

双波段多级低噪放的匹配设计与仿真

付东洋, 文化锋*, 刘太君, 张 勋, 李 健

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对双波段低噪声放大电路设计存在的多级匹配问题, 提出一种解决双波段多级低噪放匹配的方法. 首先根据每一级低噪放指标要求设置优化参数, 找到输入输出最佳阻抗值, 然后用串联微带线和并联微带枝节将双波段 LNA 的每一级输入输出阻抗值匹配到 $50\ \Omega$, 最后将其级联, 从而实现了双波段三级 LNA 的设计. 仿真结果表明: 该低噪声放大器在 2.69 GHz 和 3.5 GHz 频点处匹配良好, 噪声系数小于 1 dB, S11 和 S22 都小于 -20 dB, 增益大于 40 dB, 从而能同时传输 2 个非同步信号, 提高了频谱利用率, 并减少了带外噪声干扰.

关键词: 双波段; 三级级联; 低噪声放大器; 微带传输线

中图分类号: TN913.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 03-0034-04

无线接收系统中, 良好的前端是总体性能优越的前提, 而低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)是前端重要组成部分. 随着四网(GSM、TD-SCDMA、WLAN、TD-LTE)长期共存的提出, 为实现低成本与高效率的协同发展, 减小基站体积, 降低能耗, 因此支持多种频段的低噪声放大器模块备受关注. 而 LNA 模块设计的关键部分是对匹配网络的设计, 同时匹配网络设计的优良程度与速度也决定着 LNA 的发展. 以往对单波段 LNA 的基本要求是较小的噪声系数、足够大的增益和带宽, 同时拥有较大的动态范围和优良的稳定性^[1-3]. 然而双波段多级 LNA 相比单波段 LNA 的难点在于(1)双波段输入输出匹配端网络的实现; (2)双波段 LNA 各级间要具有良好的匹配^[4]. 笔者提出能同时覆盖 LTE (2.69 GHz)和 WIMAX(3.5 GHz)频段三级级联的低噪声放大器, 并且能在双波段内实现良好的输入输出和级间匹配, 同时具有良好的稳定性, 最后利用 ADS 软件对其仿真与优化设计.

1 双波段低噪放匹配设计

双波段是指接收机可同时接收 2 个波段的电磁

波. 而双波段难点在于匹配网络的设计, 其设计的优良程度对输出结果的各项参数起重要作用, 笔者针对双波段提出一种用串联微带线和并联微带枝节组成的双波段匹配网络(图 1), 设计时首选 2 个频点 f_1 和 f_2 (假设 $K = f_1 / f_2 \geq 1$), 复阻抗分别为 $Z_{L1} = R_1 + jX_1$, $Z_{L2} = R_2 + jX_2$, 一般情况下, $X_1 \neq 0$, $X_2 \neq 0$. 首先用串联微带线将 2 个不同复阻抗变换到等电导圆上, 然后用并联微带线来抵消不同的电纳, 转换为实阻抗.

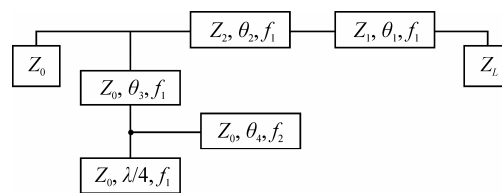


图1 双波段匹配网络

1.1 串联微带线

不同频点的复阻抗首先用串联微带线转换为 $Y(f_1) = G_0 + jB_1$, $Y(f_2) = G_0 + jB_2$, 由串联微带线物理特性可得:

$$\frac{1}{G_0 + jB_1} = Z \frac{Z_{L1} + jZ \tan \theta}{Z + jZ_{L1} \tan \theta}, \quad (1)$$

收稿日期: 2014-08-16.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(61371061); 浙江省自然科学基金(LY12F01010).

第一作者: 付东洋(1989-), 女, 吉林长春人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 光通信. E-mail: fudongyang123456@sina.com

*通信作者: 文化锋(1963-), 男, 甘肃庆阳人, 副教授, 主要研究方向: 光通信. E-mail: wenhuafeng@nbu.edu.cn

$$\frac{1}{G_0 + jB_2} = Z \frac{Z_{L2} + jZ \tan k\theta}{Z + jZ_{L2} \tan k\theta}, \quad (2)$$

其中, B_1, B_2, Z_2, θ 为 4 个未知数, 通过上述 2 个复数等式整理得 4 个实数等式, 消去 B_1 和 B_2 变成关于 Z 和 θ 的方程组:

$$R_1 - G_0 R_1^2 - G_0 X_1^2 - 2G_0 Z X_1 \tan \theta + R_1 \tan^2 \theta - R_0 Z^2 \tan^2 \theta = 0, \quad (3)$$

$$R_2 - G_0 R_2^2 - G_0 X_2^2 - 2G_0 Z X_2 \tan k\theta + R_2 \tan^2 k\theta - G_0 Z^2 \tan^2 k\theta = 0. \quad (4)$$

利用优化的方法解出 Z_1 和 θ , 然后代入下列公式求出 B_1 和 B_2 :

$$B_1 = \frac{R_1 \tan \theta - G_0 X_1 Z - G_0 Z^2 \tan \theta}{R_1 Z}, \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{R_2 \tan k\theta - G_0 X_2 Z - G_0 Z^2 \tan k\theta}{R_2 Z}. \quad (6)$$

在本文设计中采用特征阻抗和电长度分别为 Z_1, θ_1 和 Z_2, θ_2 的两段串联微带线代替特征阻抗为 Z 电长度为 θ 的微带线, 优化参数由 4 个变量替代了原来的 2 个变量, 在优化过程中更有利于优化参数的变动, 从而能得到更好的优化指标.

1.2 微带并联枝节

如图 2(a)所示, 在频点 f_1 处, 开路点经过 $\lambda/4$ 波长的微带线后, 得到 Y_c 为无穷大, 并联 TL_2 微带线后, 对其影响可忽略不计, 所以 $Y_a = Y_c = \infty$, 此时等效为 TL_3 短路接地, 如图 2(b)所示, 经过 TL_3 特征阻抗为 Z_0 的微带线, 在 f_1 频点处等效为 $Y_{in1} = jB_1$, 由下式可求出 θ_3 的值:

$$\theta_3 = \tan^{-1}(-1/Z_0 B_1). \quad (7)$$

在 f_2 频点处, $Y_{in2} = jB_2$, TL_1 和 TL_3 微带线的等效框图如图 2(c)所示, Y_a 的值便可由下式求出:

$$Y_a = \frac{Z_0 Y_{in2} - j \tan(f_2 \theta_3 / f_1)}{Z_0 - j Z_0^2 Y_{in2} \tan(f_2 \theta_3 / f_1)}. \quad (8)$$

因为 TL_1 微带线与 TL_2 微带线并联, 所以 $Y_a = Y_b + Y_c$, 由(9)式得到 Y_c 的值, 从而通过(10)式求出 Y_b 的值:

$$Y_c = (j \tan((f_2 / f_1)(\pi / 2))) / Z_0, \quad (9)$$

$$Y_b = jB_b = Y_a - Y_c. \quad (10)$$

通过以上公式推导, 最终由(11)式和(12)式求得 θ_4 的值^[5-7].

$$Y_b = \begin{cases} j \tan \theta_4 / Z_0, & \text{开路,} \\ -j \cot \theta_4 / Z_0, & \text{短路,} \end{cases} \quad (11)$$

$$\theta_4 = \begin{cases} \tan^{-1}(Z_0 B_b), & \text{开路,} \\ \cot^{-1}(-Z_0 B_b), & \text{短路.} \end{cases} \quad (12)$$

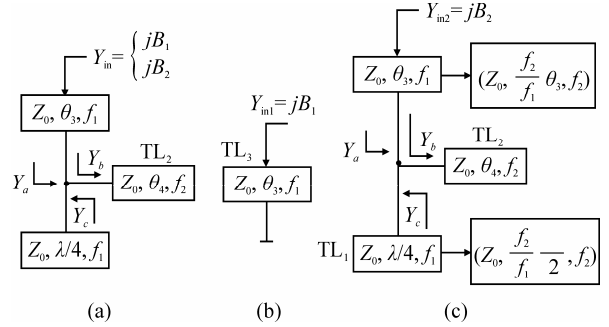
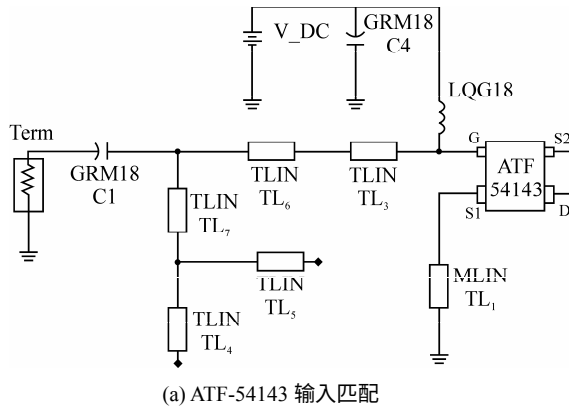


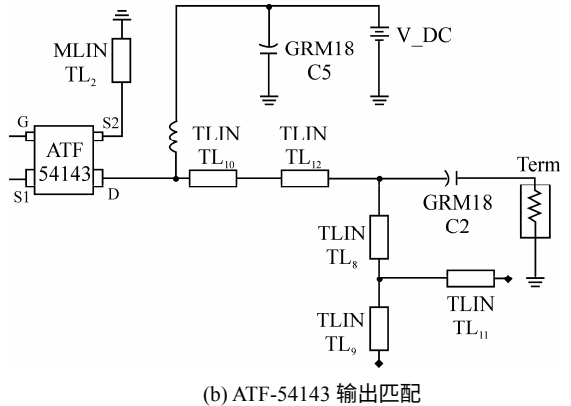
图2 微带并联枝节

2 双波段三级低噪放仿真

设计中由于对噪声系数的要求较高, 故采用的低噪放是 Agilent 的 ATF-54143, 它是一种低噪声增强型赧高电子迁移率晶体管(PHEMT), 该晶体管使器件具备较大的输出电阻、更强的电流处理能力、更高的跨导, 以及较高的工作频率和较低的噪声系数等优点. 为获取更高的输出功率, 笔者选



(a) ATF-54143 输入匹配



(b) ATF-54143 输出匹配

图3 第一级 LNA 匹配原理图

择 ATF-54143 三级级联放大结构, 工作带宽为 2.68~2.70 GHz 和 3.49~3.51 GHz, 在工作频率范围对其进行匹配、仿真与优化。

2.1 第一级低噪放匹配网络

多级 LNA 级联时, 第一级的噪声系数在整个接收机中占重要地位, 所以第一级优化时将噪声系数设为最佳优化目标。根据低噪放指标要求, 设置优化参数, 当满足 $S_{11} \leq -15$ dB, $S_{22} \leq -15$ dB, $NF \leq 1$ dB 时, 找到输入输出最佳阻抗值; 采用双波段低噪放匹配的设计, 将输入输出阻抗值共轭匹配到 50Ω , 第一级 LNA 匹配的输入和输出原理如图 3 所示。

其仿真结果如图 4 所示, 从图可知, 在 2.69 GHz 和 3.5 GHz 中心频点处, 第一级噪声系数分别小于 0.828 dB 和 0.982 dB; S_{11} 分别为 -18.635 dB 和 -17.072 dB; S_{22} 分别为 -17.161 dB 和 -17.179 dB; 增益分别为 15.841 dB 和 13.676 dB。以上结果均达到了优化目标, 实现了增益与噪声系数的平衡, 输入与输出匹配的良好。

2.2 多级低噪放匹配网络

后两级低噪声放大器在设计时与第一级类似, 只是栅极偏置电压都比前一级略高, 主要目的是

为了获得较好的线性度。当采用 ADS 优化找到每级的最佳输入输出阻抗点后, 用上述提到的串联微带和并联微带枝节将每级 LNA 的输入输出端均进行双向匹配到 50Ω , 最后将三级 LNA 级联, 完成双波段三级 LNA 设计。第一级匹配时以最佳噪声匹配为设计目标; 二、三级匹配时不需要考虑噪声系数, 只要考虑最大增益即可^[8]。设定优化目标 (a) $S_{11} \leq -20$ dB, (b) $S_{22} \leq -20$ dB, (c) $S_{21} \geq 40$ dB。

对级联后的双频点低噪声放大器进行仿真。图 5(a)给出了双频点三级 LNA 的输入输出匹配情况, 在中心频率为 2.69 GHz 和 3.5 GHz 处, S_{11} 和 S_{22} 都小于 -20 dB。图 5(b)是增益 S_{21} 的仿真结果, 在双频点处增益都大于 40 dB, 而且在带宽 20 MHz 范围内增益平坦, 波动幅度小于 1 dB。图 5(c)给出的是噪声系数, 双频点处, 噪声系数均小于 1 dB, 在 2.69 GHz 和 3.5 GHz 频点处, 噪声系数分别为 0.612 dB 和 0.927 dB。仿真结果显示稳定系数 $K > 1$, 低噪声放大电路绝对稳定。

3 结语

成功地实现了在 2.69 GHz 和 3.5 GHz 双频点处的三级低噪放设计与仿真, 详细分析了用串联微

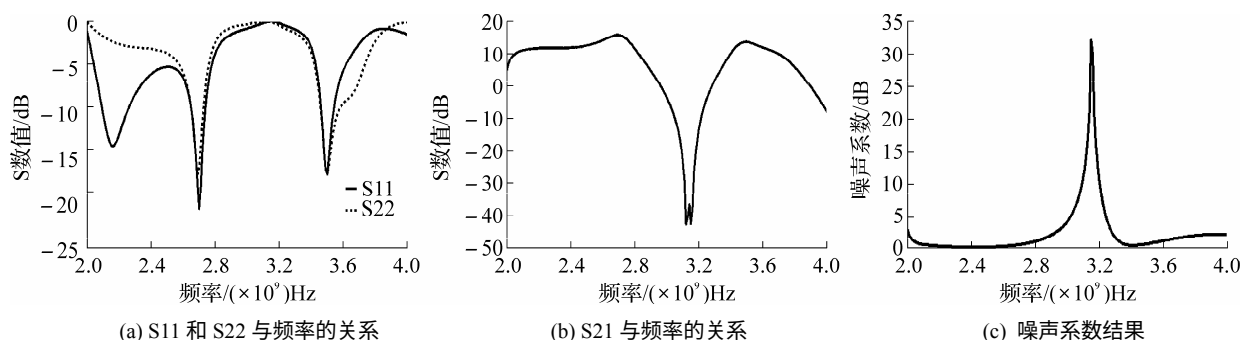


图 4 第一级低噪仿真结果

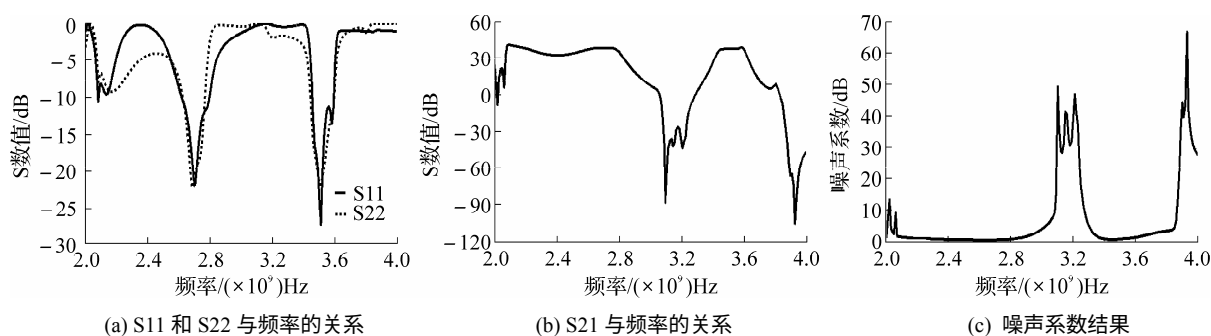


图 5 多级低噪仿真结果

带线和并联微带枝节将每一级的 LNA 输入输出端进行双波段双向匹配到 $50\ \Omega$; 最后将三级级联, 完成双波段多级 LNA 的设计. 仿真结果表明, 此 LNA 在双频点处输入输出端匹配良好, S_{11} 和 S_{22} 都小于 $-20\ \text{dB}$, 增益大于 $40\ \text{dB}$, 噪声系数均小于 $1\ \text{dB}$, 是一款具有良好双波段放大特性的多级低噪声放大器.

参考文献:

- [1] 潘安, 成浩, 葛俊祥. X 波段低噪声放大器的设计与仿真[J]. 现代雷达, 2014, 36(1):66-70.
- [2] 易凯. 基于 ADS 的 C 波段低噪声放大器的设计[J]. 信息通信, 2013(7):32-33.
- [3] 邓志辉. 平衡式 Ku 波段低噪声放大器 ADS 仿真[J]. 实验科学与技术, 2012, 10(1):24-26.
- [4] 刘波宇, 张万荣, 谢红云, 等. 双频带低噪声放大器设计[J]. 电子器件, 2011, 34(3):278-281.
- [5] Chen W, Zhang S, Liu Y, et al. A concurrent dual-band uneven Doherty power amplifier with frequency-dependent input power division[J]. Circuits and Systems, 2013, 61(2):552-561.
- [6] Karun R, Ghannouchi F M. Design methodology for dual-band doherty power amplifier with performance enhancement using dual-band offset lines[J]. Industrial Electronics, 2012, 59(12):4831-4842.
- [7] Rawat K, Ghannouchi F M. Dual-band matching technique based on dual-characteristic impedance transformers for dual-band power amplifiers design[J]. Microwaves, Antennas & Propagation, 2011, 5(14):1720-1729.
- [8] 孟庆斌, 黄贵兴, 葛付伟, 等. 一种低噪声多级匹配网络的设计与仿真[J]. 微波学报, 2012, 28(3):61-65.

Design and Simulation of a Dual-Band and Multi-stage Low Noise Amplifier

FU Dong-yang, WEN Hua-feng*, LIU Tai-jun, ZHANG Xun, LI Jian

(Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A matching method is proposed aiming at solving the design problems of dual-band low noise amplifier (LNA) circuit. Based on the index of each level in LNA, the matching network first sets the optimized parameters, then obtains the optimal input and output impedance. Next is to utilize microstrip transmission line in series and the parallel microstrip stubs to convert input and output impedances at each stage for dual-band LNA into $50\ \Omega$. Finally, the design of the dual-band multistage LNA is implemented by three-level cascade. The results show that, when the amplifier is operated at dual frequencies of $2.69\ \text{GHz}$ and $2.70\ \text{GHz}$, the noise is less than $1\ \text{dB}$, S_{11} and S_{22} are less than $20\ \text{dB}$, gain is more than $40\ \text{dB}$, making two asynchronous signal transported simultaneously. In this way, not only is the spectrum efficiency improved but also the noise outside the band is reduced.

Key words: dual-band; three-level cascade; low noise amplifier; microstrip transmission line

(责任编辑 章践立)