研究方向为存储器驱动电路、平板显示驱动电路、功率器件等.