

X 波段低噪声放大器模块

郝明丽[†] 刘训春 黄清华 杨成樾 武 锦

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 报道了自行设计并研制成功的 X 波段低噪声放大器(LNA)模块, 提出了调整模块增益平坦度的有效方法, 即在两级放大器之间设计多个并联谐振回路, 使其在带外低频段产生不同的谐振点来衰减低频段的增益, 同时拉低带内低频端的增益, 再用谐振回路中的串并联电阻调整增益压缩的大小, 从而使工作频带内增益平坦. 利用这种方法研制的模块最终测试结果为: 增益平坦度 $\leq \pm 0.34\text{dB}$, 噪声系数 $\leq 1.84\text{dB}$, 增益 $> 35\text{dB}$, 模块性能完全符合设计要求.

关键词: X 波段; LNA; 增益平坦度

EEACC: 1350F

中图分类号: TN722

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)06-0963-04

1 引言

随着通信系统向小型化、宽频带、低噪声以及更高工作频带发展, 微波低噪声放大器越来越受到人们的重视. 目前, 微波低噪声放大器已广泛应用于通信、雷达、电子对抗以及遥控遥测系统接收设备中, 因此研制出性能优良的微波低噪声放大器对满足市场需求具有重要意义.

本文报道了我们设计并研制成功的 X 波段低噪声放大器模块, 对模块的增益、增益平坦度等关键技术指标进行了分析, 提出了调整增益平坦度的有效方法.

2 电路设计

利用安捷伦公司的 ADS2004A 软件对所研制的模块电路进行仿真来辅助设计. 为了实现在工作频带(10~12GHz)内模块增益大于 33dB, 我们选用两级低噪声放大器芯片级联来达到高增益; 同时, 为了满足增益平坦度 $\leq \pm 1\text{dB}$ 的要求, 在两级芯片之间设计匹配电路来调整增益平坦度; 另外, 为求模块的噪声系数 $\leq 2\text{dB}$, 我们通过选用上述适合的低噪声放芯片以及合理分配两级电路的增益来满足其要求. 该模块的电路原理图如图 1 所示.

对于所用的低噪声放芯片来说, 在工作频带内单级增益大于 27dB, 单级噪声系数低, 两级级联后增益和噪声系数的要求易于满足. 但对增益平坦度的要求来说, 由于晶体管在高频下存在 6dB/倍频程

段^[1,2], 我们所用的单级低噪声放芯片在工作频带内高低端增益相差 4dB 以上, 两级芯片直接级联后得到的增益曲线如图 2 所示, 曲线向右下倾斜, 带内高低端增益差值达到 8dB 以上, 加之实际的模块电路高端损耗大, 更加大了模块在工作频带内增益的不平坦度; 由于模块尺寸小, 调试的空间也极为有

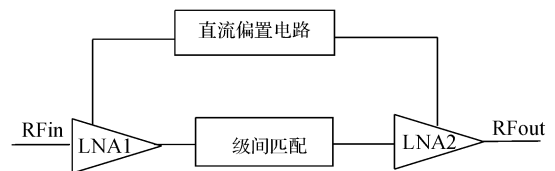


图 1 X 波段低噪声放模块电路示意图

Fig. 1 Schematic circuit diagram of X-band LNA module

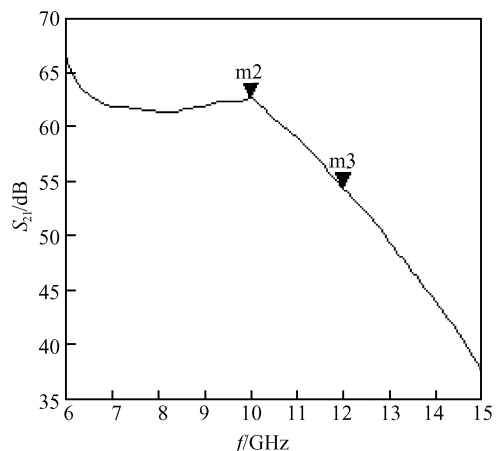


图 2 两低噪声放芯片直接级联的增益曲线

Fig. 2 Gain curve of two directly cascaded LNA chips

[†] 通信作者. Email: mytdhml@163.com

2006-11-27 收到, 2006-12-22 定稿

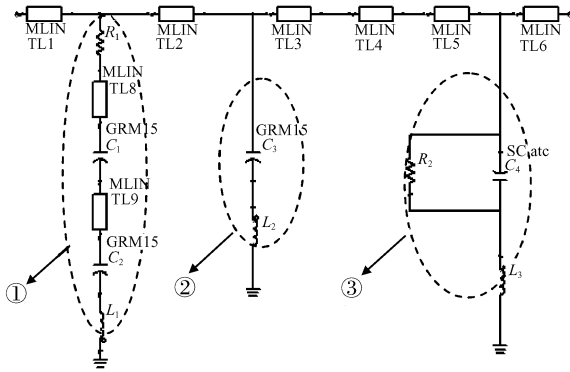


图 3 级间匹配电路

Fig.3 Matching circuits between two LNA chips

限. 因此, 相对来说, 匹配电路的设计和增益平坦度的调试难度最大.

通常, 负反馈电路是拓宽放大器工作频带和改善增益曲线平坦度的有效措施, 但是, 在 X 波段这样的厘米频段, 负反馈电阻、电容等片式元件尺寸较大, 引入寄生严重, 无法获得宽频带补偿. 而且, 对于我们的电路来说, 反馈是在整个芯片的输入、输出之间反馈, 而芯片内部包含了多级电路, 极有可能因为反馈相位不当引起放大器的不稳定.

有损匹配电路^[3]是加宽频带的另一种有效措施, 相比使用片式电阻、电容的负反馈电路形式, 有损匹配更适合于我们的高频模块电路设计, 其原理是对增益高的低频段增加电阻性损耗来压低增益, 以此获得平坦的增益曲线.

根据有损匹配的原理, 结合模块自身的特点, 我们采用谐振-衰减的方式, 即在两级芯片之间设计多个并联谐振支路, 使并联支路谐振在带外低频段的不同频点, 由于并联支路在谐振点处阻抗最低, 输出信号电压最小, 多个并联支路使带外的低频段增益衰减, 从而拉低工作频带内低频端的增益, 再将电阻串联(或并联)到支路中来控制频率响应曲线的形状和对增益压缩的大小, 以此改善增益平坦度. 由于芯片的输入、输出端的匹配良好, 所以只需要在级间设计增益平坦度的调整电路.

3 增益平坦度的调试方法

如图 3 所示, 我们设计的级间电路包含三部分, 其中①和③是带有电阻的有损匹配支路, ②是电抗性匹配支路. 电路采用尺寸较小的 murata GRM15 型电容和 ATC100A 型高 Q 值电容, 它们都有相应的仿真模型库, 调用方便. 微带线按照实际情况代入相应的参数模型. 对于①, ②, ③支路中所标识的电感 L_1, L_2, L_3 , 都是寄生过孔(via)电感, 根据 PCB

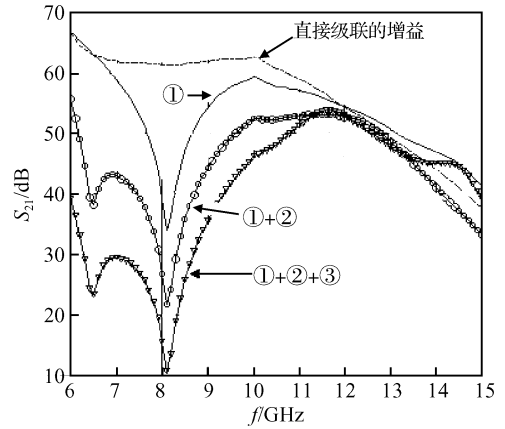


图 4 并联支路对增益的影响

Fig.4 Parallel circuits' effect on gain

过孔寄生电感的计算公式^[4]: $L = 5.08h \times [\ln(4h/d) + 1]$ (其中 L 为过孔寄生电感值, h 为过孔长度, d 为中心过孔的直径) 计算出寄生电感值. 因此, 并联谐振支路包含了微带线和寄生过孔电感, 它们和电容共同决定了谐振的位置.

首先将支路①中的电阻 R_1 短路, 支路③中的电阻 R_2 断路, 分别查看①, ②, ③支路的谐振点, 如图 4 所示, 最上方的曲线为两级芯片直接级联后的增益曲线, 下方三条曲线分别对应顺次接通①, ②, ③支路后电路的增益曲线. 可以看到, 三条并联支路分别谐振在带外低频段的不同频点, 在谐振点处阻抗最小, 支路的输出电压最小, 因此谐振频点处的信号放大量最小, 从而使相应的带外低频段增益下降, 由于此时三条支路是纯电抗性匹配, 支路 Q 值较高, 曲线在谐振点处表现为尖的低谷, 因此在谐振点处带外低频段失配严重, 容易使电路工作不稳定.

以上是纯电抗性匹配支路对电路增益的影响结果, 当在支路中加入电阻, 就构成了有损匹配电路. 如图 5 所示, 在支路①, ③中依次加入电阻 R_1 和 R_2 , 模块的增益曲线在带内逐渐变得平坦.

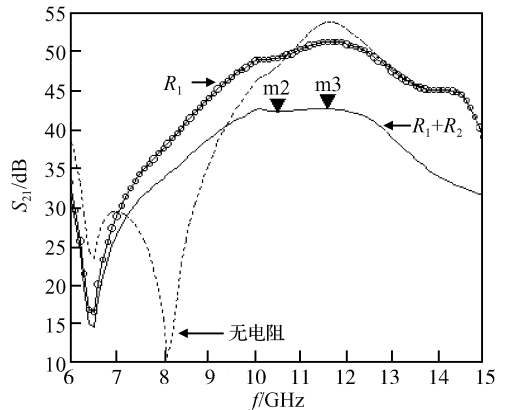


图 5 有损匹配下的增益曲线

Fig.5 Gain curves with loss-matching circuits

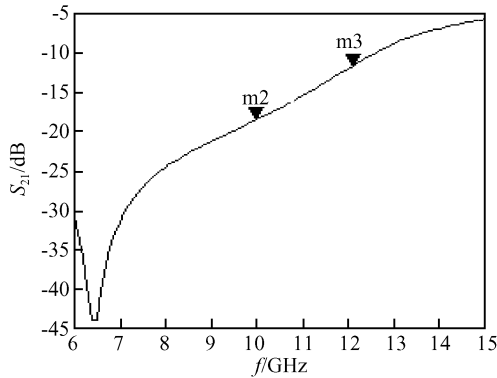


图 6 级间匹配电路的传输特性曲线

Fig. 6 Transmission character of the matching circuits between two stages

分析增益曲线发生变化的原因,对于支路①,串入电阻 R_1 后,谐振点处阻抗增加,使支路①上输出电压增大,曲线 Q 值降低,因此谐振点附近的频带增益上升,增益上升量较电阻上的增益损耗量大,但是距离谐振点较远的高频端,阻抗变化不明显,电阻上的损耗相比增益上升要大,此时增益下降,但是距离谐振点更远时,阻抗更高,增益不受 R_1 的影响.因此加入电阻 R_1 ,使并联支路①的 Q 值降低,控制了频率响应曲线的形状和对增益压缩的大小.

同样,并联电阻 R_2 后,支路③的阻抗相比未加电阻时减小,由于电路调试中选用的 R_2 阻值较小,谐振点处及其周围的频段都将在 R_2 上产生大的损耗,因此,增益曲线在整个频带内下降幅度较大,并获得了平坦的增益曲线,如图 5 所示.

将图 5 所示的级间电路两端加上 50Ω 的 term 端,进行 ADS 仿真,得到的 S_{21} 曲线如图 6 所示.可以看到,级间匹配电路的 S_{21} 曲线为向右上方倾斜的曲线.与图 2 相比,曲线倾斜方向相反,正好可以弥补整个放大器增益的不平坦度.

以上就是我们设计的调整增益平坦度的方法,即在级间设计多个并联谐振支路,并使并联支路谐振在带外低频段的不同频点处,将低频段的增益进行衰减,进而拉低带内低频端的增益,再在支路中串、并联电阻来调整增益压缩的大小,从而得到平坦的增益曲线,与此同时,有阻性损耗匹配比纯电抗匹配法对驻波比的影响小^[5].

4 测试结果

根据上述的匹配支路,我们设计并制作了 X 波段低噪声放大器模块.由于模块频率高,内部寄生以及空间耦合在所难免,当模块增益高达 40dB 以上时,模块容易产生振荡,因此我们有意降低偏置电压,使其增益低于 40dB,模块得以稳定工作.而且,

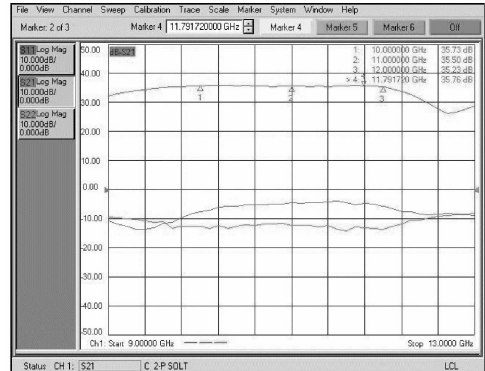


图 7 X 波段低噪声放大器模块的 S 参数曲线

Fig. 7 S parameters of X-band LNA module

降低偏置电压对改善增益平坦度也有利,并不会改变增益曲线的形状.值得注意的是,第一级芯片的偏置电压如若降得太低会导致第一级芯片增益过多降低,根据噪声系数表达式^[6]: $F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{A1}}$,第一级增益 (G_{A1}) 降低会使噪声系数恶化,因此,偏置电压的调整要兼顾对噪声系数的影响.

根据 ADS 优化得到的电路,我们最终调试成功低噪声放大器模块,测试得到的增益曲线和噪声系数曲线分别如图 7、图 8 最上方的曲线所示,增益高于 35dB,噪声系数小于 1.84dB,增益平坦度仅为 ± 0.34 dB.

5 结论

本文报导了我们自行设计并研制成功的 X 波段低噪声放大器模块,提出了调整增益平坦度的有效方法,即在两级放大器之间设计多个并联谐振支路,使其谐振在带外低频段的不同频点,衰减低频段的增益,从而拉低带内低频端的增益,再在支路中串、并联电阻调整增益压缩的大小,从而使工作频带

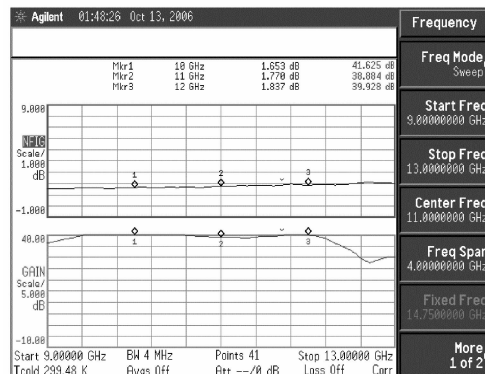


图 8 X 波段低噪声放大器模块的噪声曲线

Fig. 8 Noise figure of X-band LNA module

内增益平坦. 最终研制成功的 X 波段低噪声放大器模块增益 $>35\text{dB}$, 噪声系数 $\leq 1.84\text{dB}$, 增益平坦度 $\leq \pm 0.34\text{dB}$, 模块性能完全符合设计要求.

参考文献

- [1] Chen Tianqi. Microwave low noise transistor amplifier. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 1983: 183 (in Chinese) [陈天麒. 微波低噪声晶体管放大器. 北京: 人民邮电出版社, 1983: 183]
- [2] Wu Shixiang. Bipolar and field effect transistor. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1995: 116 (in Chinese) [武世香. 双极型和场效应晶体管. 北京: 电子工业出版社, 1995: 116]
- [3] Grebennikov A. Translated by Zhang Yuxing, Zhao Hongfei. RF and microwave power amplifier design. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 258 (in Chinese) [Grebennikov A. 张玉兴, 赵宏飞, 译. 射频与微波功率放大器设计. 北京: 电子工业出版社, 2006: 258]
- [4] Qiu Xiaofeng, Wu Yushu, Li Shufang, et al. Simulation and analysis of via effects on high speed signal transmission on PCB. Proceedings of Radio Science Conference, 2004: 284
- [5] Editor Committee of Chinese Integrated Circuits Collectivity. Microwave integrated circuits. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 174 (in Chinese) [《中国集成电路大全》编委会著. 微波集成电路. 北京: 国防工业出版社, 1995: 174]
- [6] Gonzalez G. Translated by Bai Xiaodong. Microwave transistor amplifiers analysis and design. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 261 (in Chinese) [Gonzalez G. 白晓东, 译. 微波晶体管放大器分析与设计. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 261]

X-Band Low Noise Amplifier Module

Hao Mingli[†], Liu Xunchun, Huang Qinghua, Yang Chengyue, and Wu Jin

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: An X-band low noise amplifier (LNA) module is designed and manufactured successfully, and an effective method for adjusting the gain flatness of the module is presented. The method entails placing several parallel resonant circuits between two low noise amplifier chips, providing different resonant frequency points at lower frequencies outside of the working band. It reduces the gain of the lower frequencies of the working band. The gain compression can be controlled by resistors added in the resonant circuits. As a result, flat gain is obtained using this method. This X-band LNA module shows a gain flatness of less than $\pm 0.34\text{dB}$, a noise figure less than 1.84dB , and a gain higher than 35dB .

Key words: X-band; LNA; gain flatness

EEACC: 1350F

Article ID: 0253-4177(2007)06-0963-04

[†] Corresponding author. Email: mytdhml@163.com

Received 27 November 2006, revised manuscript received 22 December 2006