

文章编号:1001—893X(2010)03—0059—05

ISM 频段射频放大的小信号分析*

黄玉兰

(西安邮电学院 电子与信息工程系,西安 710121)

摘 要:为解决 ISM 频段小信号放大器降低失配与减小噪声之间的矛盾,提出了一种改善放大器性能的分析方法,满足信源、晶体管与负载三者之间的失配程度在受限条件下增益和噪声的最优化。指出增益、驻波比和噪声多个性能参数不能同时达到最优,提出了提高射频放大器综合性能的方法。在 2.4 GHz 的 ISM 频段进行的仿真结果表明,驻波比越小,增益越大,噪声系数受失配限制的影响,在满足增益的条件下失配受限会使噪声系数增大。

关键词:ISM 频段;射频低噪声放大器;有效增益;失配限制;匹配网络

中图分类号:TN850.8 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001—893x.2010.03.013

Small Signal Analysis of RF Amplifier at ISM Band

HUANG Yu-lan

(Department of Electronic and Information Engineering, Xi'an University of
Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: To resolve the conflict between decreasing mismatch and diminishing noise at ISM band, a method for improving amplifier performance of small signal is proposed to implement the optimal gain and noise, satisfying the mismatch limit between source and transistor as well as between transistor and load termination. It is pointed out that the parameter of gain, VSWR and noise are impossible to be optimal simultaneously. The method for improving the comprehensive performance of RF amplifier is proposed. The amplifier is simulated at ISM band of 2.4GHz, and the results show that the smaller the VSWR is, the larger the gain is the noise figure is affected by limitation of mismatch, and the limitation of mismatch will cause the increasing of noise figure under the target gain.

Key words: ISM band; RF low-noise amplifier; effective gain; mismatch constraint; matching network

1 引 言

在无线通信领域,由于 ISM 频段全球无需许可证,现在物联网 RFID、无线局域网(WLAN)、蓝牙(Bluetooth)和紫蜂(ZigBee)等均工作在 2.4 GHz 的 ISM 频段。随着无线通信技术的不断发展,ISM 频段射频前端技术已经成为通信和电子领域的一项关键技术^[1-2]。小信号放大作为射频电路的核心内容,是值得深入研究的课题。小信号放大在无线接收系统中处于射频前端,主要作用是在低噪声前提

下放大接收到的微弱信号,射频放大的小信号分析对整个接收系统至关重要。但是,目前对小信号放大的研究主要集中在给定指标下射频电路的设计^[3-4],缺乏对各项参数变化规律的研究。本文在失配受限的前提下分析了增益、稳定性和噪声系数的变化规律,给出了提高小信号放大综合性能的方法,这对射频小信号放大是非常实际的问题。

本文首先分析了射频小信号放大的设计理论,然后对小信号放大的参数进行分析,给出了单项参

* 收稿日期:2009—12—28;修回日期:2010—03—03

数达到最优的条件,提出了各项参数的变化规律,给出了仿真曲线和仿真结果分析,为改善小信号放大器的综合性能提出了一种新的途径。

2 射频小信号放大器

射频小信号放大器的一般框图如图 1 所示,在射频源与晶体管之间有输入匹配网络(IMN),在晶体管与负载之间有输出匹配网络(OMN),放大器根据技术指标确定匹配网络的物理结构和电参数,匹配网络可以由分布参数、混合参数或集总参数元件构成^[5-6]。

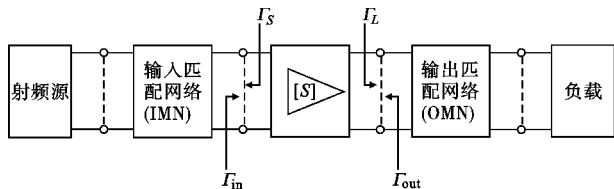


图 1 射频前端小信号放大器的框图

Fig. 1 Block diagram of small signal amplifier at RF front end

射频小信号放大器需要考虑稳定性,稳定性是指放大器抑制环境的变化(如信号频率、温度、源和负载等变化时)。维持正常工作特性的能力,可以用图解法或解析法判定放大器的稳定性,解析法是计算稳定性因子。

射频放大器的转换功率增益为

$$G_T = G_S G_0 G_L \tag{1}$$

式中, $G_S = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - \Gamma_m \Gamma_S|^2}$ 为输入匹配网络的有效增益, $G_0 = |S_{21}|^2$ 为晶体管的增益, $G_L = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2}$ 为输出匹配网络的有效增益。射频放大器的增益不仅与晶体管参数有关,而且与匹配网络的选择有关^[7]。

对小信号放大器来说,噪声的存在对整个设计有重要影响,在低噪声的前提下对信号进行放大是对放大器的基本要求。

信源与晶体管之间及晶体管与负载之间的失配程度用输入和输出电压驻波比来描述,很多情况下放大器的驻波比必须保持在特定指标之下。放大器的输入和输出电压驻波比为

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{1 - M}}{1 - \sqrt{1 - M}} \tag{2}$$

式中, M 为源或负载的失配因子。

3 参数分析方法

本文在复平面上利用圆图对小信号放大器的参数进行分析,指出增益、驻波比和噪声多个性能参数不能同时达到最优,给出了单项参数达到最优的条件,提出了提高小信号放大器综合性能的方法。

3.1 单项参数的分析

增益与输入和输出匹配网络均有关。当 $\Gamma_{in} = \Gamma_S^*$ 、 $\Gamma_{out} = \Gamma_L^*$ 时,晶体管既能从源获得最大输入功率,又能输出给负载最大功率,放大器可以实现最大增益。

噪声系数仅与输入匹配网络有关。噪声系数可以表示为

$$F = F_{min} + \frac{R_n}{G_S} |Y_S - Y_{opt}|^2 \tag{3}$$

当源的反射系数 $\Gamma_S = \Gamma_{opt}$ 时, $F = F_{min}$, 噪声系数最小。

驻波比与输入和输出匹配网络均有关,是源失配因子和负载源失配因子的函数。放大器输入和输出反射系数与源和负载失配因子的关系为

$$|\Gamma_a| = \sqrt{1 - \frac{(1 - |\Gamma_S|^2)(1 - |\Gamma_{in}|^2)}{|1 - \Gamma_{in} \Gamma_S|^2}} \tag{4}$$

$$|\Gamma_b| = \sqrt{1 - \frac{(1 - |\Gamma_L|^2)(1 - |\Gamma_{out}|^2)}{|1 - \Gamma_L \Gamma_{out}|^2}} \tag{5}$$

3.2 多个参数的综合分析

采用圆图图解的方法设计放大器,步骤如下:

(1)在复平面画出等增益曲线。当晶体管单向时,输入匹配网络的等效增益和输出匹配网络的等效增益无关,输入匹配网络的等增益曲线为

$$\left| \Gamma_S - \frac{g_S S_{11}^*}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_S)} \right| = \frac{\sqrt{1 - g_S} (1 - |S_{11}|^2)}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_S)} \tag{6}$$

输入等增益曲线为圆,增益值越大圆半径越小,最大增益时等增益圆半径为零。输出匹配网络的等增益曲线同样也是一个圆。分配输入和输出匹配网络的有效增益,然后在史密斯圆图上给出等增益曲线,在等增益曲线上选反射系数,进而确定在复平面上的位置;

(2)噪声系数仅与输入匹配网络有关,在复平面等噪声曲线的方程为

$$\left| \Gamma_S - \frac{\Gamma_{opt}}{1 + N} \right| = \frac{\sqrt{N(N+1) - N|\Gamma_{opt}|^2}}{N+1} \tag{7}$$

等噪声系数曲线为圆,噪声系数越大圆的半径越大,

噪声系数最小时在史密斯圆图上缩为一个点。在等噪声系数曲线内选源反射系数,并注意选点落在等增益曲线上;

- (3)计算稳定性因子;
- (4)计算输入与输出驻波比;
- (5)若输入与输出驻波比以及稳定性因子不满足指标要求,重复步骤 2、3 和 4 以满足指标要求;
- (6)当复平面上反射系数的位置确定后,确定电路结构。

4 仿真结果

4.1 晶体管的参数

晶体管采用 hp-AT32011,在设计放大器时,首先需要对晶体管的参数进行仿真,晶体管 AT32011 的 S 参数仿真曲线如图 2 所示,仿真曲线的频率范围为 100 MHz~5.1 GHz。在 2.4 GHz 时,晶体管的 $S_{11} = 0.480 \angle 176^\circ$,表明输入端匹配很差; $\text{dB}(S_{12}) = -18.862$,表明单向性较好; $\text{dB}(S_{21}) = 6.769$,这是晶体管的增益,放大器的增益还需计入输入和输出匹配网络的等效增益; $S_{22} = 0.540 \angle -57^\circ$,表明输出端匹配较差。对噪声系数仿真,在 2.4 GHz 晶体管的噪声系数为 2.047。

4.2 放大电路的构成

采用单支节匹配网络,微带线基板的厚度为 0.8 mm,基板的相对介电常数为 4.3,基板的相对磁导率为 1,基板的损耗角正切为 0.001,微带线导体层的厚度为 0.03 mm,导体的电导率为 $5.88\text{E}+7$,微带线表面粗糙度为 0 mm。同时添加输入和输出匹配网络,放大电路如图 3 所示。

4.3 仿真结果

在本文的仿真中,放大器的中心频率为 2.43 GHz,带宽为 6 MHz,系统的特性阻抗为 $50\ \Omega$ 。在 3 种状态下进行仿真,这 3 种状态放大器的失配不同,在中心频率处,第一种状态的输入驻波比选为 1.941,第二种状态的输入驻波比选为 1.570,第三种状态的输入驻波比选为 1.376。放大器增益仿真曲线如图 4 所示,标记 $m1$ 、 $m2$ 和 $m3$ 所在的增益曲线分别对应第一种、第二种和第三种失配状态。放大器噪声系数仿真曲线如图 5 所示,标记 $m4$ 、 $m5$ 和 $m6$ 所在的噪声系数曲线分别对应第一种、第二种和第三种失配状态。放大器稳定性因子仿真曲线如图 6 所示,标记 $m7$ 、 $m8$ 和 $m9$ 所在的稳定性因子曲线

分别对应第一种、第二种和第三种失配状态。

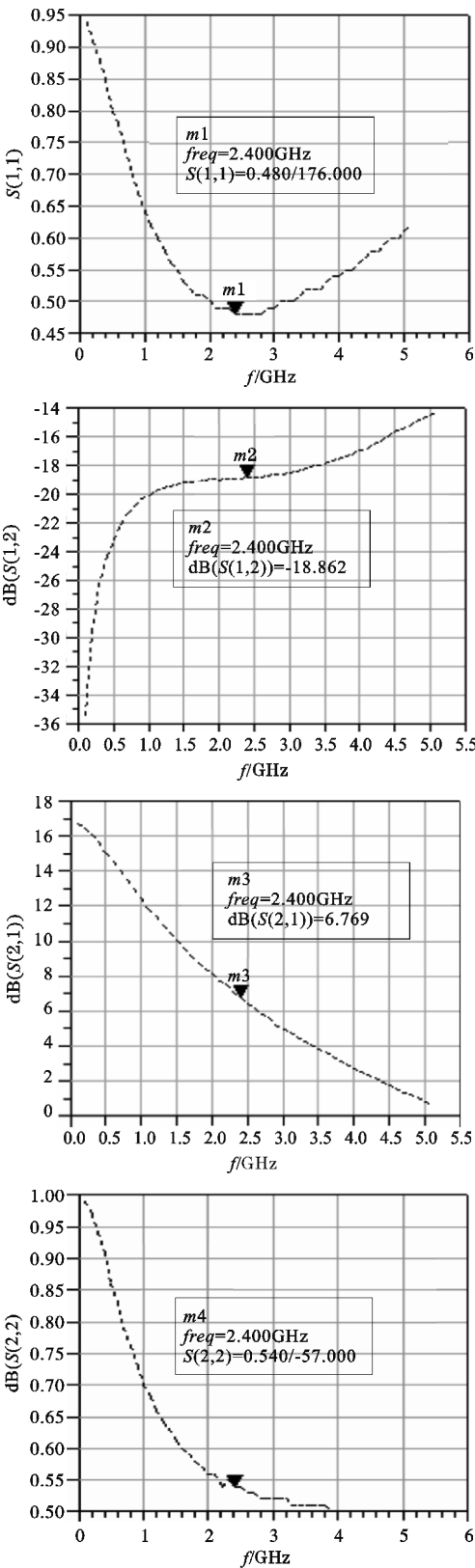


图 2 晶体管的 S 参数
Fig. 2 S parameter of transistor

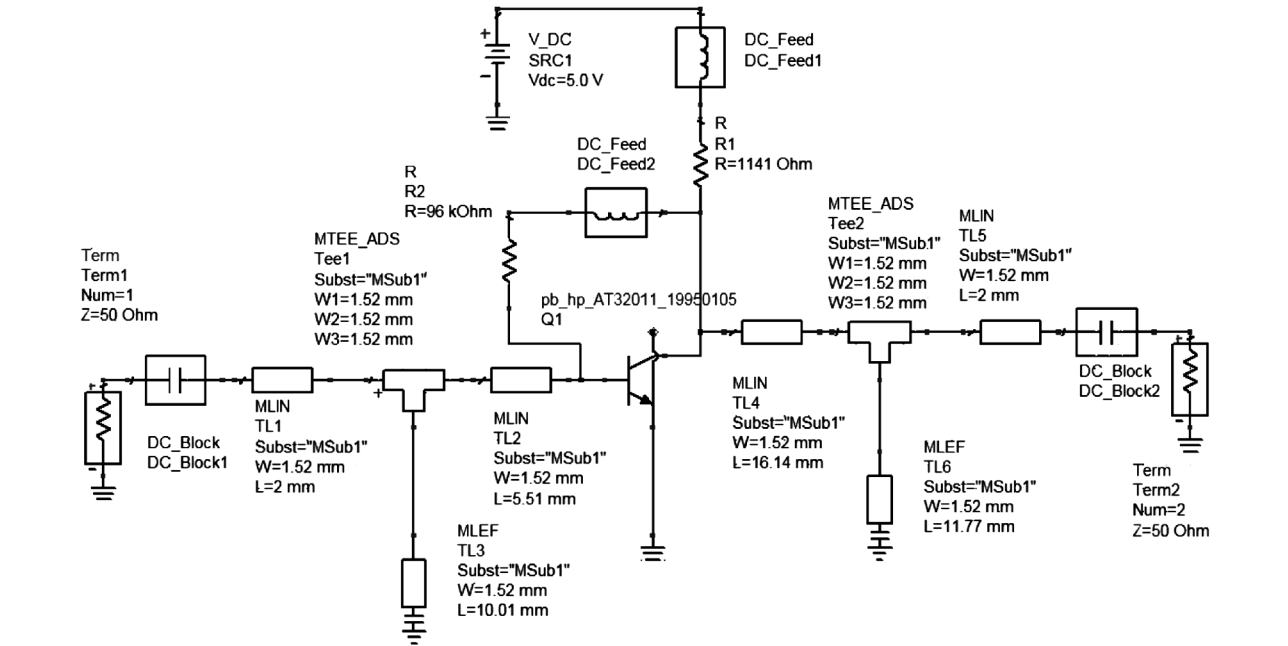


图 3 单支节匹配的放大电路

Fig. 3 Circuit diagram of amplifier with single stub match

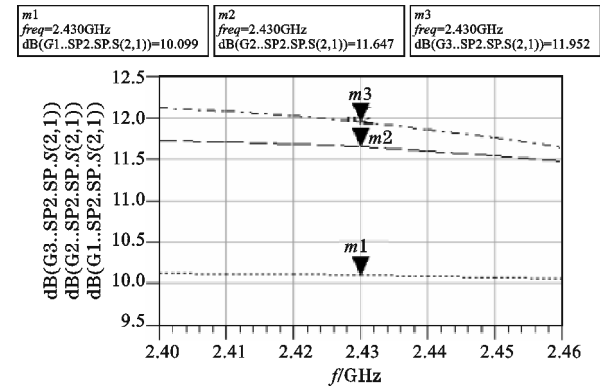


图 4 放大器的增益

Fig. 4 Gain of amplifier

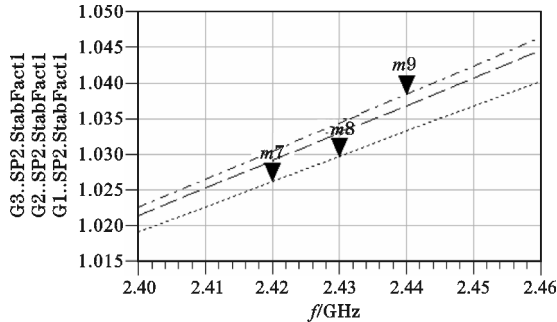


图 6 放大器的稳定性因子

Fig. 6 Stability factor of the amplifier

本文的研究结果如下：

(1)本文在失配受限的前提下分析了小信号放大各项参数的变化规律,失配状态通过输入驻波比来表示,驻波比越大失配越大。本文考察了 3 种失配状态,第一种状态输入端匹配最差、失配最大,第三种状态输入端匹配最好、失配最小；

(2)在 3 种失配的状态下,对增益和噪声系数进行仿真。由图 4 可以看出,放大器的增益与失配有关,失配越小增益越大。由图 5 可以看出,噪声系数也与失配有关,失配越小噪声系数越大。增益与噪声系数是小信号放大的两个重要参数,上述仿真的结果说明两者的变化趋势相反,两者的参数不能同时达到最优。失配也是小信号放大的一个重要参数,上述仿真的结果还说明,失配与增益的变化趋势

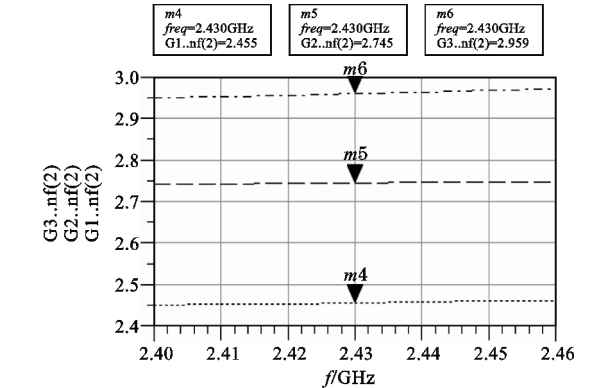


图 5 放大器的噪声系数

Fig. 5 Noise figure of amplifier

相同,失配与噪声系数的变化趋势相反;

(3)由于反射波的存在,射频放大在某些终端条件或工作频率有产生振荡的倾向,射频放大器需要考虑稳定性。由图6可以看出,在3种失配状态下,放大器均绝对稳定,说明小信号时放大器容易保持稳定。稳定性可以用稳定性因子来表示,仿真结果还说明失配越小稳定性越高;

(4)由上述仿真结果可以看出,在设计小信号放大器时,可以根据给定的某一设计指标,仿真其它参数的变化范围,由此判断器件选取正确与否,并能在选定器件后提高小信号放大的综合性能;

(5)现在对小信号放大的研究,主要集中在给定指标下射频电路的结构设计,缺乏对各项参数变化规律的研究。本文分析了失配、增益、稳定性和噪声系数的变化规律,对小信号放大的设计具有普遍指导意义。

5 结 论

本文对ISM频段射频放大的小信号特性进行了分析,给出了一种ISM频段射频放大的实现途径,提出了提高放大器综合性能的设计方法。通过在复平面上利用圆图对小信号放大器的参数进行分析,得到了各项参数的变化规律。仿真结果表明,匹配网络同时对驻波比、增益、噪声系数和稳定性因子有影响,失配与增益的变化趋势相同,失配与噪声系数的变化趋势相反,小信号时放大器容易保持稳定,失配越小稳定性越高。目前对小信号放大的研究偏重于射频电路的结构设计,缺乏对各项参数变化规律的研究,本文的研究结果对提高小信号放大的综合性具有指导作用。在研究小信号放大时,如果将射频电路的结构尺寸、实现难易与各项参数的变化规律结合起来研究,将更具实际意义,这将是下一步的研究工作。

参考文献:

- [1] Yoon S W. Static and Dynamic Error Vector Magnitude Behavior of 2.4GHz Power Amplifier[J]. IEEE Transactions on Microwave, Theory and Techniques, 2007,55(4):643-647.
- [2] Green D B, Obaidat A S. An Accurate Line of Sight Propagation Performance Model for Ad-hoc 802.11

Wireless LAN Devices [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. [S. l.]: IEEE,2002:3424-3428.

- [3] 陈胜利,陈勋祥,白欣松. 蓝牙接收端低噪声放大器设计[J]. 科学与工程技术,2006(1):15-21.
CHEN Sheng-li, CHEN Xun-xiang, BAI Xin-song. Bluetooth Receiver Design for a Low Noise Amplifier [J]. Journal of Science and Engineering Technology, 2006(1):15-21. (in Chinese)
- [4] 许志兵. 利用ADS设计低噪声放大器[J]. 武汉理工大学学报,2006(11):174-178.
XU Zhi-bing. An Low Noise Amplifier Design with ADS Software [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2006(11):174-178. (in Chinese)
- [5] 黄玉兰. 射频电路理论与设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
HUANG Yu-lan. Theory and Design of RF Circuit [M]. Beijing: People's Post&Telecommunication Press, 2008. (in Chinese)
- [6] 黄玉兰. ADS射频电路设计基础与典型应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
HUANG Yu-lan. Foundation and Typical Application of RF Circuit Based on ADS [M]. Beijing: People's Post&Telecommunication Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 吕永生,王家礼,王云飞. 一种用于射频功率放大器自适应控制的RLS算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2004,31(6):939-942.
LV Yong-sheng, WANG Jia-li, WANG Yun-fei. An Adaptive RLS Algorithm Applied to RF Power Amplifiers [J]. Journal of Xidian University, 2004, 31(6): 939-942. (in Chinese)

作者简介:

黄玉兰(1964-),女,山东沂水人,硕士,副教授,主要研究方向为电磁场与射频微波电路,已公开出版4本专著,发表论文10多篇。

HUANG Yu-lan(female) was born in Yishui, Shandong Province, in 1964. She is now an associate professor with M. S. degree. Her research direction is electromagnetic field and RF/microwave electric circuit. She has published 4 books and more than 10 papers.

Email:huangyulan10@sina.com