

3G 基站射频前端 LNA 阻抗匹配优化设计

宋燕辉^{1,2}, 李 丽², 苏 钢¹, 余文奇³

(1 华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074;

2 长沙通信职业技术学院 移动通信系, 湖南 长沙 410015;

3 河南工程学院 计算机科学与工程系, 河南 郑州 451191)

摘 要: 针对 1.9GHz 的 3G 基站射频前端 LNA 电路中的阻抗匹配问题, 把厂家提供的小信号 S 参数制成 S2P 文件, 然后将其导入 EDA 软件中搭建 LNA 电路的输入、输出端口匹配电路, 并结合噪声系数和最大增益进行了阻抗匹配优化设计, 并对优化后的 LNA 电路进行了仿真分析。仿真结果表明: 在 LNA 电路的增益得到提高的同时, 反射系数得到了显著的改善, 达到了阻抗匹配优化设计的目的。该设计方法是解决 3G 基站射频前端 LNA 阻抗匹配问题的有效途径之一。

关键词: 3G 基站; LNA; 阻抗匹配; S 参数; 噪声系数; 最大增益

中图分类号: TN722

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)12-0180-04

Impedance Matching Optimal Design of 3G Base RF LNA

SONG Yan-hui^{1,2}, LI Li², SU Gang¹, YU Wen-qi³

(1 Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2 Department of Mobile Communication, Changsha Telecommunications and Technology Vocational College, Changsha 410015, China; 3 Department of Computer Science and Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Aiming at the impedance matching problem of 3G base RF LNA circuit, an impedance matching optical design based on EDA software has been given in this paper. Firstly, the small signal S parameters of the LNA are utilized to make the file of S2P, which provided by manufacturers modeling. Secondly, the model of input and output matched circuits in Ansoft designer is built to optimize the input and the output circuits according to the maximization gain and noise. The simulation results show that the Gain of optimized LNA is improved, at the same time reflectance have been improved significantly. This method is one of the efficient ways to solve the impedance matching problem of 3G Base RF LNA.

Key words: 3G base; LNA; impedance matching; S parameters; noise figure; maxim gain

1 引言

低噪声放大器(Lower Noise Amplifier, LNA)位于 3G 基站接收机的最前端, 主要用来在强背景噪声环境下放大从天线接收到的微弱信号, 尽量做到只放大其中的有用信号, 不放大或消除各种噪声。为了获得良好的噪声系数和能量的最大传输, LNA

必须进行阻抗匹配。输入、输出匹配电路的作用是使 LNA 的输入、输出阻抗变换到标准系统阻抗 Z_0 (50Ω), 这时 LNA 处于最佳匹配状态, 其增益也最高, 但是噪声系数却不是最低; 在噪声系数最低的时候, LNA 又不是处于最佳匹配状态, 而是有一定的失配, 因此, LNA 阻抗匹配优化设计就是在其噪声系数与增益之间进行均衡, 这也是匹配设计的难点。

收稿日期: 2012-04-25; **修回日期:** 2012-05-18

基金项目: 国家科技重大专项项目(2010ZX03005-001-03, 2012ZX03001-036-002); 湖南省教育厅科技项目(11C0100)

针对阻抗匹配网络的问题,1977 年 Carlin 提出了基于线性分段折线逼近最佳网络特性的原始实频方法.自 Carlin 之后原始实频方法得到了许多改进,并直接演变为直接计算实频方法和简化实频方法^[1-2].LNA 的阻抗匹配离不开反射系数、阻抗等参量的计算,会碰到大量繁琐的复数运算,采用直接计算实频方法,计算量太大.但是简化实频方法有一定的局限性,阻抗匹配网络结构受到限制,没有 RLC 无源网络实现的形式广泛,存在匹配能量的损失^[3].此外,还有一种基于 LOAD PULL(负载牵引)的阻抗匹配方法.将 LNA 接到专门的负载牵引仪器上,利用仪器改变 LNA 的匹配负载,同时测量不同负载下的输出功率和增益,得到的数据可以直接在电脑上存取,使用方便,但是仪器的价格相当昂贵,只有相关的专门厂家才会配备.

本文利用厂商提供的小信号 S 参数建模,结合 Smith(史密斯)圆图找出最佳匹配负载,使得 LNA 电路在提高增益的同时,反射系数得到改善,此种方法的优点是匹配准确度高、直观、方便快捷和大大缩短开发时间.

2 阻抗匹配优化理论分析

Smith 圆图虽然发明于十九世纪,但由于其只是涉及简单的数学运算,直观、方便,在进行阻抗匹配优化设计时,Smith 圆图仍然是阻抗匹配分析、阻抗匹配网络设计、噪声系数和增益计算的基础^[3].Smith 圆图是由很多圆周交织在一起的一个图,是反射系数(Γ)的极坐标图.反射系数可以反映负载的特性(如导纳、增益),在处理 RF 频率的问题时非常有用.反射系数的定义表达式为:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{Z/Z_0 - 1}{Z/Z_0 + 1} = \frac{Z - 1}{Z + 1} \quad (1)$$

其中 Z 为网络端口阻抗, Z_0 为参考阻抗(通常为 50Ω), Z/Z_0 为归一化阻抗.由于阻抗是复数,故反射系数也是复数.设 $Z = r + jx$, $\Gamma = \Gamma_r + j\Gamma_i$, 则式(1)可表达为:

$$\Gamma = \Gamma_r + j\Gamma_i = \frac{r + jx - 1}{r + jx + 1} \quad (2)$$

将式(2)整理得到:

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{1+r}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{1+r}\right)^2 \quad (3a)$$

$$(\Gamma_r - 1)^2 + \left(\Gamma_i - \frac{1}{x}\right)^2 = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \quad (3b)$$

这式(3)两个公式分别对应于 Smith 圆图上的

电阻圆图(圆心为: $\Gamma_r = \frac{r}{1+r}$, $\Gamma_i = 0$; 半径为: $\frac{1}{1+r}$)

和电抗圆图(圆心为: $\Gamma_r = 1$, $\Gamma_i = \frac{1}{x}$; 半径为: $\frac{1}{x}$). 将

电阻圆图和电抗圆图合并在一起即成为 Smith 阻抗圆图.将 Smith 阻抗圆图旋转 180° 得到的圆图称为 Smith 导纳圆图^{[4][6]}.

2.1 匹配网络增益优化

LNA 输入输出匹配电路的可用图 1 表示,其中 LNA 的 S 参数包括(S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 和 S_{22}).在 LNA 共轭匹配的情况下,即 P_1 面两端的反射系数 $\Gamma_1 = \Gamma_s^*$, P_2 面两端的反射系数 $\Gamma_2 = \Gamma_L^*$ 时, LNA 功率增益达到最高^[4].

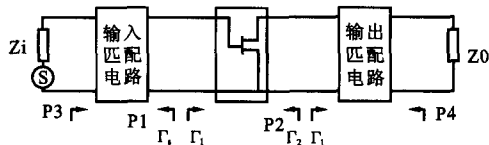


图 1 LNA 阻抗匹配原理图

在实际工程设计中,常常用单边最大功率增益来代替最大功率增益,即 $S_{12} = 0$ 时,最大功率增益 $G_{\max}$ 可近似表达为^[4]:

$$G_{\max} \approx \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} |S_{21}|^2 \frac{1}{1 - |S_{22}|^2} \quad (4)$$

对于任意一个匹配电路, LNA 产生的功率增益 G 显然要小于 $G_{\max}$. 若给定一功率增益 G , 在输出匹配的情况下, 存在许多不同反射系数 Γ_s 可以产生相同的功率增益 G , 这些 Γ_s 在史密斯圆图上的轨迹是一个圆^[4-5]:

$$\left[U_s - \frac{g_s A_{11}}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_s)} \right]^2 + \left[V_s - \frac{g_s B_{11}}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_s)} \right]^2 = \left[\frac{\sqrt{1 - g_s} (1 - |S_{11}|^2)}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_s)} \right]^2 \quad (5)$$

其中: $\Gamma_s = U_s + jV_s$, $S_{11} = A_{11} + jB_{11}$, g_s 是归一化比例系数, 定义为 $g_s = G/G_{\max}$. 显然, 等增益圆的圆心为: $\left(\frac{g_s A_{11}}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_s)}, \frac{g_s B_{11}}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_s)} \right)$ 半径为: $\frac{\sqrt{1 - g_s} (1 - |S_{11}|^2)}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_s)}$.

2.2 匹配网络噪声系数优化

对于任一双端口网络, 噪声系数用于度量信号经过网络传输后增加的噪声, 对于任何一个实际电路, 输出端的信噪比 (SNRout) 都要劣于输入端的信噪比 (SNRin). 然而, 在大多数电路设计中, 每个

双端口网络产生的噪声都能够通过合理的选择工作点和源端阻抗来尽可能地降低. 在实际应用中, 噪声分析的关键参数是以导纳形式或阻抗形式定义的双端口网络的噪声系数^[6]:

$$F = F_{\min} + \frac{R_n}{G_s} |Y_s - Y_{opt}|^2 \text{ 或}$$

$$F = F_{\min} + \frac{G_n}{R_s} |Z_s - Z_{opt}|^2 \quad (6)$$

其中, Z_{opt} 和 Y_{opt} 分别是最优源阻抗和最优源导纳, R_n 是噪声电阻, G_n 是噪声电导, R_s 是源电阻, G_s 是源电导. 最佳反射系数 Γ_{opt} 与 Y_{opt} , 源反射系数 Γ_s 与 Y_s 的关系为:

$$Y_{opt} = Y_0 \frac{1 - \Gamma_{opt}}{1 + \Gamma_{opt}} \quad (7)$$

$$Y_s = Y_0 \frac{1 - \Gamma_s}{1 + \Gamma_s} \quad (8)$$

又由于 G_s 可以表示为:

$$G_s = Y_0 \frac{1 - |\Gamma_s|^2}{|1 + \Gamma_s|^2} \quad (9)$$

将式(7)、(8)、(9)代入式(6), 整理得到:

$$F = F_{\min} + \frac{4R_0}{Z_0} \frac{|\Gamma_s - \Gamma_{opt}|^2}{(1 - |\Gamma_s|^2) |1 + \Gamma_{opt}|^2}$$

当采用一个圆函数表示噪声系数 F 时, 就可以采用下式来表示:

$$\left| \Gamma_s - \frac{\Gamma_{opt}}{1+N} \right|^2 = \frac{1}{(1+N)^2} [N^2 + N(1 - |\Gamma_{opt}|^2)] \quad (10)$$

其中, $N = \frac{F - F_{\min}}{4(R_n + Z_0)} |1 + \Gamma_{opt}|^2$. 显然, 等噪声系数圆的圆心为 $\frac{\Gamma_{opt}}{1+N}$, 半径为 $\frac{1}{1+N} \sqrt{N^2 + N(1 - |\Gamma_{opt}|^2)}$.

作为 3G 基站的射频前端, LNA 的阻抗匹配就是要在获得 $G_{\max}$ 的情况下, 使得噪声系数尽量接近 $N_{\min}$. 根据上述阻抗匹配增益优化和噪声系数优化, 得到 LNA 阻抗匹配优化设计方法:

(1) 根据 $G_{\max}$ 和 $F_{\min}$ 的计算公式, 综合考虑增益和噪声系数, 确定输入阻抗匹配点, 利用 Smith 圆图确定输入阻抗匹配电路的形式.

(2) 根据输入与输出共轭的阻抗匹配理论, 设计输出匹配电路, 即使 $\Gamma_L = \Gamma_s$, 并确定输出电路形式.

3 LNA 阻抗匹配优化设计应用及仿真

3.1 器件选择

以低噪声功率放大芯片 RF2361 为核心进行

LNA 电路设计, 工作频率 1.9GHz. 未进行阻抗匹配的 LNA 电路图如图 2 所示. 管脚 3 (VPD) 的并联电容是对输入电源进行滤波, 管脚 4 (RF OUT) 的电感电容串并联网络对电源 VCC 进行滤波.

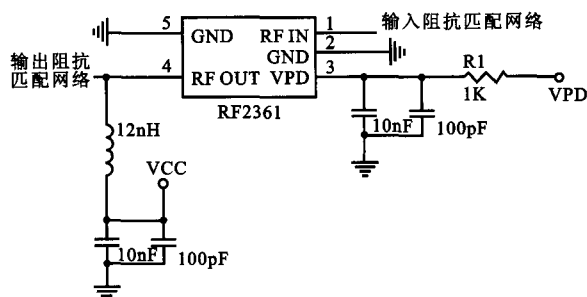


图 2 未匹配的 LNA 电路图

RF2361 的输入 (RF IN) 和输出 (RF OUT) 都必须通过与阻抗匹配网络连接来达到阻抗匹配的目的. 匹配的目的是为了在改善噪声系数的同时实现能量的最大功率传输. 良好的阻抗匹配能够有效提高传输能量, 对于 LNA 电路来说, 就是没有反射波. 如何确定 LNA 电路阻抗匹配网络中的元件类型以及连接关系, 是实现匹配的重点与关键^[7].

3.2 建模

在进行具体的输入输出阻抗匹配网络优化设计之前, 首先要用建立 LNA 电路主芯片 RF2361 的网络模型. 利用“黑盒子”方法可以实现 RF2361 的快速建模. 把厂商提供的 S 参数制成 S2P 文件, 导入 EDA 软件—Ansoft designer 中, 得到一个二端口网络 (如图 3 所示), 虽然它只是一个看似简单的二端口模型, 但是它却具有 RF2361 的一切性能特性.

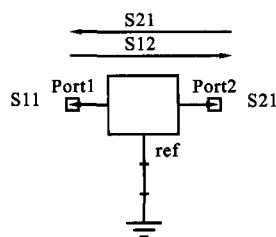


图 3 RF2361 模型

RF2361 二端口模型与 S 参数的关系如下:

S_{11} : 输出端口 2 匹配时, 输入端口 1 的反射系数;

S_{12} : 输入端口 1 匹配时, 输出端口 2 到输入端口 1 的反向传输系数;

S_{21} : 输出端口 2 匹配时, 输入端口 1 到输出端

口 2 的正向传输系数;

S_{22} :输入端口 1 匹配时,输出端口 2 的反射系数.

建模完成后,就可以设计输入输出阻抗匹配网络.输入、输出匹配电路将分别接到这个二端口网络的两端.

3.3 输入输出阻抗匹配网络优化设计

综合考虑 LNA 电路的噪声系数与增益,利用 Ansoft designer 中 SmithTool 强大的计算分析功能得到输入匹配点 A,如图 4(a)所示.并从 Smith-Tool 上得到输入阻抗匹配电路由 12nH(实际取 12nH)的电感和 6.1pF(实际取 6pF)的电容串联组成.

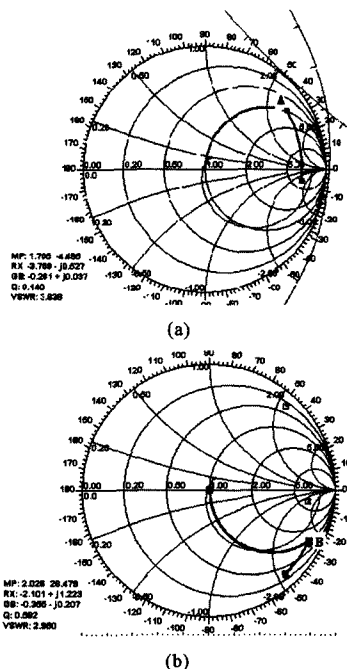


图 4 阻抗匹配优化设计 Smith 分析图

根据阻抗匹配理论,利用输入匹配点与输出匹配点的共轭关系,得出输出阻抗匹配点 B,如图 4(b)所示.并从 SmithTool 上可得到输出阻抗匹配电路由 16.01nH 的电感(实际设计取 16nH)和 2pF 电容并联组成.

3.4 仿真分析

本文使用 EDA 软件—Ansoft designer 分别对完成阻抗匹配优化设计之前、之后的 LNA 电路进行仿真分析,仿真分析虽然不能代替真正的实验,但能起到很好的指导作用,大大提高射频电路设计的效率^[8-9].

图 5(a)、(b)给出了电路 S 参数的仿真结果,在

1.9GHz 处,射频 LNA 电路完成阻抗匹配优化设计之前的 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 为 -33.62dB、12.12dB、-5.35dB,完成阻抗匹配优化设计之后的 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 为 -32.27dB、14.99dB、-31.8dB,增益比阻抗匹配前增加了 2.87dB,输出端的反射系数分别下降了 26.45dB.性能明显优于阻抗匹配前,说明该 LNA 电路的输入输出匹配良好,反向隔离特性良好.

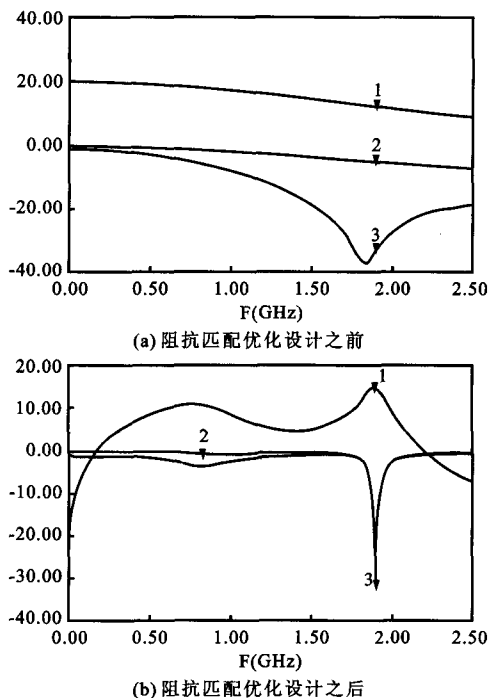


图 5 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 仿真结果

4 结束语

本文应用 EDA 软件—Ansoft designer 对 3G 基站射频前端 LNA 电路进行了阻抗匹配的设计.阻抗匹配完成后,仿真结果表明 LNA 电路在增益得到了提高的同时,反射系数得到了显著的改善,达到了阻抗匹配优化设计的目的.该设计方法应用方便、高效快捷,成本低,是解决 3G 基站射频前端 LNA 阻抗匹配问题的有效途径之一.

参考文献:

- [1] 武军伟.基于简化实频方法的宽带天线阻抗匹配网络设计[J].电波科学学报,2011(04):382-387.
- [2] CARLIN H J, YARMAN B S, The double matching problem: analytic and real frequency solutions [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2003, 30 (1):15-28.

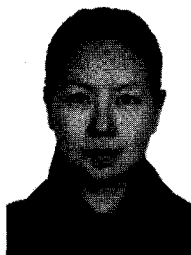
(下转第 188 页)

联关系开展研究,为优化流媒体部署、提供个性化服务提供支持。

参考文献:

- [1] Andy Oram. Peer-to-peer; harnessing the power of disruptive technologies[M]. Oreilly, 2001.
- [2] 李振华. P2P 流媒体系统的若干关键属性的优化方案[D]. 南京: 南京大学, 2008.
- [3] Sripanidkulchai K, Ganjam A, Maggs B, et al. The feasibility of supporting large-scale live streaming applications with dynamic application end-Points[C]//SIGCOMM'04: Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM, Portland, OR, USA: ACM, 2007.
- [4] Zhang X, Liu J, Li B, et al. CoolStreaming/DONet: A data-driven overlay network for efficient live media streaming[C]//INFOCOM'05: Proceedings of the 24th IEEE INFOCOM, Miami, FL, USA: IEEE, 2005.
- [5] Huang C, Li J, Ross K W. Can internet video-on-demand profitable[C]//Proceedings of the 13th ACM SIGCOMM, Kyoto, Japan: ACM, 2007.
- [6] Huang Y, Fu T Z J, Chiu D M, et al. Challenges, design and analysis of a large-scale P2P VoD system[C]//Proceedings of the 14th ACM SIGCOMM, Seattle, WA, USA: ACM, 2008.
- [7] 白伟. 面向交互式 P2P 流媒体服务平台的 NAT 穿越系统的设计与实现[D]. 南京: 南京大学, 2011.

作者简介:



戴 瑾 女, (1973—), 硕士, 讲师. 研究方向为分布式计算与并行处理.

(上接第 183 页)

- [3] 韦奋. 蓝牙无线通信模块设计[M]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [4] 毛文杰. 一种基于接收机整机噪声最佳的射频 LNA 匹配电路设计[J]. 电路与系统学报, 2002(09): 68-73.
- [5] Yaran B S, Carlin H J. A simplified "real frequency" technique applied to broad-band multistage microwave amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 30(12): 2216-2222.
- [6] 黄岸婕. 射频电路中匹配网络的选择和噪声系数的优化. 现代传输, 2008(10): 123-126.
- [7] 李丽. 无线传输系统中功率放大电路的设计[D]. 山西: 中北大学硕士论文, 2007.
- [8] 傅佳辉, 吴群. 微波 EDA 电磁场仿真软件评述[J]. 微波学报. 2004(2): 23-25.
- [9] 李丽, 廖海洲. 基于 Ansoft Designer 的射频功放电路阻抗匹配优化设计[J]. 电子技术应用, 2008(12): 67-70.

作者简介:



宋燕辉 女, (1978—), 硕士, 讲师. 研究方向为 3G 射频技术、下一代移动通信关键技术.

李 丽 女, (1982—), 硕士, 讲师. 研究方向为无线通信、移动通信.

苏 钢 男, (1971—), 博士, 副教授, 硕士生导师. 研究方向为未来移动通信关键技术.

余文奇 男, (1976—), 博士, 副教授. 研究方向为 3G 技术、计算机网络.